

หุ่นยนต์เคลื่อนไหวยอิสระ 4 แกน

4DOF Robot

โดย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พุทธศักราช 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หุ่นยนต์เคลื่อนไหวยอิสระ 4 แกน

4DOF Robot

ดวงแก้ว ทองเล็ก
Duangkaew Thonglek

ทรวงศ์ โพธิ์อุดม
Thoranong Phoudom

วนิดา กลัดกลีบ
Wanida Kludklib

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พุทธศักราช 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

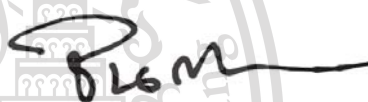
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ใบรับรองวิชา ปริญญาานิพนธ์

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
เรื่อง	สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หุ่นยนต์เคลื่อนไหวอิสระ 4 แกน 4DOF Robot
ผู้จัดทำ	นางสาว ดวงแก้ว ทองเล็ก รหัสประจำตัว 60010349 นาย ทรนงค์ โพธิ์อุดม รหัสประจำตัว 60010364 นางสาว วนิดา กลัดกลีบ รหัสประจำตัว 60010887

ปริญญาานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



อาจารย์ ชินภัทร นันทจิวงกรชัย
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หัวข้อปริญญานิพนธ์	หุ่นยนต์เคลื่อนไหวออิสระ 4 แกน
นักศึกษา	นางสาว ดวงแก้ว ทองเล็ก รหัสประจำตัว 60010349
	นาย ทรนงค์ โพธิ์อุดม รหัสประจำตัว 60010364
	นางสาว วนิดา กลัดกลีบ รหัสประจำตัว 60010887
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ชินภัทร นันทจิรากรชัย

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้นำเสนอเกี่ยวกับหุ่นยนต์เคลื่อนไหวออิสระ 4 แกน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา หุ่นยนต์ต้นแบบและนำมาสร้างหุ่นยนต์จำลองการทำงานของ Industrial Robot Arms โดยหุ่นยนต์ ดังกล่าวนี้นี้ จะเป็นการจำลองการทำงานในการเคลื่อนย้ายวัตถุ จะเป็นการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ 4 ตัว ทำงานร่วมกันกับ Encoder จำนวน 4 ตัว และ MCP23S17 จำนวน 2 ตัว ถูกควบคุมโดยโปรแกรม ที่ได้เขียนขึ้นบน Raspberry Pi เป็น บนหน้าจอ Graphical User Interface (GUI) ในการป้อนคำสั่ง โดย จะมีปุ่มมากมาย เช่น ปุ่ม Home, ปุ่มควบคุมที่ละข้อ, ปุ่มควบคุมในรูปแบบแกน XYZ, ปุ่ม Teach สำหรับจดจำการทำงาน และปุ่ม Save สำหรับบันทึกไฟล์ไว้เรียกใช้งานในภายหลัง ดังนั้นเมื่อมีการเรียก ไฟล์ที่ถูกบันทึกไว้ก่อนหน้านี้ หุ่นยนต์แขนกลจะนำค่าที่เคยจดจำไว้ในไฟล์นั้นๆ มาทำงานโดยอัตโนมัติ

นางสาว ดวงแก้ว ทองเล็ก 60010349
นาย ทรนงค์ โพธิ์อุดม 60010364
นางสาว วนิดา กลัดกลีบ 60010887

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Thesis Title	4DOF Robot
Student	Miss. Duangkaew Thonglek Student ID 60010349
	Mr. Thoranong Phoudom Student ID 60010364
	Miss. Wanida Kludklib Student ID 60010887
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Electronics Engineering
Year	2020
Project Advisor	Professor Chinnapat Nantajiwakornchai

Abstract

This report presents about the 4DOF robot. The aim of studying is to study the prototype robot. Then use it to create a simulated robot of Industrial Robot Arms. The 4DOF robot is simulation of moving the objects. This is to control the operation of four motors, four encoders, and two MCP23S17 controlled by a program written on the Raspberry Pi as an on-screen Graphical User Interface (GUI) to enter commands. There are many buttons such as the Home button, the individual control buttons, the XYZ-axis control buttons, the Teach button for memorizing actions, and the Save button to save the file for later use. So, when the file is called, the file that was saved earlier the 4DOF robot will take the memorized values in that file to work automatically

Miss. Duangkaew Thonglek	60010349
Mr. Thoranong Phoudom	60010364
Miss. Wanida Kludklib	60010887

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงาน ครั้งนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ ชินภัทร นันทจิวงกรชัย อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้คำแนะนำตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

ขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่ช่วยเป็นกำลังใจ และสนับสนุนเงินทุนในการซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงงาน และขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจใช้เวลาทำงานร่วมกันจนทำให้โครงงานฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้จัดทำรายงานขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้



ดวงแก้ว ทองเล็ก
ทรงงค์ โพธิ์อุดม
วนิดา กลัดกลีบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{III} Only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อ.....	I.
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II.
กิตติกรรมประกาศ.....	III.
สารบัญ.....	IV.
สารบัญตาราง.....	VIII.
สารบัญรูป.....	IX.
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตในการจัดทำโครงการ.....	2
1.4 ระยะเวลาในการทำโครงการ.....	2
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สภาพการเคลื่อนที่.....	4
2.1.1 องค์ประกอบของสภาพการเคลื่อนที่.....	4
2.1.2 กฎของนิวตัน.....	4
2.1.3 รูปแบบของการเคลื่อนที่.....	5
2.2 สเต็ปเปอร์มอเตอร์.....	12
2.2.1 โครงสร้างของสเต็ปเปอร์มอเตอร์.....	12
2.2.2 ชนิดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์.....	13
2.2.3 ขนาดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์มาตรฐาน.....	15
2.2.4 การควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์.....	16
2.3 Raspberry Pi 18	
2.3.1 หน่วยประมวลผล (Processor).....	19
2.3.2 ฮาร์ดแวร์ (Hardware).....	20
2.3.3 หน่วยประมวลผล.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเพิ่มเติมเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.4 ประสิทธิภาพ.....	21
2.3.5 การโอเวอร์คล็อก.....	22
2.2.6 การเชื่อมต่อ.....	23
2.3.7 Raspberry Pi 4 Model B 4 GB.....	25
2.4 เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder).....	26
2.4.1 การแบ่งประเภทของเอ็นโค้ดเดอร์.....	27
2.4.2 อุปกรณ์เสริมสำหรับเอ็นโค้ดเดอร์ Encoder.....	30
2.4.3 การประยุกต์ใช้.....	32
2.5 รีเลย์ (Relay).....	34
2.5.1 โครงสร้างของรีเลย์.....	34
2.5.2 การทำงานของรีเลย์.....	35
2.5.3 ประเภทของรีเลย์.....	35
2.5.4 ชนิดของรีเลย์.....	36
2.6 ทรานซิสเตอร์ (Transistor).....	37
2.6.1 ประเภทของทรานซิสเตอร์.....	38
2.6.2 การทำงานของทรานซิสเตอร์.....	38
2.7 ไดโอด (Diode).....	39
2.7.1 การทำงานของไดโอด.....	39
2.7.2 ชนิดของไดโอด.....	40
2.5.3 ประเภทของรีเลย์.....	35
2.5.4 ชนิดของรีเลย์.....	36
2.8 การสื่อสารอนุกรมแบบ Serial Peripheral Interface (SPI).....	42
2.8.1 สายสัญญาณในการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI.....	42
2.8.2 การเชื่อมต่อระบบด้วยการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI.....	43
2.8.3 รูปแบบสัญญาณใน SPI BUS.....	44
2.8.4 การใช้งานการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI.....	46
บทที่ 3 หลักการทำงานและการออกแบบ.....	47
3.1 อุปกรณ์.....	47
3.1.1 อุปกรณ์บนบอร์ด MCP23S17.....	47
3.1.2 อุปกรณ์บนบอร์ด Encoder.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3.1.2 อุปกรณ์บนบอร์ด Encoder การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขใดๆ โดยเฉพาะด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.1.3 อุปกรณ์ประกอบชิ้นงาน.....	47
3.1.4 อุปกรณ์อื่นๆ.....	48
3.2 การเลือกอุปกรณ์.....	48
3.2.1 ตัวต้านทาน.....	48
3.2.2 Absolute Encoder.....	48
3.2.3 MCP23S17.....	48
3.2.4 Raspberry Pi.....	48
3.3 วิธีการดำเนินงานและลักษณะการทำงาน.....	49
3.3.1 วิธีการดำเนินงาน.....	49
3.3.2 ลักษณะการทำงาน.....	49
3.4 การออกแบบ.....	55
3.4.1 Schematic.....	55
3.4.2 PCB Boards.....	57
3.4.3 ลักษณะของชิ้นงาน.....	58
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	59
4.1 ผลการทดลองแสดงค่ามุมที่ได้เมื่อควบคุมค่าสถานะของแรงดันโดยตรง.....	59
4.1.1 วิธีการคำนวณค่ามุม.....	59
4.2 ผลการทดลองแสดงค่า Decimal output ที่ได้เมื่อต่อกับเอ็นโค้ดเดอร์.....	60
4.2.1 วิธีการคำนวณค่าตำแหน่ง (Position).....	61
4.3 ผลการทดลองความแม่นยำของการกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นของมอเตอร์.....	61
4.3.1 ยกตัวอย่างการคำนวณ.....	62
4.4 ผลการทดลองความถูกต้องของค่าที่แสดงผลและค่าตำแหน่ง.....	61
4.4.1 ยกตัวอย่างการคำนวณ.....	64
4.5 ผลการทดลองการเคลื่อนที่เข้าตำแหน่งโฮม (Referent Position).....	64
4.6 ผลการทดลองหาระยะการเคลื่อนที่.....	65
4.7 ผลการทดลองความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability).....	65
4.7.1 ยกตัวอย่างการคำนวณ.....	66
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	67
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ (User Interface) ไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหาโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.1.2 การทดลองการหาตำแหน่งอ้างอิง (Home Position).....	67
5.1.3 การทดสอบการเคลื่อนที่ออกนอกกระยะที่กำหนด (Exceed Limit Test).....	67
5.1.4 ส่วนการทดลองการทำงานของแขนกล.....	68
5.3 ปัญหา อุปสรรค และการแก้ไข.....	68
บรรณานุกรม.....	70
ภาคผนวก.....	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{vii} Only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงระยะเวลาในการทำโครงการ.....	2
2.1 แสดงโหมดของการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI.....	45
3.1 แสดงผลการทดสอบการทำงานของมอเตอร์.....	49
4.1 แสดงผลการทดลองแสดงค่ามุมที่ได้เมื่อควบคุมค่าสถานะของแรงดัน.....	59
4.2 แสดงผลการทดลองแสดงค่า Decimal output ที่ได้เมื่อต่อกับเอ็นโค้ดเดอร์.....	60
4.3 แสดงผลการทดลองความแม่นยำในการกลับสู่ตำแหน่งอ้างอิง.....	62
4.4 แสดงผลการทดลองความถูกต้องของค่าที่แสดงผลและค่าตำแหน่ง.....	63
4.5 แสดงผลการทดลองเคลื่อนที่เข้าตำแหน่งโฮม.....	64
4.6 แสดงผลการทดลองหาระยะการเคลื่อนที่.....	65
4.7 แสดงผลการทดลองความสามารถในการทำซ้ำ.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งและหมุนของวัตถุขณะเคลื่อนที่.....	7
2.2 (ก) แสดงการโยนวัตถุขึ้นไป.....	8
2.2 (ข) แสดงการปล่อย หรือขว้างวัตถุลงมา.....	8
2.3 แสดงการเคลื่อนที่รอบแกนหมุนของวัตถุ.....	10
2.4 แสดงการเคลื่อนที่รอบแกนหมุนของวัตถุของโมเมนตัม.....	11
2.5 แสดงโครงสร้างของ Step Motor.....	12
2.6 แสดงแผนผังการทำงานของ Stepping Motor.....	13
2.7 แสดงสตีปเปอร์มอเตอร์แบบไบโพลาร์.....	13
2.8 แสดงสตีปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์.....	14
2.9 แสดงสตีปเปอร์มอเตอร์แบบไฮบริด.....	15
2.10 แสดงรูปร่างสตีปเปอร์มอเตอร์ขนาดรูปลูกบาศก์.....	15
2.11 แสดงรูปร่างสตีปเปอร์มอเตอร์ขนาดรูปทรงกระบอก.....	16
2.12 แสดงรูปร่างสตีปเปอร์มอเตอร์ขนาดรูปทรงกระป๋อง.....	16
2.13 แสดงตารางขั้นตอนการควบคุมแบบเวฟ.....	17
2.14 แสดงตารางขั้นตอนการควบคุมแบบ 2 เฟส.....	17
2.15 แสดงตารางขั้นตอนการควบคุมครึ่งสตีป.....	18
2.16 แสดงรายละเอียดของ Raspberry Pi 2 Model B.....	20
2.17 แสดงแผนภาพการทำงานโดยรวม.....	20
2.18 แสดงลักษณะของ Broadcom BCM2836.....	21
2.19 แสดงรายละเอียดของ Raspberry Pi 3 Model B.....	22
2.20 แสดงตำแหน่งของตัวเชื่อมต่อและ IC หลักบน Raspberry Pi Zero.....	23
2.21 แสดงตำแหน่งของตัวเชื่อมต่อและ IC หลักบน Raspberry Pi 1 รุ่น A.....	23
2.22 แสดงตำแหน่งของตัวเชื่อมต่อและ IC หลักบน Raspberry Pi 1 รุ่น A + revision 1.1.....	24
2.23 แสดงตำแหน่งของตัวเชื่อมต่อและ IC หลักบน Raspberry Pi 1 รุ่น B revision 1.2.....	24
2.24 แสดงตำแหน่งของตัวเชื่อมต่อและ IC หลักบน Raspberry Pi 1 รุ่น B +	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามตัดแปลงเนื้อหา และต้องยกย่องเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

revision 1.2 และ Raspberry Pi 2.....	24
2.25 แสดงตำแหน่งของตัวเชื่อมต่อและ IC หลักบน Raspberry Pi 3.....	25
2.26 แสดงรายละเอียดของ Raspberry Pi 4 Model B 4GB	25
2.27 แสดงสัญญาณพัลส์ที่เกิดจาก Incremental Rotary Encoder.....	27
2.28 แสดงสัญญาณเอาต์พุตแบบรหัส Binary จำนวน 4 บิต ของ Absolute Encoder.....	28
2.29 แสดงสัญญาณเอาต์พุตแบบรหัส Gray จำนวน 4 บิต ของ Absolute Encoder.....	28
2.30 แสดงโครงสร้างของ Magnetic Code Ring และ IC Sensor.....	29
2.31 แสดงโครงสร้างของ Multi-turn Rotary Encoder	30
2.32 แสดงอุปกรณ์เสริมที่ช่วยในการติดตั้ง และใช้งานตัว Rotary Encoder ให้มีประสิทธิภาพ.....	31
2.33 แสดงการป้อนกลับความเร็วหรือตำแหน่งของมอเตอร์โดยใช้ Rotary Encoder.....	33
2.34 รูปร่างและสัญลักษณ์ของรีเลย์.....	35
2.35 แสดงการทำงานของรีเลย์.....	35
2.36 แสดงโครงสร้างอาร์เมเจอร์รีเลย์.....	36
2.37 แสดงอุปกรณ์รีดรีเลย์.....	36
2.38 แสดงอุปกรณ์รีดสวิตช์.....	37
2.39 แสดงอุปกรณ์โซลิดสเตตรีเลย์.....	37
2.40 แสดงสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ประเภท NPN.....	38
2.41 แสดงสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ประเภท PNP.....	38
2.42 แสดงการทำงานของไดโอด แบบ Forward Bias และ Reverse Bias.....	40
2.43 แสดง Detector Diode.....	40
2.44 แสดง Rectifier Diode.....	40
2.45 แสดงลักษณะของไดโอดกำลัง.....	41
2.46 แสดง Zener Diode.....	41
2.47 แสดง Light Emitting Diode.....	42
2.48 แสดง Photo Diode.....	42
2.49 แสดงการเชื่อมต่อระบบด้วยการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI แบบ Slave เดียว.....	43
2.50 แสดงการเชื่อมต่อระบบด้วยการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI แบบ Slave เดียว.....	44
2.51 แสดงรูปแบบสัญญาณเมื่อ CPHA = 0.....	44

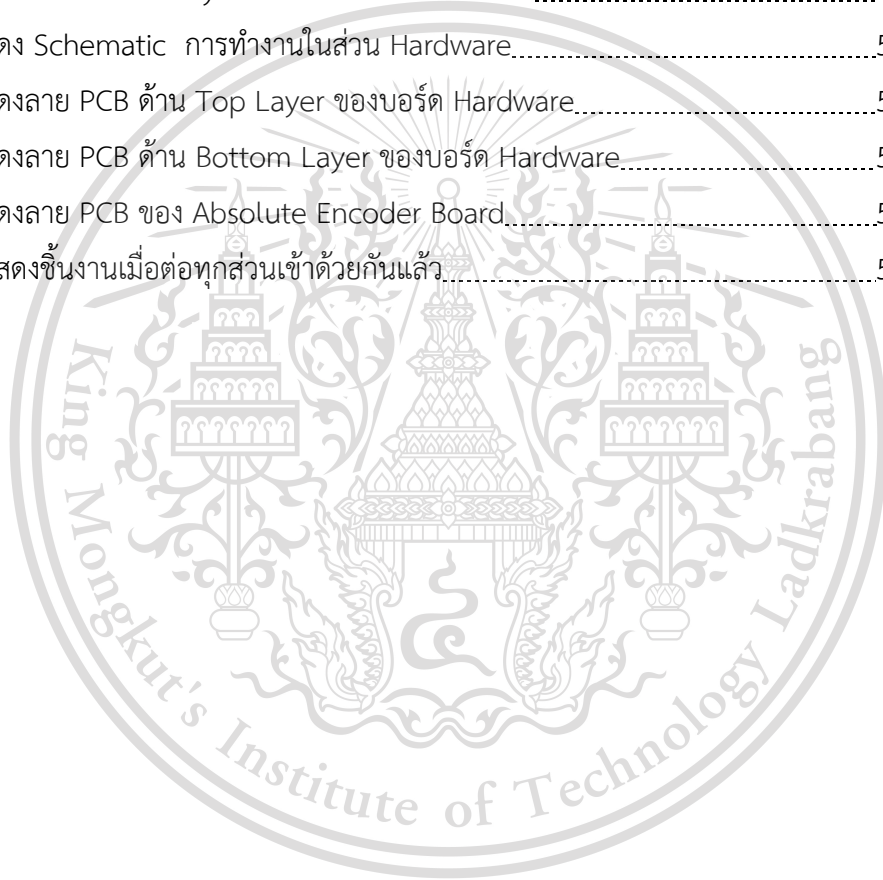
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้ผู้อื่นได้ใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.53 แสดงตัวอย่างการส่งอักษร 'H' แบบ SPI.....	45
2.54 แสดงตัวอย่างการส่งอักษร 'H' และรับข้อมูลอักษร 'H' ด้วยการสื่อสาร อนุกรมแบบ SPI.....	46
3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของโครงงาน.....	50
3.2 แสดงหน้าต่างของ Graphic User Interface (GUI).....	52
3.3 แสดง Functional Block Diagram ของ MCP23S17.....	52
3.4 แสดง วงจร Pull UP Resistor.....	53
3.5 แสดง SPI Control byte format ของ MCP23S17.....	54
3.6 แสดง Schematic การทำงานในส่วน Hardware.....	56
3.7 แสดงลาย PCB ด้าน Top Layer ของบอร์ด Hardware.....	57
3.8 แสดงลาย PCB ด้าน Bottom Layer ของบอร์ด Hardware.....	57
3.9 แสดงลาย PCB ของ Absolute Encoder Board.....	57
3.10 แสดงชิ้นงานเมื่อต่อทุกส่วนเข้าด้วยกันแล้ว.....	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use^{XI} Only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันอย่างมาก เพราะเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆที่พบเห็นได้ในปัจจุบัน ล้วนประกอบขึ้นมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ทั้งสิ้นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบกันขึ้นมานี้จะประกอบขึ้นเป็นวงจรใน รูปแบบต่างๆกันตาม ความต้องการใช้งานและคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละอุปกรณ์ นำไปใช้ได้หลากหลาย ไม่ได้จำกัดอยู่ เพียงในวงการวิศวกรรมหรือองค์กรใหญ่ๆเท่านั้น และในปัจจุบันนี้กระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม ได้มีการนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความทันสมัยเข้ามาใช้งานมากขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวก ซึ่ง ในการทำงานจำเป็นต้องศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่างๆ ดังนั้นอิเล็กทรอนิกส์จึงเป็น วิชาที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก

ด้านของกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมโรงงาน จะมีการใช้แขนกลอุตสาหกรรม ซึ่งจะถูก ออกแบบมาให้มีการทำงานซ้ำๆ กัน ได้อย่างถูกต้อง ในขอบเขตการทำงานที่ถูกโปรแกรมตั้งไว้ เพื่อ ความสะดวก รวดเร็ว ในการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน เนื่องจากสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ยาวนาน และนอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพที่ดี มีความแม่นยำ จำนวนชิ้นงานที่ทำก็มีจำนวนเพิ่มมาก ขึ้นอีกด้วย

รายงานนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ แขนกลอุตสาหกรรม (Industrial Robotic Arms) โดย ออกแบบชิ้นงาน เพื่อจำลองการทำงาน โดยได้มีการศึกษาส่วนประกอบส่วนต่างๆ ของแขนกล และ การทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ เช่น สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper motors) ซึ่งจะถูกควบคุมโดย ราช เบอร์รี่พาย(Raspberry Pi) จึงทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนไหวได้ตามโปรแกรมที่ตั้งไว้ โดยใช้ภาษาไพทอน (Python) ในการทำรายงานครั้งนี้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเขียนภาษาไพทอน (Python)
- 1.2.2 เพื่อเขียนโปรแกรมติดต่อระหว่างคอนโทรลเลอร์ (Controller) กับวงจร อิเล็กทรอนิกส์ภายนอก
- 1.2.3 เพื่อให้มีความรู้เข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้
- 1.2.4 เพื่อจำลองการทำงานของ แขนกลอุตสาหกรรม (Industrial Robotic Arms)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 เป็นเพียงการจำลองการทำงานเท่านั้น
- 1.3.2 เมื่อกดปุ่มจะสามารถทำให้มอเตอร์หมุนและหยุดหมุนเมื่อปล่อย โดยจะมีการวัดมุมและแสดงออกมาด้วย
- 1.3.3 สามารถควบคุมมอเตอร์ทั้ง 4 ตัว
- 1.3.4 สามารถบันทึกข้อมูลการเคลื่อนไหวและเรียกมาใช้สั่งให้ทำงานได้
- 1.3.5 สามารถปรับค่าความเร็วและความเร่งได้

1.4 ระยะเวลาในการทำโครงการ

เริ่มต้นตั้งแต่ 17 มกราคม 2564 จนถึง 25 เมษายน 2564

ขั้นตอนการดำเนินงาน	สัปดาห์ที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. ทฤษฎี / ซื่ออุปกรณ์	←→												
2. ประกอบชุดทดลอง			←→										
3. เก็บผลการทดลอง							สัปดาห์ที่	←→					
4. สรุปผลการทดลอง									←→				
5. เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์												←→	

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

รายงานครั้งนี้ คณะผู้จัดทำได้กำหนด นิยามศัพท์ ดังนี้

- 1.5.1 **ตำแหน่งมุมเริ่มต้น/ตำแหน่งมุมอ้างอิง** หมายถึง ตำแหน่งมุมที่ทางผู้จัดทำได้กำหนดให้เป็นตำแหน่งเริ่มต้นก่อนเริ่มการเคลื่อนที่ไปยังมุมที่ต้องการหรือก็คือปุ่ม Home นั่นเอง ซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) วัดได้ ณ ตำแหน่งนั้น โดยมีค่าเท่ากับ 106.8750 องศา นั่นเอง
- 1.5.2 **ตำแหน่งปัจจุบัน** หมายถึง ตำแหน่งที่มอเตอร์หยุดอยู่ ณ ตอนนั้น ห่างจากตำแหน่งเริ่มต้นตามที่เราต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถทำการออกแบบวงจรด้วยตัวเอง และนำความรู้ไปใช้ในการออกแบบวงจรอื่นๆ
- 1.6.2 สามารถวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นกับวงจรและโปรแกรมได้
- 1.6.3 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงาน
- 1.6.4 ได้ความรู้ในการเขียนโปรแกรม ภาษาไพทอน (Python)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาในครั้งนี้ ผู้ศึกษาได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งเนื้อหาของทฤษฎีออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

2.1 สภาพการเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ หมายถึง การเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุในช่วงเวลา โดยจะทำการวัดการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงจะถือว่าวัตถุนั้นหยุดนิ่ง และการเคลื่อนที่ของวัตถุจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ก็ต่อเมื่อมีแรงมากระทำ

สภาพการเคลื่อนที่แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- สภาพการเคลื่อนที่คงเดิม หมายถึง อาการที่วัตถุอยู่นิ่งหรือมีความเร็วคงที่
- สภาพการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลง หมายถึง อาการที่วัตถุมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง

2.1.1 องค์ประกอบของสภาพการเคลื่อนที่

2.1.1.1 แรง คือ การกระทำจากภายนอกที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของระบบทางกายภาพ โดยแรงเป็นผลมาจากการใช้พลังงาน ถ้าแรงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางจลนศาสตร์ตามกฎข้อที่สองของนิวตันคือ เกิดความเร่ง แต่ถ้าไม่ ก็อาจก่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ได้เหมือนกัน หน่วยเอสไอของแรงคือ นิวตัน (N)

2.1.1.2 มวล คือ ปริมาณของวัตถุที่ต้านการเปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่ของวัตถุ มวลเป็นปริมาณ สเกลาร์ มีหน่วยวัดเป็นกิโลกรัม (kg)

2.1.2 กฎของนิวตัน (Newton's law)

กฎข้อที่ 1 กฎของความเฉื่อย (Inertia)

นิวตันได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของวัตถุไว้ สรุปได้ว่า

“ ถ้าไม่มีแรงภายนอกมากระทำต่อวัตถุ หรือแรงลัพธ์ที่มากระทำมีค่าเป็นศูนย์ วัตถุจะไม่เปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่”

เช่น ถ้าวัตถุหยุดนิ่งก็จะหยุดนิ่งต่อไป ถ้ากำลังเคลื่อนที่ก็จะเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วคงตัว หรือสามารถเรียกได้ว่า มีความเร่งเท่ากับศูนย์ ($a = 0$)

กฎข้อที่ 2 กฎของแรง (Force)

นิวตันได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรง มวล และความเร่ง สรุปเป็น กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้จำเป็นต้องรับผิดชอบต่อเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

"เมื่อมีแรงลัพธ์ที่มีขนาดไม่เป็นศูนย์มากระทำกับวัตถุ จะทำให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งในทิศทางเดียวกับแรงลัพธ์ที่มีมากระทำ และขนาดของความเร่งจะแปรผันตรงกับขนาดของแรงลัพธ์ และแปรผกผันกับมวลของวัตถุ" โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\text{ความเร่งของวัตถุ} = \frac{\text{แรงที่กระทำต่อวัตถุ}}{\text{มวลของวัตถุ}} \quad (2.1)$$

หรือ
$$a = \frac{F}{m}$$

กฎข้อที่ 3 กฎของแรงปฏิกิริยา

นิวตันได้สรุปความสัมพันธ์ระหว่างแรงกิริยาและแรงปฏิกิริยาไว้เป็นกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 3 ของนิวตัน ซึ่งมีใจความว่า

“ทุกแรงกิริยาจะต้องมีแรงปฏิกิริยาที่มีขนาดเท่ากันและทิศตรงข้ามกันเสมอ” หรือ “แรงที่วัตถุที่หนึ่งกระทำต่อวัตถุที่สอง ย่อมเท่ากับ แรงที่วัตถุที่สองกระทำต่อวัตถุที่หนึ่ง แต่ทิศทางตรงข้ามกัน” ตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{Action} = \text{Reaction} \quad (2.2)$$

2.1.3 รูปแบบของการเคลื่อนที่

2.1.3.1 การเคลื่อนที่ในแนวตรง

เป็นการเคลื่อนที่ที่ไม่เปลี่ยนทิศทาง เช่น การเคลื่อนที่ของลูกมะพร้าวเมื่อตกจากต้นสุพรรณิคม การเคลื่อนที่ของรถยนต์บนถนนตรง เป็นต้น

1) ปริมาณที่เกี่ยวข้องดังนี้

ระยะทาง (Distance) คือ ความยาวของเส้นทางที่วัตถุมีการเปลี่ยนตำแหน่งไปจากตำแหน่งเดิม ซึ่งจะเรียกการเปลี่ยนตำแหน่งแบบนี้ว่า “การเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง (translation motion)” โดยระยะทางใช้สัญลักษณ์ “s” เป็นปริมาณ สเกลาร์ มีแต่ขนาดเพียงอย่างเดียว แต่ไม่สามารถบอกทิศทางได้ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

การกระจัด (Displacement) คือ ความยาวของเส้นตรงยลจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้ายและมีหัวลูกศรบอกทิศทาง สามารถบอกได้ทั้งขนาดและทิศทาง โดยใช้สัญลักษณ์ “s” เป็นปริมาณเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น เมตร (m)

อัตราเร็ว (Speed) คือ ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ได้ในหนึ่งเวลา เป็นปริมาณสเกลาร์ ใช้สัญลักษณ์ “v” มีหน่วย เมตรต่อวินาที (m/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้เผยแพร่เพื่อประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$v = \frac{s}{t} \quad (2.3)$$

เมื่อ v คือ อัตราเร็วของวัตถุ มีหน่วย เมตรต่อวินาที (m / s)

s คือ ระยะทางของวัตถุ มีหน่วย เมตร (m)

t คือ เวลาที่วัตถุใช้ในการเคลื่อนที่ มีหน่วย วินาที (s)

ความเร็ว (velocity) คือ การกระจัดที่เปลี่ยนแปลงไปในหนึ่งหน่วยเวลา เรียกว่า ความเร็ว เป็นปริมาณเวกเตอร์ ใช้สัญลักษณ์ “ $\vec{v}$ ” มีหน่วย เมตรต่อวินาที (m / s)

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\vec{v}$ คือ ความเร็วของวัตถุ มีหน่วย เมตรต่อวินาที (m / s)

$\vec{s}$ คือ การกระจัดของวัตถุ มีหน่วย เมตร (m)

t คือ เวลาที่วัตถุใช้ในการเคลื่อนที่ มีหน่วย วินาที (s)

ความเร่ง (Acceleration) คือ ความเร็วที่เปลี่ยนไปในหนึ่งหน่วยเวลา เป็นปริมาณเวกเตอร์ ใช้สัญลักษณ์ “ $\vec{a}$ ” หน่วย เมตรต่อวินาที² (m/s²)

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (2.5)$$

เมื่อ $\vec{a}$ คือ ความเร่งของวัตถุ มีหน่วย เมตรต่อวินาที² (m / s²)

$\Delta \vec{v}$ คือ ความเร็วของวัตถุ มีหน่วย เมตรต่อวินาที (m / s)

Δt คือ เวลาที่วัตถุใช้ในการเคลื่อนที่ มีหน่วย วินาที (s)

ข้อควรจำ

ความเร่งที่มีทิศเดียวกับความเร็ว เรียกว่า “ความเร่ง”

ความเร่งที่มีทิศตรงข้ามกับความเร็ว เรียกว่า “ความหน่วง”

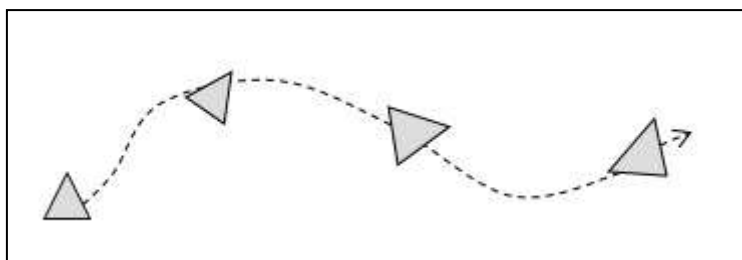
2) การเคลื่อนที่เชิงเส้นที่ความเร็วคงที่

ถ้าสังเกตการเคลื่อนที่ของวัตถุต่างๆ จะพบว่าส่วนมากในขณะวัตถุเคลื่อนที่นั้น ตำแหน่งของวัตถุจะเปลี่ยนไปพร้อมกับมุม ดังรูปที่ 2.1 ถ้าสนใจเฉพาะกรณีวัตถุขนาดเล็กและไม่สนใจการหมุนขณะเคลื่อนที่ เรียกการเคลื่อนที่ลักษณะนี้ว่า “การเคลื่อนที่เชิงเส้น”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งและหมุนของวัตถุขณะเคลื่อนที่
(ที่มา : <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/>)

สมการการเคลื่อนที่เป็นไปตามสมการ

$$S = vt \quad (2.6)$$

เมื่อ S คือการกระจัดในหน่วยเมตร

v คือความเร็วในหน่วยเมตรต่อวินาที ส่วน

t คือเวลาที่ผ่านไปหน่วยวินาที

3) การเคลื่อนที่เชิงเส้นด้วยความเร็วไม่คงที่

กรณีนี้ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด ความเร็ว ณ วินาทีที่เริ่มพิจารณา หรือตำแหน่งที่เริ่มพิจารณา ซึ่งนิยมเรียกว่า “ความเร็วต้น(u)” ความเร็ว ณ วินาทีสุดท้ายที่พิจารณาหรือตำแหน่งสุดท้ายที่พิจารณา ซึ่งนิยมเรียกว่า “ความเร็วปลาย(v)” ความเร่งคงที่(a) และเวลาที่ผ่านไป(t) เป็นตามความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$v = u + at \quad (2.7)$$

$$v^2 = u^2 + 2aS \quad (2.8)$$

$$S = ut + \frac{1}{2}at^2 \quad (2.9)$$

$$S = \frac{(v+u)}{2}t \quad (2.10)$$

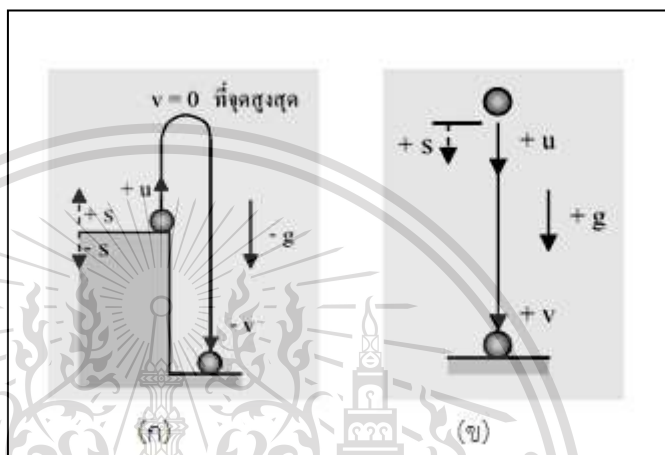
ในการแทนค่าต้องระมัดระวังว่า v, u, a, S เป็นเวกเตอร์ซึ่งมีทั้งขนาด และทิศทาง แต่เมื่อใช้กับการเคลื่อนที่ในแนวตรง จึงใช้เครื่องหมาย (+) และ (-) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้แทนทิศทางได้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4) การเคลื่อนที่ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก

การเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ความเร่งมีค่าคงตัวและมีทิศลงในแนวดิ่งเสมอ ซึ่งการตกของวัตถุภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก คือ การตกอย่างเสรี (free fall) โดยการเคลื่อนที่ของวัตถุจะมีความเร่งคงที่เท่ากับความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) ค่ามาตรฐาน คือ 9.8065 m/s^2 เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะใช้ 10 m/s^2



รูปที่ 2.2 (ก) แสดงการโยนวัตถุขึ้นไป (ข) แสดงการปล่อย หรือขว้างวัตถุลงมา

(ที่มา : <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/>)

สมการการเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก จึงเป็นดังนี้

$$v = u + gt \quad (2.11)$$

$$v^2 = u^2 + 2gS \quad (2.12)$$

$$S = ut + \frac{1}{2}gt^2 \quad (2.13)$$

$$S = \frac{(v+u)}{2}t \quad (2.14)$$

2.1.3.2 การเคลื่อนที่แบบหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น จะเกิดบนวัตถุที่มีรูปทรงคงที่ โดยที่แรงที่มากระทำไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล จึงจะเกิดการค้ำ ทำให้ เกิดโมเมนต์ของแรงหรือทอร์ก (Torque) ซึ่งบางครั้งเรียกแรงนี้ว่า แรงบิด

1) ปริมาณต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบหมุน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อัตราเร็วเชิงมุม (angular speed) (ω) ในที่นี้หมายถึง ค่าอัตราเร็วเชิงมุม ขณะใดขณะหนึ่งหรือค่าอัตราเร็วเชิงมุมเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาสั้นๆ โดยหาได้จากสมการ

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (2.15)$$

เมื่อ ω คือ อัตราเร็วเชิงมุมของวัตถุที่หมุนรอบแกนหมุนมีหน่วยเป็น เรเดียน/วินาที

$\Delta\theta$ คือ มุมที่วัดกวาดไปในช่วงเวลาสั้นๆ Δt

ความเร็วเชิงมุม (angular velocity) ($\vec{\omega}$) หมายถึง การกระจัดเชิงมุม ($\Delta\theta$) ที่เปลี่ยนไปในเวลาหนึ่งหน่วย ซึ่งเขียนสมการได้ว่า

$$\vec{\omega} = \frac{\Delta\vec{\theta}}{\Delta t} \quad (2.16)$$

การหาทิศทางการกระจัดเชิงมุม ($\Delta\vec{\theta}$) และความเร็วเชิงมุม ($\vec{\omega}$) หาได้จากการใช้มือขวากำรอบแกนหมุนให้นิ้วทั้งสี่ (ชี้กลางนางก้อย) ชี้นิ้วไปทางเดียวกับทิศทางการหมุน นิ้วหัวแม่มือทาบไปตามแกนหมุนจะได้ว่าทิศของการกระจัดเชิงมุม ($\Delta\vec{\theta}$) และความเร็วเชิงมุม ($\vec{\omega}$) จะชี้ตามแนวชี้ของนิ้วหัวแม่มือ

ความเร็วเชิงมุม ($\vec{\omega}$) เป็นปริมาณเวกเตอร์จะมีทิศทางเดียวกับ $\Delta\vec{\theta}$ หน่วยของความเร็วเชิงมุมเป็นเรเดียน/วินาที (rad/s)

ความเร่งเชิงมุม (angular acceleration) ($\vec{a}$) หมายถึง ความเร็วเชิงมุมที่เปลี่ยนไปในเวลาหนึ่งหน่วย เป็นปริมาณเวกเตอร์ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} = \frac{\vec{\omega} - \vec{\omega}_0}{t_2 - t_1} \quad (2.17)$$

หน่วยของความเร่งเชิงมุมเป็น เรเดียน/วินาที²

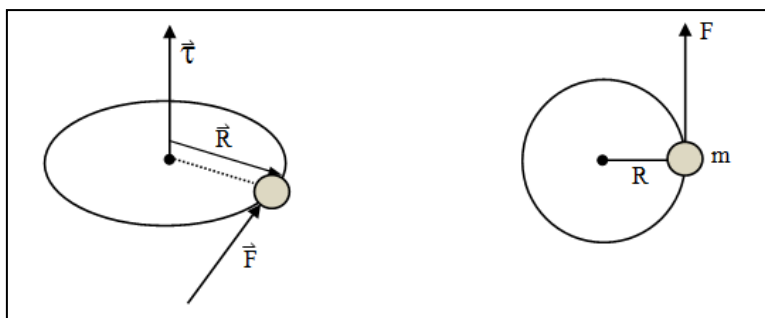
2) ทอร์กกับการเคลื่อนที่แบบหมุน

เป็นปริมาณที่ทำให้เกิดการหมุนของวัตถุรอบแกนหมุน เมื่อแรงอยู่ห่างจากจุดหมุนเป็นระยะ R ทอร์กเป็นปริมาณเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น นิวตัน-

เมตร ขนาดของทอร์ก เท่ากับแรงคูณกับระยะทางที่ตั้งฉากจากจุดหมุนถึงแนวแรง ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.3 แสดงการเคลื่อนที่รอบแกนหมุนของวัตถุ

(ที่มา : <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/>)

จากรูปที่ 2.3 เมื่อเปรียบเทียบว่า F เป็นแรงที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง และ t เป็นปริมาณที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่รอบแกนหมุน

$$\Sigma F = ma \quad (2.18)$$

$$\tau = mR^2 a \quad (2.19)$$

ปริมาณ mR^2 จึงแสดงถึงปริมาณต้านการเปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่แบบหมุน เรียกว่า “โมเมนต์ความเฉื่อย (I)” มีหน่วยเป็น $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ดังนั้นจึงเขียนสมการได้เป็นดังสมการที่ 2.20 โดยทอร์กมีทิศเช่นเดียวกันกับความเร่งเชิงมุม

$$\tau = I\alpha \quad (2.20)$$

3) โมเมนต์ความเฉื่อย

โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบอนุภาค จะเป็น

$$I = \sum_{i=1}^n m_i R_i^2 \quad (2.21)$$

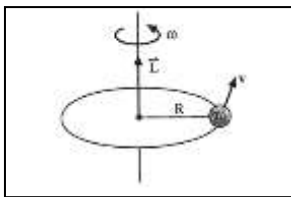
จะเห็นว่า ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมวลตัวเดียวกัน อาจมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อหมุนรอบแกนที่ระยะห่างต่างกัน

4) โมเมนต์ตัมเชิงมุม

จะมีขนาดเท่ากับผลคูณของโมเมนต์ความเฉื่อยกับความเร่งเชิงมุม และ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ทิศของโมเมนต์ตัมเชิงมุมตั้งฉากกับแนวระนาบการหมุน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่รอบแกนหมุนของวัตถุ
(ที่มา : <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/>)

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าวัตถุเมื่อหมุนรอบแกนหนึ่งด้วยความเร็วเชิงมุมคงตัวจะมีโมเมนตัมเชิงมุม เป็นดังสมการ

$$\vec{L} = I\vec{\omega} \quad (2.22)$$

เมื่อขณะที่วัตถุหมุนด้วยโมเมนตัมเชิงมุม L วัตถุจะอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมนั้นไว้ ดังนั้น จากกฎอนุรักษ์โมเมนตัม จึงอธิบายการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมได้เป็น

$$\Sigma L_1 = \Sigma L_2 \quad (2.23)$$

$$\Sigma I_1 \omega_1 = \Sigma I_2 \omega_2 \quad (2.24)$$

แต่เมื่อมีการเปลี่ยนโมเมนตัมเชิงมุม ΔL กับวัตถุที่เคลื่อนที่แบบหมุน

$$\Delta \vec{L} = \vec{L}_2 - \vec{L}_1 \quad (2.25)$$

$$\Delta \vec{L} = I (\vec{\omega}_2 - \vec{\omega}_1) \quad (2.26)$$

โมเมนตัมเชิงมุม ΔL ที่เปลี่ยนไป ในช่วงเวลา Δt

อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมเชิงมุม

$$\frac{\Delta L}{\Delta t} = I \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{\Delta t} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น} \quad \tau = \frac{\Delta L}{\Delta t} = I\alpha \quad (2.29)$$

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากสมการ 2.25 แสดงให้เห็นว่า ทอร์ก หมายถึง การเปลี่ยนโมเมนตัมเชิงมุมในหนึ่งหน่วยเวลา มีลักษณะคือ วัตถุมีความเร็วเชิงมุมเพิ่มขึ้น หรือมีความเร็วเชิงมุมลดลง แสดงให้เห็นว่าต้องมีทอร์กทำให้ความเร็วเชิงมุมเปลี่ยนไป

แต่ในกรณีที่วัตถุหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงตัว $\Delta\omega = 0$ แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนโมเมนตัม $\Delta L = 0$ ดังนั้น $\Sigma \tau = 0$ หรือวัตถุสมดุลต่อการหมุนนั่นเอง หรืออธิบายได้ว่า

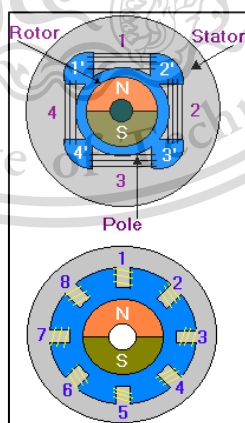
$$\Sigma \tau_{\text{ทวน}} = \Sigma \tau_{\text{ตาม}} \quad (2.30)$$

2.2 สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper motor)

สเต็ปเปอร์มอเตอร์ เป็นมอเตอร์ที่มีลักษณะเมื่อเราป้อนไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ทำให้หมุนเพียงเล็กน้อยตามเส้นรอบวงและหยุด ซึ่งต่าง จากมอเตอร์ทั่วไปที่จะหมุนทันทีและตลอดเวลาเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าข้อดีของสเต็ปมอเตอร์ สามารถกำหนด ตำแหน่งของการหมุนด้วยตัวเลข(องศาหรือระยะทาง) ได้อย่างละเอียดโดย ใช้คอมพิวเตอร์หรือ ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็น เครื่องกำหนดและจัดเก็บตัวเลข

2.2.1 โครงสร้างของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

โครงสร้างของขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์ทำมาจากแผ่นเหล็กวงแหวนที่มีซี่ยื่นออกมาประกอบกันเป็นชั้นๆ โดยที่แต่ละซี่นั้นจะมีคอยล์(ขดลวด)พันสวมอยู่ เมื่อมีการป้อนกระแสผ่านคอยล์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของ Step Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในการทำงานของ Stepping Motor หรือ Stepper Motor นั้นจะไม่สามารถขับเคลื่อนหรือทำงานเองได้ จำเป็นต้องมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณหรือจ่ายพัลส์ไปให้วงจรขับสเต็ปมอเตอร์ (Stepping Motor Drive) ดังรูป 2.6 การสร้างสัญญาณนั้นจะต้องสร้างและเรียงลำดับของสัญญาณด้วยและอีกสิ่งที่สำคัญคือการดูตำแหน่งของสายที่ทำการต่อเข้ากับตัวสเต็ปมอเตอร์



รูปที่ 2.6 แสดงแผนผังการทำงานของ Stepping Motor

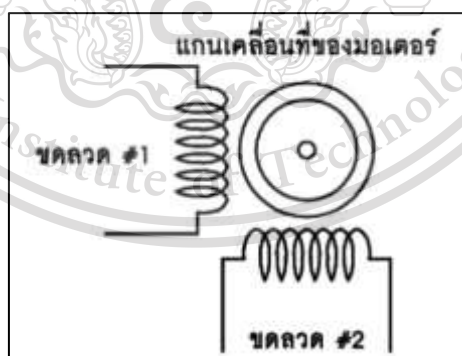
(ที่มา : <https://mall.factomart.com/principle-of-stepping-motor/>)

2.2.2 ชนิดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

ในอดีตมีการแบ่งชนิดตามลักษณะโครงสร้างซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

2.2.2.1 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไบโพลาร์

มีลักษณะการพันขดลวดของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 2.7 แบ่งออกเป็น 2 ขดที่ไม่มีแท่งกลาง ทำให้บางครั้งจึงเรียกว่า เป็นสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบ 2 เฟส การขับให้มอเตอร์หมุนจะต้องป้อนแรงดันต่างขั้วกันให้แก่ขดลวดแต่ละขด ทำให้วงจรขับค่อนข้างซับซ้อน



รูปที่ 2.7 แสดงสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไบโพลาร์

(ที่มา: <https://www.arduino2robot.com>)

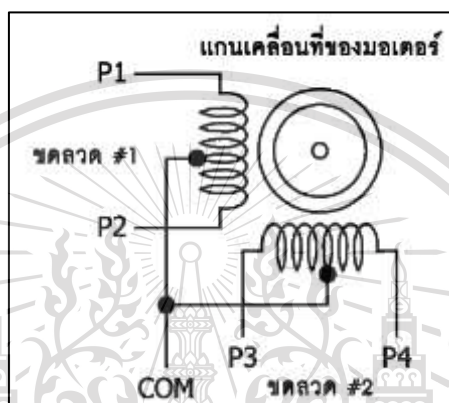
2.2.2.2 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์

มีลักษณะการพันขดลวดของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 2.8 การขับจะต้องป้อนสัญญาณเข้าที่ขั้วหรือเฟสของมอเตอร์ให้เรียงลำดับอย่างถูกต้อง มอเตอร์จึงจะสามารถหมุนได้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

อย่างราบรื่น สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้มีการพันขดลวด 2 ขดบน แต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ แต่ละขดแบ่งเป็น 2 เฟส รวมมอเตอร์ทั้งตัวจะมี 4 เฟส คือ เฟส 1, 2, 3 และ 4 มีการต่อสายออกมาจากขดลวดแต่ละขดเพื่อจ่ายไฟเลี้ยง ทำให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้มีทั้งแบบ 5 สายและ 6 สาย ถ้าเป็นแบบ 5 สาย จะเป็นการนำสายไฟเลี้ยงของขดลวดทั้งสองมาต่อรวมกันเป็นสายเดียว สำหรับในบทความนี้จะเน้นหนักไปที่สเต็ปเปอร์แบบยูนิโพลาร์นี้ เนื่องจากสามารถหาได้ง่ายกว่า และใช้วงจรขับที่มีความซับซ้อนน้อยกว่ามาก ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์
(ที่มา : <https://www.arduino2robot.com>)

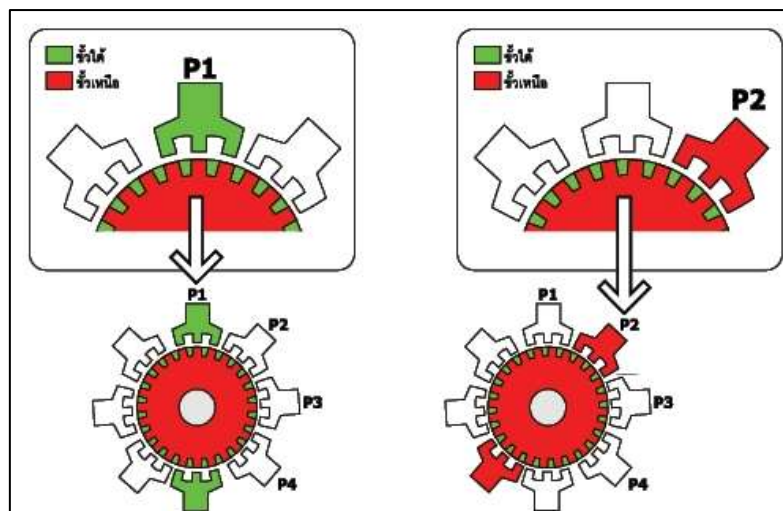
2.2.2.3 สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไฮบริด

สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไฮบริดเป็นการผสมกันระหว่างแบบ PM และ VR ในปัจจุบันนี้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ส่วนใหญ่เป็นแบบไฮบริด เนื่องจากสามารถทำให้มีความละเอียดในการเคลื่อนที่ของแกนได้สูงถึง 0.9 องศาต่อสเต็ป (ซึ่งเป็นข้อดีของแบบ VR) และให้แรงบิดหรือทอร์กที่สูง โดยใช้พลังงานต่ำ (เป็นข้อดีของแบบ PM) มีแม่เหล็กถาวรที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีขั้วเหนือและใต้สลับกันตามแนวของทรงกระบอกทำหน้าที่เป็นส่วนของโรเตอร์ ขดลวดทั้ง 4 เฟสที่พันรอบแกนเหล็กทำหน้าที่เป็นสเตเตอร์ที่มีขั้วแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณกระตุ้นที่ส่งเข้าไปในตัวมอเตอร์ ทำให้เกิดแรงดูดและแรงผลักกับโรเตอร์ทำให้แกนของมอเตอร์เกิดการหมุนและล็อกตำแหน่งได้ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ดังรูป 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.9 แสดงสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไฮบริด

(ที่มา : <https://www.arduino2robot.com>)

2.2.3 ขนาดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์มาตรฐาน

เพื่อให้การเลือกใช้งานสเต็ปเปอร์มอเตอร์เป็นสากลจึงได้มีการกำหนดมาตรฐานขนาดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ขึ้น ภายใต้ข้อตกลงร่วมกันของสมาคมผู้ผลิตชิ้นส่วนทางไฟฟ้าแห่งชาติ หรือ NEMA (National Electrical Manufacturer's Association) ได้ทำการกำหนดขนาดมาตรฐานของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ออกมา โดยแบ่งตามลักษณะรูปร่างของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ดังนี้

2.2.3.1 รูปลูกบาศก์ (Cube) มีด้วยกัน 4 ขนาดคือ NEMA 14, 15, 16 และ 17 มีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนหมุน 0.197 นิ้ว และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องแกน 0.866 นิ้ว มีจำนวน สเต็ปต่อรอบ 200 หรือ 400 (1.8 องศา/สเต็ป หรือ 0.9 องศา/สเต็ป) ดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงรูปร่างสเต็ปเปอร์มอเตอร์ขนาดรูปลูกบาศก์

(ที่มา : <https://www.arduino2robot.com>)

2.2.3.2 ทรงกระบอก (Cylinder) มีขนาดเดียวคือ NEMA 23 มีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกน

หมุน 0.25 นิ้ว และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องแกน 1.5 นิ้ว มีจำนวนสเต็ปต่อรอบ 200

(1.8 องศา/สเต็ป) และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวถังมอเตอร์ 2.2 นิ้ว ดังรูป 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.11 แสดงรูปร่างสเต็ปเปอร์มอเตอร์ขนาดรูปทรงกระบอก
(ที่มา: <https://www.arduino2robot.com>)

2.2.3.3 ทรงกระป๋อง (Stack can) สเต็ปเปอร์มอเตอร์ที่มีรูปร่างแบบนี้จะมีขนาดที่ไม่แน่นอน แต่ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กคือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นิ้ว ไม่มีร่องแกน มีจำนวนสเต็ปต่อรอบ 24 หรือ 48 สเต็ป (15 องศา/สเต็ป หรือ 7.5 องศา/สเต็ป) ดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงรูปร่างสเต็ปเปอร์มอเตอร์ขนาดรูปทรงกระป๋อง
(ที่มา: <https://www.arduino2robot.com>)

2.2.4 การควบคุมการหมุนของสเต็ปมอเตอร์

การควบคุมและสั่งงานให้สเต็ปมอเตอร์ทำงาน ไปที่สเต็ปสามารถทำได้โดยการจ่ายกำลังไฟไปยังขดลวด ในแต่ละขอบนสเตเตอร์ โดยการป้อนจะทำในลักษณะเป็นลำดับหรือเรียกว่า ซีควเอนเชียลในรูปที่ถูกต้อง ซึ่งจะแบบ ได้เป็น 3 รูปแบบ คือ แบบเวฟ(wave) แบบ 2 เฟส(2 phase) และแบบครึ่งสเต็ป (half step) ทั้ง 3 แบบนี้ก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันออกไป

2.2.4.1 ควบคุมการหมุนแบบเวฟ (wave)

จะเป็นการกระตุ้นแบบที่ง่ายที่สุด ซึ่งจะทำให้การกระตุ้นขดลวดที่ละขดในเวลาหนึ่งๆ เรียงกันไป ตัวอย่างเช่น ขดที่ 1 , 2 , 3 , 4 ,1, 2 , 3 , 4 เป็นลำดับอย่างนี้ หรือ ขด 1, 4, 3, 2, 1, 4, 3, 2 เป็นลำดับกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางที่เราต้องให้มอเตอร์หมุนไป

วงจรที่นำมากระตุ้นนั้นจะมีราคาค่อนข้างจะถูกกว่าและง่ายกว่า ดังในรูปของวงจรการจ่ายไฟ ที่อยู่ด้านบนนั้น เราสามารถเขียนขั้นตอนการทำงานออกมาได้ดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Step No.	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
1	ON			
2		ON		
3			ON	
4				ON
5	ON			
6		ON		

รูปที่ 2.13 แสดงตารางขั้นตอนการควบคุมแบบเวฟ

(ที่มา: <http://www.thaiio.com/Hardware/stepmoter.htm>)

2.2.4.2 ควบคุมการหมุนแบบ 2 เฟส

จะคล้ายกับการกระตุ้นในแบบเวฟแต่จะต่างกันตรงที่ แบบ 2 เฟส จะกระตุ้นทีละ 2 ขด ที่อยู่ใกล้กันใน เวลาเดียวกัน และจะเรียงลำดับกันไป ดังเช่นแบบเดียวกับแบบเวฟ จะยกตัวอย่างการกระตุ้นขดลวดในลักษณะ ซีควเอนให้ดูดังนี้ 12,23,34,41,12,23,34,41 เรียงลำดับกันไปเรื่อยๆ หรือจะเป็น 14,43,32,21,14,43,32,21 เรียงกันไปเรื่อยๆเช่นกัน

ข้อดี การที่เราจะเพิ่มจำนวนขดลวดที่ถูกกระตุ้นจะทำให้แรงบิดได้มากกว่า แบบเวฟ ซึ่งมอเตอร์จะหมุนด้วยแรง ดึงแบเต็มๆแรงจาก ทั้ง 2 ขดลวดที่กระตุ้นพร้อมกัน

ข้อเสีย แบบ 2 เฟส จะกระตุ้นขดลวดนั้นต้องใช้กำลังไฟมากขึ้นเป็น 2 เท่าของแบบเวฟ ก็เป็นไปตามธรรมชาติ ได้อย่างก็ต้องเสียอย่าง

เราสามารถเขียนลำดับการกระตุ้นของขดลวดแบบ 2 เฟส ได้ดังรูป 2.14

Step No.	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
1	ON	ON		
2		ON	ON	
3			ON	ON
4	ON			ON
5	ON	ON		
6		ON	ON	

รูปที่ 2.14 แสดงตารางขั้นตอนการควบคุมแบบ 2 เฟส

(ที่มา: <http://www.thaiio.com/Hardware/stepmoter.htm>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

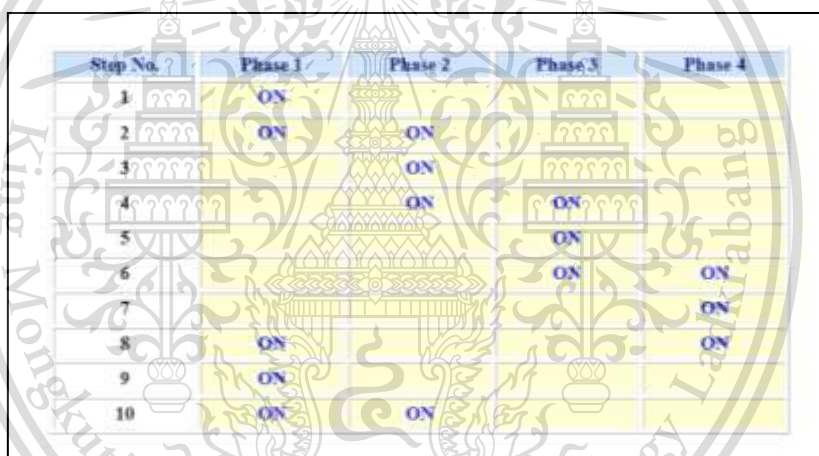
2.2.4.3 ควบคุมการหมุนแบบครึ่งสเต็ป

แบบนี้แบบรูปแบบผสมผสานของการกระตุ้นระหว่าง แบบเวฟ กับ แบบ 2 เฟส เพื่อให้จำนวนรอบของสเต็ปให้ มากขึ้นเป็น 2 เท่า ซึ่งในระบบนี้จะทำการกระตุ้นขดลวดเรียงกันไปเรื่อยๆเป็นลำดับ เช่น 1, 12, 2, 23, 3, 34, 4, 41, 1, 12, 2, 23, 3, 34, 4, 41, 1 เป็นลำดับ หรือถ้าเราจะกลับทิศทางการหมุนก็จะได้เป็นดังนี้ 1, 41, 4, 43, 3, 32, 2, 21, 1, 41, 4, 43, 3, 32, 2, 21, 1 เป็นลำดับ

ข้อดี การกระตุ้นแบบนี้จะให้แรงบิดที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากช่วงสเต็ปที่มีระยะสั้นลง อีกประการหนึ่งแต่ละ สเต็ปเกิดแรงดึงจากขดลวด 2 ขดที่ถูกกระตุ้นพร้อมกันเป็นผลให้ค่าตำแหน่งความถูกต้องมากขึ้น

ข้อเสีย จะเป็นเช่นเดียวกับแบบ 2 เฟส ที่ต้องจ่ายกำลังไฟเป็น 2 เท่าของแบบเวฟ หรือจะใช้เท่ากับแบบ 2 เฟส

ดังนั้นเราสามารถนำลำดับการทำงานของ แบบครึ่งเฟส ในรูปที่ 2.15 ดังนี้



Step No.	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
1	ON			
2	ON	ON		
3		ON		
4		ON	ON	
5			ON	ON
6			ON	ON
7			ON	ON
8	ON			ON
9	ON			ON
10	ON	ON		

รูปที่ 2.15 แสดงตารางขั้นตอนการควบคุมครึ่งสเต็ป

(ที่มา: <http://www.thaiio.com/Hardware/stepmotor.htm>)

2.3 Raspberry Pi

Raspberry Pi เป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่จัดอยู่ในกลุ่มคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว (Embedded Computer) พัฒนาขึ้นโดยมูลนิธิ Raspberry Pi ซึ่งเป็นองค์กรการกุศลของสหราชอาณาจักร ที่ทำงานเพื่อนำพลังด้านดิจิทัลเข้าสู่ผู้ใช้งานทั่วโลก ดังนั้นผู้ใช้งานสามารถทำความเข้าใจและสร้างโลกดิจิทัลเพิ่มขึ้นได้โดยง่าย สามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่สำคัญได้และเตรียมพร้อมสำหรับงานในอนาคต ซึ่ง Raspberry Pi เป็นคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ราคาประหยัด และมีประสิทธิภาพสูงที่ผู้คน

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อใช้ในการเรียนรู้และการแก้ปัญหาและได้รับความสนุกสนานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้โดย Raspberry Pi มีระบบปฏิบัติการที่เป็นที่นิยมคือ Raspbian ที่พัฒนาต่อมาจาก Debian

เป็น Distro ของตัวหนึ่งของ Linux OS และมี Python IDE สำหรับพัฒนาโปรแกรมภาษา Python

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ให้เลย และอีกมากมายเยอะมาก ๆ มี Liber Office ติดตั้งมาด้วยเลยนะ (ใครจะพิมพ์งานอะไร มีมาพร้อม) โดย Raspberry Pi มีความสามารถมากมายแล้วแต่ผู้ใช้สุดแต่ใจจะจินตนาการสรรค์สร้างได้ เนื่องด้วยประสิทธิภาพที่สูงเมื่อเทียบกับขนาด จึงเป็นที่นิยมในวงการพัฒนาหุ่นยนต์ และความสามารถที่เหมือน PC แต่มีขนาดเล็ก จึงมีคนมากมายนำไปเป็น Web Server, Database Server

Raspberry Pi ได้รับการเผยแพร่หลายรุ่นแล้ว ทุกุ่นมีชิพ Broadcom เป็นหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และหน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) ในตัว มีความเร็วตั้งแต่ 700MHz ถึง 1.4GHz (1.4GHz สำหรับ Raspberry Pi 3 รุ่น B+ โดยมี RAM ตั้งแต่ 256MB ถึง 1GB มีการ์ด Secure Digital (SD) ใช้เพื่อจัดเก็บระบบปฏิบัติการและหน่วยความจำ ในขนาด SDHC หรือ MicroSDHC บอร์ดมีพอร์ต USB ตั้งแต่ 1 ถึง 4 พอร์ต มีเอาต์พุตวิดีโอ HDMI และวิดีโอคอมโพสิต โดยมีแจ็คขนาด 3.5 มม. สำหรับเอาต์พุตเสียง และ GPIO จำนวนหนึ่งซึ่งสนับสนุนโปรโตคอลทั่วไป เช่น I2C อีกทั้งในรุ่น B มีพอร์ต Ethernet และ Raspberry Pi Zero W มี Wi-Fi 802.11n และ Bluetooth ที่ติดตั้งอยู่ในตัว

2.3.1 หน่วยประมวลผล (Processor)

ในรุ่นแรก Raspberry Pi 1 Model B ได้รับการปล่อยตัวเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ ปี 2012 ตามมาด้วยรุ่น A ที่เรียบง่ายและราคาถูกกว่าในปี 2014 ต่อมามูลนิธิเปิดตัวบอร์ดที่มีการออกแบบที่ดีขึ้นในรุ่น Raspberry Pi 1 Model B+ โดยมีขนาดโดยประมาณเท่าบัตรเครดิต จากนั้นในอีกหนึ่งปีต่อมาได้มีการปรับปรุงใหม่ในโมเดล A+ และ B+ และ Raspberry Pi 2 ได้รับการปล่อยตัวในเดือนกุมภาพันธ์ปี 2015

Raspberry Pi Zero ที่มีขนาดเล็กลงและมี (GPIO) ลดลง ได้รับการเปิดตัวในเดือนพฤศจิกายน 2015 ต่อมาได้มี Pi ต่อมาอีกรุ่นใหม่ล่าสุดใน 28 กุมภาพันธ์ 2017 ในชื่อเดิม จากนั้นมีรุ่น Wi-Fi และบลูทูธ ในวันที่ 12 มกราคม 2018

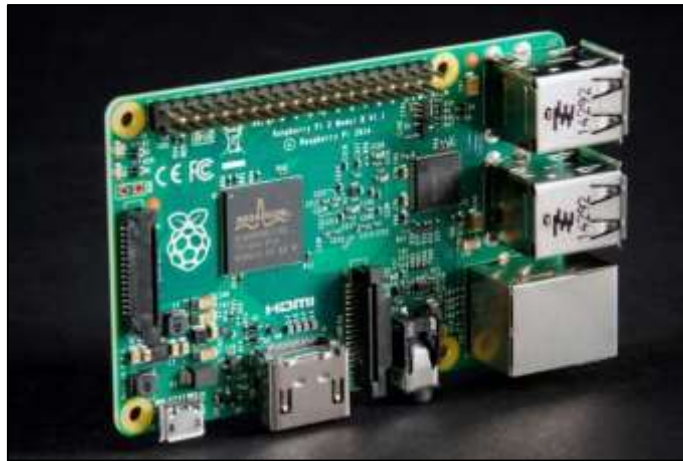
Raspberry Pi 3 Model B ได้รับการปล่อยตัวในเดือนกุมภาพันธ์ปี 2017 ด้วยโปรเซสเซอร์ Quad-Core 64 บิตและมี WiFi on-board, Bluetooth และ USB boot ได้ และล่าสุดเมื่อ 2018 ได้เปิดตัวรุ่น 3 B+ พร้อมกับโปรเซสเซอร์ความเร็ว 1.4GHz ใช้เครือข่ายความเร็วสูงขึ้น 3 เท่า มี gigabit (300 Mbit/s) หรือ 2.4/5GHz dual-band Wi-Fi (100 Mbit/s)

ตัวเลือกอื่น ๆ ได้แก่ Power over Ethernet (PoE) บูต USB และการบูตระบบเครือข่าย (การ์ด SD ไม่จำเป็นต้องใช้อีกต่อไป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

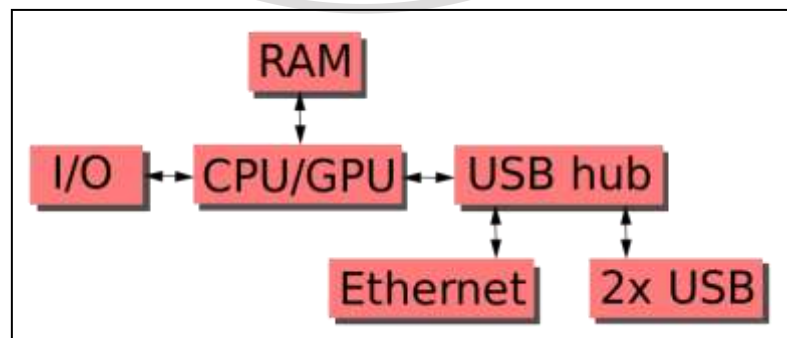


รูปที่ 2.16 แสดงรายละเอียดของ Raspberry Pi 2 Model B
(ที่มา : <https://www.arduino-makerzone.com/article/57/>)

องค์กรที่อยู่เบื้องหลัง Raspberry Pi ประกอบด้วยสององค์กร โดยในบอร์ดสองรุ่นแรกได้รับการพัฒนาโดย Raspberry Pi Foundation หลังจากที่ได้รับการเผยแพร่ Pi Model B แล้วมูลนิธิฯ ได้จัดตั้ง Raspberry Pi Trading ขึ้นโดยมี Eben Upton เป็น CEO เพื่อพัฒนารุ่น 3 B+ โดย Raspberry Pi Trading มีส่วนรับผิดชอบในการพัฒนาเทคโนโลยี ในขณะที่มูลนิธิเป็นองค์กรการกุศลด้านการศึกษาเพื่อส่งเสริมการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ขั้นพื้นฐานในโรงเรียนและในประเทศกำลังพัฒนา มูลนิธิแจกจ่าย Raspbian ลินุกซ์ที่พัฒนาจาก Debian เพื่อดาวน์โหลดรวมทั้งที่ได้รับการสนับสนุนจากแหล่งอื่น ได้แก่ Ubuntu, Windows 10 IoT Core, RISC OS สนับสนุนภาษา Python และ Scratch เป็นหลัก และการสนับสนุนภาษาอื่น ๆ อีกมากมาย

2.3.2 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

ฮาร์ดแวร์ Raspberry Pi ได้พัฒนาขึ้นผ่านมาแล้วหลายรุ่น ซึ่งมีรูปแบบการทำงานโดยรวมคล้ายคลึงกันอธิบายได้โดยแผนภาพ ดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงแผนภาพการทำงานโดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยัง (ที่มา : <https://www.arduino-makerzone.com/article/57/>)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แผนภาพบล็อกนี้อธิบายถึงโมเดล B และ B+ รุ่น A, A+ และ Raspberry Pi Zero ซึ่งมีลักษณะคล้ายกัน แต่ไม่มีส่วนประกอบของ Ethernet และ USB Hub โดย Ethernet เชื่อมต่อภายในกับพอร์ต USB เพิ่มเติม ส่วนในรุ่น A, A+ และ Raspberry Pi Zero พอร์ต USB จะเชื่อมต่อโดยตรงกับระบบบนชิพ (SoC) และสำหรับรุ่น Pi 1 รุ่น B+ และรุ่นที่ใหม่กว่ามีชิพ USB/Ethernet มี USB Hub อยู่ 5 จุดซึ่งมี 4 พอร์ตในขณะที่ Pi 1 รุ่น B มีให้เฉพาะ 2 จุดเท่านั้น บน Raspberry Pi Zero พอร์ต USB จะเชื่อมต่อโดยตรงกับ SoC แต่จะใช้พอร์ต USB ขนาดเล็ก (OTG)

2.3.3 หน่วยประมวลผล

Broadcom BCM2835 ที่ใช้ใน Raspberry Pi รุ่นแรก ดังในรูปที่ 2.14 ก่อนข้างเทียบเท่ากับชิพที่ใช้ในสมาร์ทโฟนรุ่นแรก (CPU เป็นสถาปัตยกรรม ARMv6) ซึ่งรวมถึงโปรเซสเซอร์ ARM1176JZF-S 700MHz, หน่วยประมวลผลกราฟิก VideoCore IV (GPU) และแรมมีแคช L1 ขนาด 16 KB และแคช L2 ขนาด 128 KB แคช L2 จะใช้ GPU เป็นหลัก SoC ถูกจัดเรียงซ้อนกันอยู่ใต้ชิปแรมเพื่อให้สามารถมองเห็นขอบได้เท่านั้น



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะของ Broadcom BCM2835

(ที่มา : <https://www.arduino-makerzone.com/article/57/>)

Raspberry Pi รุ่น 2 ได้ใช้ Broadcom BCM2836 กับโปรเซสเซอร์ Quad-Core ARM Cortex-A7 900MHz ขนาด 32 บิตพร้อมด้วยแคช L2 ที่ใช้ร่วมกันขนาด 256 กิโลไบต์ Raspberry Pi 2 V1.2 ได้รับการอัปเกรดเป็น Broadcom BCM2837 ด้วยโปรเซสเซอร์ Quad-Core ARM Cortex-A53 แบบ 64 บิต ความเร็ว 1.2GHz แบบเดียวกันที่ใช้กับ Raspberry Pi 3 แต่มี underclocked ไปที่ ความเร็วของสัญญาณนาฬิกา CPU 900MHz เหมือนกันกับ V1.1 โดย BCM2836 ยุติการผลิตปลายปี 2016 Raspberry Pi 3+ ใช้ Broadcom BCM2837B0 กับโปรเซสเซอร์ Quad-Core ARM Cortex-A53 ขนาด 64 บิตความเร็ว 1.4GHz พร้อมแคช L2 ที่ใช้ร่วมกันขนาด 512 กิโลไบต์

2.3.4 ประสิทธิภาพ

Raspberry Pi 3 กับ quad-core ARM Cortex-A53 processor มีการอธิบายถึงประสิทธิภาพว่าสูงมากกว่า Raspberry Pi 1 ถึง 10 เท่า ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้แรงงาน และ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การใช้ชุดคำสั่ง Benchmarks โดยรวมแล้ว Raspberry Pi 3 จะเร็วกว่า Raspberry Pi 2 ถึง 80% ในงานแบบ Parallelised (การประมวลผลการทำงานแบบขนาน)



รูปที่ 2.19 แสดงรายละเอียดของ Raspberry Pi 3 Model B
(ที่มา : <https://www.arduino-makerzone.com/article/57/>)

Raspberry Pi 2 V1.1 รวมเอา quad-core Cortex-A7 CPU ที่ความเร็ว 900 MHz และ RAM ขนาด 1GB มันถูกอธิบายว่ามีประสิทธิภาพขึ้นกว่ารุ่นก่อน ในการเปรียบเทียบแบบขนานเร็วกว่า Raspberry Pi 1 รุ่น B+ ถึง 14 เท่า

Raspberry Pi รุ่นแรกให้ประสิทธิภาพ 700MHz หรือประมาณ 0.041 GFLOPS ในระดับซีพียูประสิทธิภาพจะคล้ายคลึงกับ Pentium II 300MHz ในปี พ. ศ. 1999 และ GPU ให้การประมวลผลกราฟิก 1 Gpixel/s หรือ 1.5 Gpixel/s หรือ 24 GFLOPS

สำหรับประสิทธิภาพการทำงานโดยทั่วไป ความสามารถด้านกราฟิกของ Raspberry Pi ไกล่เคียงกับประสิทธิภาพของ Xbox ของปี 2001

2.3.5 การโอเวอร์คล็อก

ชิพของ Raspberry Pi ส่วนใหญ่สามารถโอเวอร์คล็อกได้ถึง 800MHz และบางส่วนถึง 1000MHz มีรายงานว่า Raspberry Pi 2 สามารถโอเวอร์คล็อกได้สูงถึง 1500MHz (ซึ่งคุณสมบัติด้านความปลอดภัยและข้อจำกัดแรงดันไฟฟ้าเกิน) ในตัวเลือก Raspbian Linux distro ตัวเลือกการโอเวอร์คล็อกในการ Boot สามารถทำได้โดยคำสั่งซอฟต์แวร์ "sudo raspi-config" และ Raspberry Pi จะปิดการโอเวอร์คล็อกโดยอัตโนมัติหากชิพมีอุณหภูมิถึง 85 องศาเซลเซียส (185 องศาฟาเรนไฮต์) แต่สามารถแทนที่การตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าและโอเวอร์คล็อกอัตโนมัติได้ จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนที่เหมาะสมเพื่อป้องกันชิพจากความร้อนที่สูงเกินไป

เฟิร์มแวร์เวอร์ชันใหม่มีตัวเลือกในการเลือกโอเวอร์คล็อก ("เทอร์โบ") จำนวน 5 ชุด ซึ่งเมื่อใช้แล้ว Pi จะพยายามเพิ่มประสิทธิภาพของ SoC โดยไม่ทำให้อายุการใช้งานของบอร์ดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหลัง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

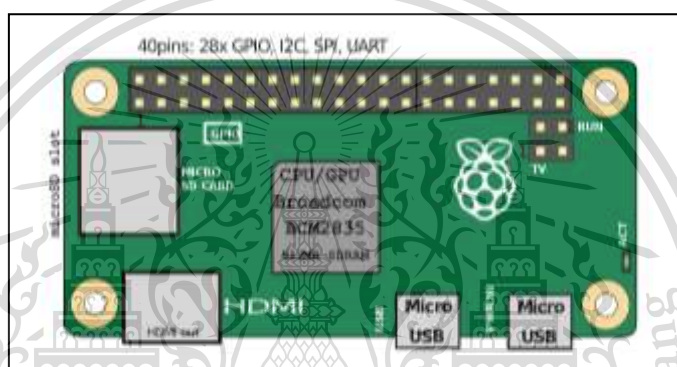
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แรงดันไฟฟ้าหลัก หากความต้องการอยู่ในระดับต่ำบน CPU หรือมีการทำงานที่ร้อนเกินไป ประสิทธิภาพจะถูกควบคุม แต่ถ้า CPU มีมากพอที่จะทำและอุณหภูมิของชิปเป็นที่ยอมรับได้ ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นชั่วคราว ด้วยความเร็วนาฬิกาที่สูงถึง 1GHz ขึ้นอยู่กับแต่ละ Board และใช้การตั้งค่าเทอร์โบ

ซีพียูรุ่นแรกและรุ่นที่สองของ Raspberry Pi ไม่ต้องการระบายความร้อน เช่น ฮีทซิงค์ หรือพัดลมแม้ในกรณีที่โอเวอร์คล็อก แต่ Raspberry Pi 3 อาจสร้างความร้อนขึ้นเมื่อโอเวอร์คล็อกได้

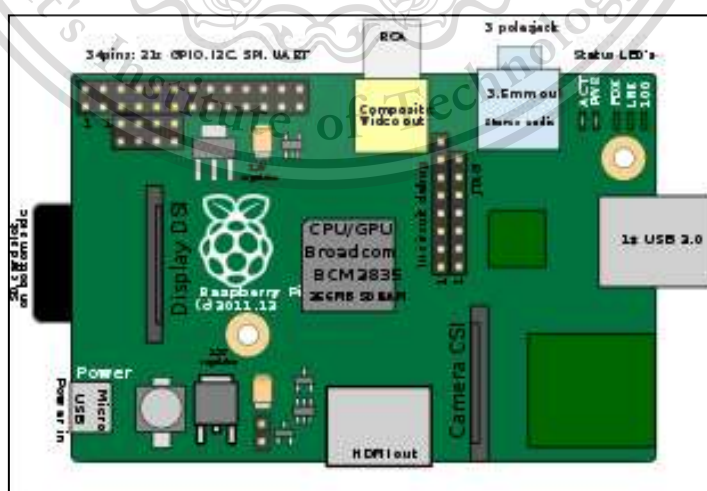
2.2.6 การเชื่อมต่อ

Pi Zero



รูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งของตัวเชื่อมต่อและ IC หลักบน Raspberry Pi Zero
(ที่มา : <https://www.arduino-makerzone.com/article/57/>)

Model A

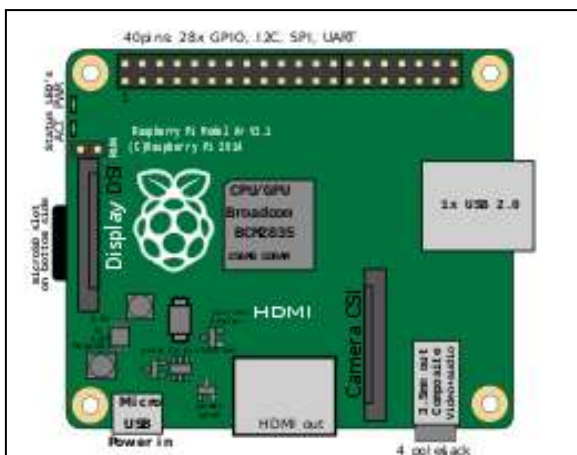


รูปที่ 2.21 แสดงตำแหน่งของตัวเชื่อมต่อและ IC หลักบน Raspberry Pi 1 รุ่น A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
(ที่มา : <https://www.arduino-makerzone.com/article/57/>)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

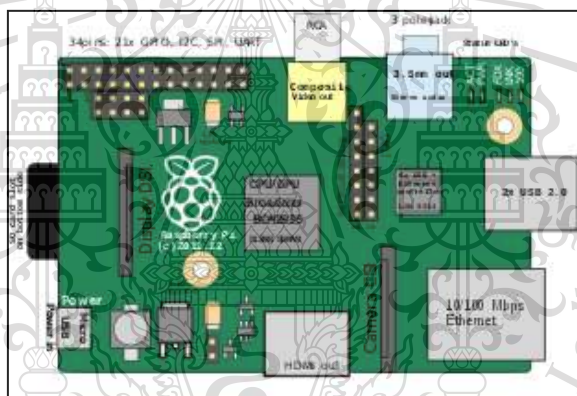
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

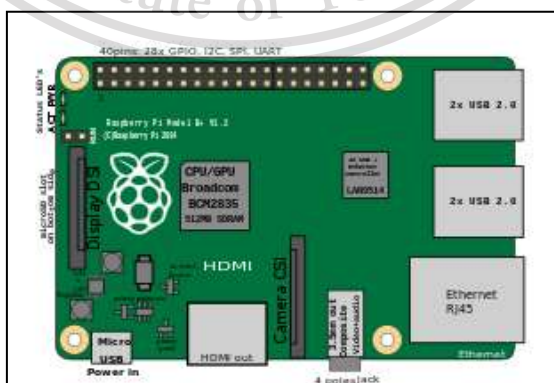


รูปที่ 2.22 แสดงตำแหน่งของตัวเชื่อมต่อและ IC หลักบน Raspberry Pi 1 รุ่น A + revision 1.1
(ที่มา : <https://www.arduino-makerzone.com/article/57/>)

Model B



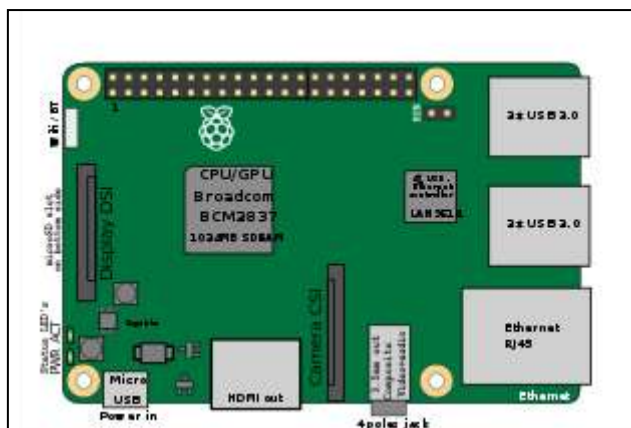
รูปที่ 2.23 แสดงตำแหน่งของตัวเชื่อมต่อและ IC หลักบน Raspberry Pi 1 รุ่น B แก้ไข 1.2
(ที่มา : <https://www.arduino-makerzone.com/article/57/>)



รูปที่ 2.24 แสดงตำแหน่งของตัวเชื่อมต่อและ IC หลักบน Raspberry Pi 1 รุ่น B + revision 1.2
(ที่มา : <https://www.arduino-makerzone.com/article/57/>)

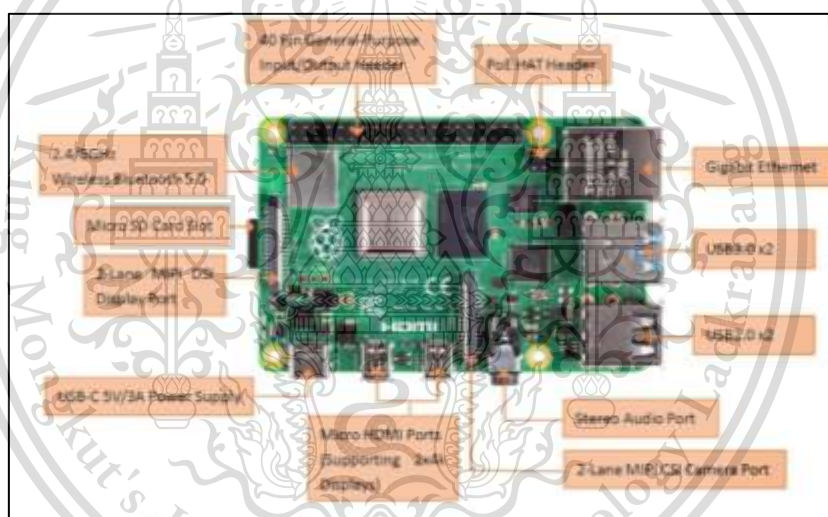
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.25 แสดงตำแหน่งของตัวเชื่อมต่อและ IC หลักบน Raspberry Pi 3
(ที่มา : <https://www.arduino-makerzone.com/article/57/>)

2.3.7 Raspberry Pi 4 Model B 4 GB



รูปที่ 2.26 แสดงรายละเอียดของ Raspberry Pi 4 Model B 4GB
(ที่มา : <https://www.arduinoall.com/product/3472/raspberry-pi-4-model-b-4gb>)

จากรูปที่ 2.26 จะเห็นว่า Raspberry Pi 4 Model B 1GB ซึ่งคือตัวที่ได้นำมาใช้ในการทำโครงงานครั้งนี้ มีคุณสมบัติ ดังนี้

- ใช้ชิพ Broadcom BCM2711 แบบ Quad-Core ARM Cortex-A72
- ทำงานที่ความเร็ว 1.5GHz
- หน่วยความจำแบบ LPDDR4-2400 ขนาด 4GB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดที่ละเมิดและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่องต่อ LAN แบบ Gigabit Ethernet

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- พอร์ต USB 3.0 Type A 2 ช่อง
- พอร์ต USB 2.0 Type A 2 ช่อง
- พอร์ต Micro-HDMI 2 ช่อง
- รองรับการเชื่อมต่อจอแบบ 4K 60P
- Raspberry Pi 4 RAM ขนาด 4 GB

Raspberry Pi สามารถเชื่อมต่อระบบเครือข่ายแบบใช้สายหรือไร้สายได้ ทำให้กลายเป็นอุปกรณ์ Internet of Things(IoTs) โดยสมบูรณ์ ช่วยให้นักวิจัยและผู้สนใจอื่น ๆ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเชื่อมต่อกับตัวตรวจจับ (Sensor) ในการเก็บข้อมูลตามต้องการ รวมถึงสามารถเชื่อมต่อกับแป้นพิมพ์และเมาส์ได้ง่ายอีกด้วย โดยระบบปฏิบัติการที่ใช้นั้น คือ Raspbian ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการลินุกซ์เป็นฐานถูกปรับแต่งมาใช้กับ Raspberry Pi โดยเฉพาะ และระบบปฏิบัติการ ติดตั้งผ่าน Micro SD Card สามารถตั้งค่าเป็นเครื่องแม่ข่ายและใช้งานบริการต่าง ๆ เช่น Web Server, FTP Server ได้ เป็นต้น

ในการเขียนโปรแกรมควบคุม Raspberry Pi เราสามารถใช้ภาษา Python เพื่อแก้โจทย์ปัญหาหรือ ใช้ในการควบคุมการทำงานตัวตรวจจับ (Sensor) ที่มาเชื่อมต่อผ่าน GPIO นอกจากนี้ความสามารถด้านการเขียนโปรแกรมภาษา Python, โปรแกรม Scratch แล้ว สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบของโครงงานต่างๆ ได้เหมือน บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทั่วไป โดยสามารถสร้างสิ่งประดิษฐ์ให้อุปกรณ์เดิมและมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น ระบบเปิด/ปิดไฟอัตโนมัติ, อุปกรณ์วัดความเอียง, ระบบตรวจสอบอุณหภูมิห้องแบบเรียลไทม์ รถยนต์บังคับสำหรับงานด้านต่างๆ, กังหันลม, เครื่องชั่ง, ระบบควบคุมไฟจราจร, ระบบวัดระยะทาง, ระบบแจ้งเตือนต่างๆ , ระบบวัดความเข้มแสง, เครื่องนับแต้ม, ระบบจัดเก็บข้อมูลจากตัวตรวจจับต่างๆ ลงฐานข้อมูล MySQL เป็นต้น แต่จำเป็นต้องมีการซื้อตัวตรวจจับ (Sensor) เพิ่มเติมเหมือนกับการใช้งานด้วย Arduino Platform

แต่ Raspberry Pi นั้นไม่มีความสามารถในการรับค่าแบบ Analog โดยตรง (รับได้เฉพาะ Digital In/Out) ซึ่งไม่เหมือนกับ Arduino Board ซึ่งรับค่าได้ทั้งแบบ Digital และ Analog

ดังนั้นเมื่อต้องการนำข้อมูลแบบ Analog เข้าไปประมวลผลต่อใน Raspberry Pi จึงต้องใช้ Analog to Digital Converter และ ส่งข้อมูลผ่านเข้าไปใน Raspberry Pi โดยใช้ Protocol SPI หรือ I2C

2.4 เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder)

เป็นเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ในการเข้ารหัส จากระยะทางจากการหมุนรอบตัวเอง และแปลงออกมาเป็นรหัสในรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้า โดยเราสามารถนำเอารหัสเหล่านี้มาแปลงกลับเพื่อหาค่าต่างๆที่เราต้องการได้ ไม่ว่าจะเป็นระยะทางการหมุน องศาการเคลื่อนที่ หรือ ความเร็วรอบก็ได้ แล้วนำมาแสดงผลให้เราได้ทราบค่าผ่านหน้าจอแสดงผล โดยการประยุกต์ใช้เอ็นโค้ดเดอร์นั้น

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น กระบวนการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเคมีคอนดักเตอร์ เครื่องมือวัดต่างๆ เช่น ในการวัดความยาว หรือ อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ เป็นต้น

ส่วนการแสดงผลเป็นความเร็วรอบของ RPM, RPS โดยอาศัยสัญญาณที่ผ่านการเข้ารหัสแล้วออกมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้านั้น สามารถแบ่งรูปแบบของการเข้ารหัสได้อีกหลากหลายรูปแบบ เช่น สัญญาณดิจิตอล ศูนย์กับหนึ่ง ธรรมดา หรือ เป็นแบบ Binary Code, BCD Code, Gray Code

2.4.1 การแบ่งประเภทของเอ็นโค้ดเดอร์

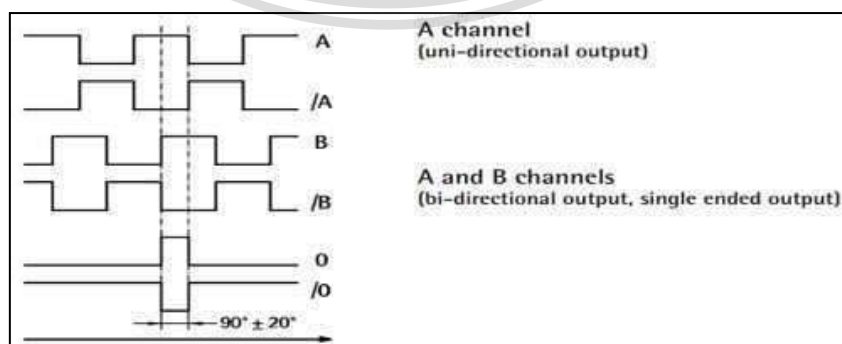
เราสามารถแบ่งประเภทของเอ็นโค้ดเดอร์ได้หลายแบบ โดยขึ้นอยู่กับว่าเราจะยึดเกณฑ์ใดเพื่อใช้ในการแบ่ง ดังนี้

2.4.1.1 การแบ่งจากโครงสร้างการใช้งาน

สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้ดังนี้

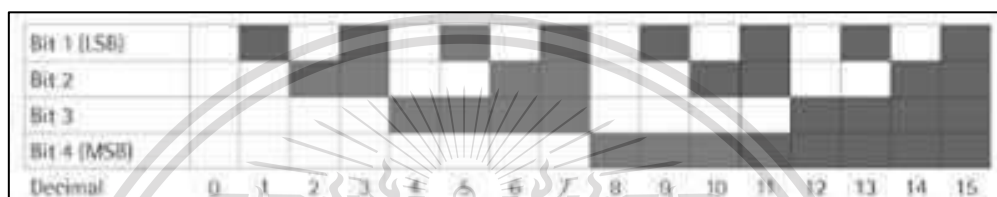
1) Incremental Rotary Encoder เป็นเอ็นโค้ดเดอร์ที่รูปแบบสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาเป็นลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่เป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งจะไม่เหมือนกับไซน์เวฟ โดยจำนวนพัลส์ที่ออกมานั้น จะมีความสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่ ตำแหน่ง ระยะทาง ความเร็ว และ ความเร่ง นอกจากนี้ยังสามารถระบุได้ถึงทิศทางการหมุนของตัวเอ็นโค้ดเดอร์ได้ว่าจะ หมุน ตามเข็มนาฬิกา หรือ ทวนเข็มนาฬิกา โดยอาศัยการตรวจจับทิศทางการหมุนจากมุมเฟสของสัญญาณเอาต์พุต A กับ B ว่าสัญญาณใดเกิดก่อนกัน ซึ่งจะมีมุมเฟสที่ต่างกันอยู่ 90 องศา

เอ็นโค้ดเดอร์แบบนี้ มีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถจดจำตำแหน่งแกนหมุนของตัวเองได้ ว่าอยู่ที่จุดใด ด้วยเหตุนี้การหมุนกลับไปยังตำแหน่งเริ่มต้น Homing Point นั้นจะทำได้ยาก จึงต้องอาศัยการเก็บข้อมูลพัลส์ตั้งแต่เริ่มต้น เพื่อหาค่าตำแหน่ง ซึ่งในบางครั้งอาจจะอ้างอิงจากจุด Zero Point ซึ่งจะสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นทุกการหมุน 1 รอบ แล้วค่อยดูว่าหมุนไปทิศทางใด ระยะทางเท่าไร จากจุดนี้

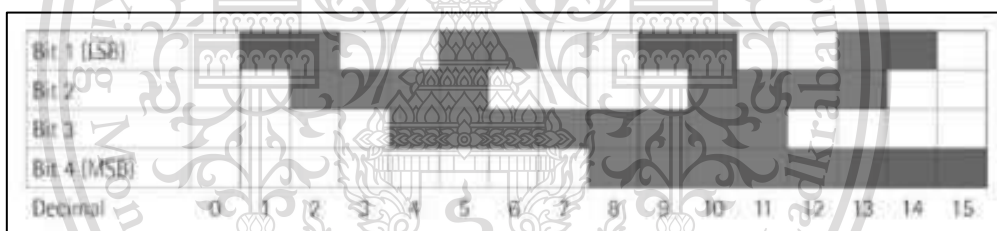


รูปที่ 2.27 แสดงสัญญาณพัลส์ที่เกิดจาก Incremental Rotary Encoder

2) Absolute Rotary Encoder เป็นเอ็นโค้ดเดอร์ที่ออกแบบมาให้มีรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นลักษณะของการเข้ารหัส เพื่อต้องการแก้ปัญหาของ Incremental Encoder เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตของ Incremental Encoder ไม่สามารถระบุตำแหน่งพัลส์กับตำแหน่งองศาของแกนเอ็นโค้ดเดอร์ได้ จึงแก้ปัญหาโดยการใช้ Absolute Rotary Encoder ซึ่งจะเข้ารหัสแทนสัญญาณพัลส์ โดยรหัสก็จะมีรูปแบบ เช่น BCD, Binary, Gray Code ซึ่งจะสามารถแทนค่าตำแหน่งองศาที่แกนของเอ็นโค้ดเดอร์หยุดอยู่ได้ และมีการแสดงสัญญาณเอาต์พุตแบบรหัส Binary ดังรูป 2.28 และแบบ Gray code ดังรูป 2.29



รูปที่ 2.28 แสดงสัญญาณเอาต์พุตแบบรหัส Binary จำนวน 4 บิต ของ Absolute Encoder
(ที่มา : <https://mall.factomart.com/type-of-rotary-encoder/>)



รูปที่ 2.29 แสดงสัญญาณเอาต์พุตแบบรหัส Gray จำนวน 4 บิต ของ Absolute Encoder
(ที่มา : <https://mall.factomart.com/type-of-rotary-encoder/>)

2.4.1.2 การแบ่งตามโครงสร้างของเอ็นโค้ดเดอร์ จะแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะได้ดังนี้

1) Rotary Optical Encoder เป็นเซ็นเซอร์แบบพื้นฐานที่ถูกรออกแบบมาใช้งานตั้งแต่เริ่มต้น โดยใช้หลักของ Optical Sensing ร่วมกับ Code Disk และใช้ตัว Scanning reticle ซึ่งจะเป็นตัวช่วยบังคับแสงให้ไปตรงที่ตัวรับแสง หรือ Phototransistor ได้อย่างแม่นยำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของเอ็นโค้ดเดอร์แบบนี้ สามารถที่จะสร้างความละเอียดได้สูงถึง 18000 พัลส์ต่อรอบ Pulse/Revolution หรือเราสามารถคำนวณออกมาเป็นองศาได้โดยใช้สมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

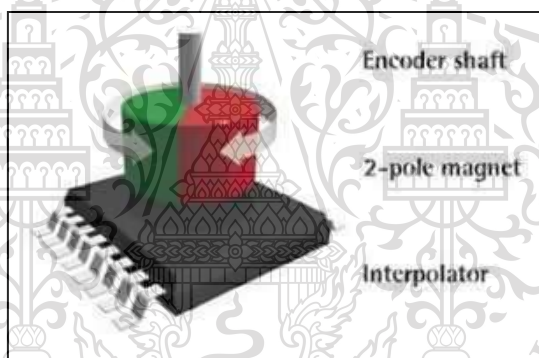
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\text{Resolution ()} = 360 \text{Pulse Per Revolution (PPR)} \quad (2.31)$$

$$\text{Resolution (0.02)} = 360(18000(\text{PPR})) \quad (2.32)$$

2) Rotary Magnetic Encoder จะมีความสามารถในการใช้งานที่สูงกว่า และทนต่อแรงสั่นสะเทือนได้ดีกว่าแบบ Code Disk จึงเป็นการยืดอายุการใช้งานของ Encoder ได้ยาวนานมากยิ่งขึ้น ซึ่งหลักการทำงานของตัว Magnetic Encoder นั้นจะใช้ Magnetic Code Ring ที่เป็นตัวหมุน และใช้เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับ Code จากสนามแม่เหล็ก โดยเซ็นเซอร์ที่ว่ามีอยู่ 2 แบบ คือ Magneto-Resistance (MR) และ IC Sensor โดยเซ็นเซอร์ทั้ง 2 รูปแบบนี้ เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน จะมีการแยกแยะระหว่างขั้วเหนือและขั้วใต้ ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ Hall Effect จากปรากฏการณ์นี้จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่เป็นแบบ Sine Wave ออกมา ต่อจากนั้นจะมีการใช้กระบวนการแปลงสัญญาณจากสัญญาณ Analog to Digital A/D เพื่อนำเอาสัญญาณดิจิทัลเหล่านี้ไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.30 แสดงโครงสร้างของ Magnetic Code Ring และ IC Sensor

(ที่มา : <https://mall.factomart.com/type-of-rotary-encoder/>)

2.3.1.3 การแบ่งแบบ Special Rotary Encoder

เป็นประเภทพิเศษที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานที่มีลักษณะเฉพาะ โดยมีรายละเอียดดังนี้

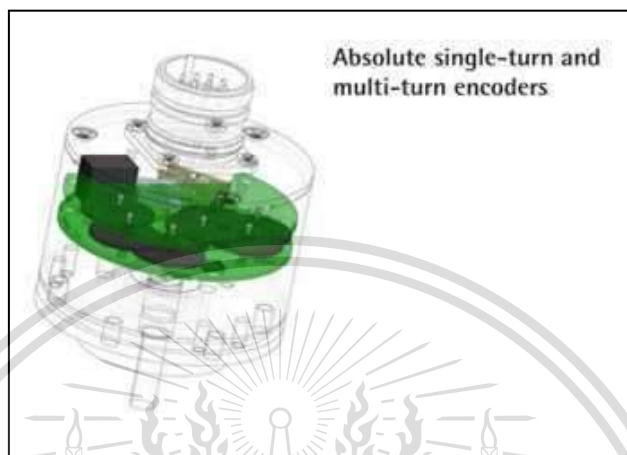
1) Programmable Pulse Rotary Encoder เป็น Encoder ชนิดพิเศษที่สามารถตั้งค่าของจำนวนพัลส์ต่อรอบหรือ Pulse Per Revolution ได้ ซึ่งในปัจจุบันมียี่ห้อ LIKA รุ่น IQ58, CKQ58 ที่สามารถป้อนโปรแกรมเพื่อกำหนดจำนวนพัลส์ที่ต้องการใช้งานได้ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการใช้งานและการทำรายการอะไหล่

2) Multi-turn Rotary Encoder เป็น Absolute Rotary Encoder ชนิดหนึ่งที่ถูกออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหา Single-turn Absolute Rotary Encoder ที่ไม่สามารถจดจำในส่วนของจำนวนรอบที่หมุนได้ เนื่องจากตัวรหัสออกแบบมาให้ไม่ซ้ำกันได้แค่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งเมื่อมีการนำไปใช้
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หนึ่งรอบเท่านั้น ทำให้มีขีดจำกัดในเรื่องของความละเอียด แต่สำหรับ Multi-turn Rotary Encoder จะมีการเพิ่มวงจรรับจำนวนไว้ภายในตัว ซึ่งจะทำให้สามารถรู้ได้ว่า ตัว Encoder หมุนไปกี่รอบแล้ว นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มความละเอียดในการใช้งานได้ด้วย



รูปที่ 2.31 แสดงโครงสร้างของ Multi-turn Rotary Encoder

(ที่มา : <https://mall.factomart.com/type-of-rotary-encoder/>)

จากข้อมูลทั้งหมดนั้น สามารถแบ่งประเภทของ Rotary Encoder แบบพื้นฐาน ได้ดังนี้ การแบ่งจากโครงสร้างการใช้งาน การแบ่งตามโครงสร้างของโรตารี เอ็นโค้ดเดอร์ และการแบ่งแบบ Special Rotary Encoder

โดยทั้ง 3 ลักษณะการแบ่งนั้นก็จะมียละเอียดข้อมูลที่แตกต่างกันออกไป โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับท่านผู้อ่านว่าการแบ่งแบบใดนั้น ที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในเลือกกลุ่มสินค้าเอ็นโค้ดเดอร์ตามจุดประสงค์ของท่านที่ต้องการ โดยความรู้ในส่วนคือส่วนที่จะช่วยเพิ่มความเข้าใจและทำให้เราได้ว่าเอ็นโค้ดเดอร์ คืออะไร? ซึ่งจะส่งผลให้เรามีข้อมูลในการตัดสินใจเลือกใช้ประเภทของ Encoder ได้ถูกต้อง

2.4.2 อุปกรณ์เสริมสำหรับเอ็นโค้ดเดอร์ Encoder

ในการใช้งานตัว โรตารี เอ็นโค้ดเดอร์ ให้ได้ประสิทธิภาพ และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานนั้น นอกจากจะคำนึงถึงวิธีการติดตั้งที่เหมาะสม หรือ การเลือกใช้งานตัวเอ็นโค้ดเดอร์ให้ตรงกับการใช้งานแล้ว ยังจำเป็นต้องเลือกอุปกรณ์เสริม ดังภาพที่ 2.30 ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อช่วยให้การใช้งาน และการติดตั้งเป็นไปตามที่ต้องการซึ่งจะมีรายละเอียดต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.32 แสดงอุปกรณ์เสริมที่ช่วยในการติดตั้ง และใช้งานตัว Rotary Encoder ให้มีประสิทธิภาพ
(ที่มา : <https://mall.factomart.com/accessories-of-rotary-encoder/>)

2.4.2.1 Encoder Cable

เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณไปยังตัวคอนโทรลเลอร์ต่างๆ โดยในการเลือกใช้นั้น จำเป็นต้องเลือกสายนำสัญญาณที่มีคุณภาพ และสามารถป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้นั้น เราจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกใช้สายนำสัญญาณที่มีชีลล์หุ้ม และ จะนิยมใช้สายที่ดี เกลียวภายในเพื่อลดการเกิดค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า นอกจากนี้ชนิดของสายนำสัญญาณก็มีส่วนสำคัญ เนื่องจากในการติดตั้งอาจมีสภาพแวดล้อมที่มีน้ำมัน จำเป็นต้องใช้สายนำสัญญาณที่สามารถทนต่อน้ำมันได้ เช่น สายนำสัญญาณที่หุ้มฉนวนด้วย TPU (Thermoelectric Polyurethan)

2.4.2.2 Encoder Connector

จะช่วยให้เรื่องของความสะดวกในการติดตั้งใช้งาน และการซ่อมบำรุง เนื่องจาก การเปลี่ยนเอ็นโค้ดเดอร์นั้นจำเป็นต้องถอดสายนำสัญญาณออก คงไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะปลดสายนำสัญญาณที่มีจำนวนมาก เช่น สายเอ็นโค้ดเดอร์ แบบ Absolute Parallel ซึ่ง ถ้าวัดสายนำสัญญาณกลับเข้าผิด ย่อมทำให้ค่าที่อ่านออกมาได้ผิดพลาดอย่างแน่นอน จึงไม่ต้องแปลกใจว่าเพราะเหตุเราจึงจำเป็นต้องใช้ Rotary Encoder แบบ Connector Type เพราะสามารถอำนวยความสะดวกให้กับการทำงานของเรามากขึ้นนั่นเอง

2.4.2.3 Bracket หรือขายึด

เป็นอุปกรณ์ที่มีส่วนช่วยในการติดตั้งตัวเอ็นโค้ดเดอร์ให้สามารถใช้งานได้ อย่างรวดเร็ว และ แม่นยำ อีกทั้งยังช่วยลดการเสียหายที่อาจเกิดจากการติดตั้งที่ผิดพลาดได้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เช่น การเกิดการเยื้องศูนย์ของแกนเพลลา อันเป็นปัญหาหลักที่ทำให้ เอนโค้ดเดอร์ได้รับความเสียหายได้

2.4.2.4 Flexible Coupling หรือ ยอย
“ ยอย ” เป็นอุปกรณ์เสริมที่มีความจำเป็นที่สุดในการติดตั้งตัวเอนโค้ดเดอร์ชนิดแกนเพลลา Shaft type encoder ซึ่งจะเป็นตัวช่วยให้สามารถลดการเสียหายที่เกิดจากการติดตั้งที่ไม่ดีได้ โดยเกิดการเยื้องศูนย์ของแกนเพลลา อันเป็นปัญหาหลักที่ทำให้ เอนโค้ดเดอร์ได้รับความเสียหายได้ และ ยังช่วยลดเวลาในการตั้งศูนย์ได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

Flexible Coupling นั้นมีหลากหลายรูปแบบ และ หลากหลายวัสดุ เช่น ทำจากพลาสติก ก็จะนิยมใช้ในงานที่ไม่ต้องการรับแรงมากนัก และไม่ต้องการความเที่ยงตรงสูง แต่สำหรับงานที่ต้องการความทนทาน และความเที่ยงตรงสูง จำเป็นต้องใช้วัสดุที่ทำจากอลูมิเนียมหล่อซึ่งทนต่อการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิ และ ขยายตัวต่ำ

2.4.3 การประยุกต์ใช้

ในแต่ละอุตสาหกรรมนั้นก็จะมีเครื่องจักรต่างๆ มากมายหลายประเภท เพื่อตอบสนองการทำงานต่าง ๆ นั้น จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้งาน โรตารี เอนโค้ดเดอร์ ที่แตกต่างกันออกไป โดยเราสามารถยกตัวอย่างการประยุกต์เอนโค้ดเดอร์ ของประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

2.4.3.1 Light-duty Encoders

เป็นเอนโค้ดเดอร์ ในแบบมาตรฐานที่มีความนิยมใช้งานในทั่วไป โดยจะมีราคาไม่สูงมากนัก ซึ่งจะเหมาะสำหรับการใช้งานในห้องทดลองหรือในอุตสาหกรรม ที่สภาวะแวดล้อมไม่เลวร้ายมากใช้เพื่อควบคุมความชื้น ฝุ่น และ อุณหภูมิ เนื่องจากเอนโค้ดเดอร์เหล่านี้จะมีค่า IP rating ที่ค่อนข้างต่ำ โดยตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของเอนโค้ดเดอร์ประเภทนี้นั้นจะได้แก่

- กระบวนการประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์
- อุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์
- เครื่องพิมพ์ เครื่องติดป้าย
- เครื่องมือวัดต่างๆ เช่น ในการวัดความยาว หรือ อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ เป็นต้น

2.4.3.2 Industrial Encoders

สามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีการเพิ่มความทนทานให้กับตัวเอนโค้ดเดอร์ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของ IP rating ที่สูงมากขึ้นอีกทั้งยังทนทานแรงกระแทก และ แรงสั่นสะเทือนที่ได้มากกว่าเอนโค้ดเดอร์แบบ Light-duty Encoders โดยส่วนใหญ่จะใช้ในระบบควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ซึ่งจะมีความเร็วและความแรงที่สูง ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเอนโค้ดเดอร์ประเภทนี้ได้แก่

- เครื่องบรรจุภัณฑ์ต่างๆ
- อุตสาหกรรมผลิตอาหารและเครื่องดื่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

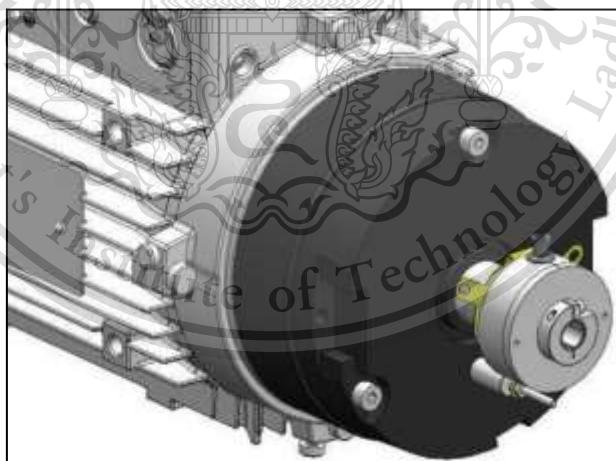
- การแปรรูปเหล็กและพลาสติก
- การแปรรูปไม้และเฟอร์นิเจอร์
- การแปรรูปหินและเซรามิก
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ
- อุตสาหกรรมหุ่นยนต์ อุตสาหกรรมสายพานลำเลียง

2.4.3.3 Feedback Encoders

เอ็นโค้ดเดอร์ชนิดพิเศษที่ออกแบบมาเพื่อการใช้งานในการป้อนกลับความเร็ว หรือ ตำแหน่งของมอเตอร์ เพื่อส่งข้อมูลให้กับตัวควบคุมมอเตอร์อีกที ซึ่งเอ็นโค้ดเดอร์ประเภทนี้ จะมีความทนทานสูง เช่น ทนต่อความร้อน ทนต่อการบดบวมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และ ทนต่อการความแรง เนื่องจากเวลาใช้งานจะต่อกับแกนเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าโดยตรง

นอกจากนี้จะมีสัญญาณเอาต์พุตที่ใช้ในการสื่อสารที่มีโปรโตคอลที่หลากหลาย เพื่อให้สามารถต่อกับ Motion Controller ที่มีอยู่หลากหลายได้เช่นกัน ยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเอ็นโค้ดเดอร์ประเภทนี้ได้แก่

- การป้อนกลับความเร็วหรือตำแหน่งของมอเตอร์ AC และ DC หรือ Stepper Motor
- งานควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์ เครื่องกลึง เครื่องกัด CNC ที่ใช้ Servo Motor



รูปที่ 2.33 แสดงการป้อนกลับความเร็วหรือตำแหน่งของมอเตอร์โดยใช้ Rotary Encoder
(ที่มา : <https://mall.factomart.com/application-of-rotary-encoder/>)

2.4.3.4 Heavy-Duty Encoders

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ เอ็นโค้ดเดอร์ชนิดพิเศษที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เลวร้าย การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อื่น เช่น มีน้ำมัน สารหล่อลื่น ฝุ่นขนาดเล็ก ความชื้น รวมถึงการฉีกน้ำ หรือการชำระล้างโดยใช้
แรงดัน และ แม้แต่แรงสั่นสะเทือนจากที่สูงก็สามารถทนได้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เนื่องจากการออกแบบตัวเพลลา และลูกปืนของเอ็นโค้ดเดอร์ให้สามารถรับแรงสั่นได้สูงมากขึ้น และนอกจากนี้ยังถูกออกแบบให้มีชั่วโมงการทำงานที่สูงกว่าแบบอื่นๆ และมีความน่าเชื่อถือในการทำงานสูง ไม่จำเป็นต้องมีการดูแลรักษามากนัก ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเอ็นโค้ดเดอร์ประเภทนี้ได้แก่

- อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมอวกาศ และการบิน
- อุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน อุตสาหกรรมท่าเรือ
- การใช้งานกับเครน และลิฟท์โดยสาร รถบรรทุก รถลำเลียงต่างๆ
- กังหันลม ในเรือเดินทะเล

2.4.3.5 ATEX certified Encoder

เป็น Encoder ชนิดพิเศษ ที่ถูกออกแบบการผลิตมาเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานของ ATEX Directive 94/9/EC ซึ่งเป็นข้อกำหนดทางกฎหมายที่บังคับใช้ในทุกสหภาพยุโรป รวมถึงประเทศสมาชิกสำหรับอุปกรณ์ใด ๆ ที่จะนำมาใช้สำหรับใช้ในสภาพแวดล้อมที่อาจเกิดการระเบิดได้ จึงจะต้องได้รับมาตรฐานนี้ ซึ่งมีเอ็นโค้ดเดอร์บางยี่ห้อเท่านั้นที่ได้รับมาตรฐานนี้ เช่น LIKA โดยสภาพแวดล้อมที่อาจเกิดการระเบิดได้นั้นอาจหมายถึงบริเวณที่มี ก๊าซที่ติดไฟได้ หรือ สารเคมีต่างๆ

2.4.3.6 Special Stainless Steel Encoders

Stainless Steel Encoders นั้น เป็นเอ็นโค้ดเดอร์ที่ออกแบบมาสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมอาหาร ในบริเวณที่ต้องควบคุมความสะอาดในการผลิต เพื่อให้ได้ตามมาตรฐานต่างๆ โดยโครงสร้างทำจาก AISI 410 Stainless Steel ซึ่งสามารถใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้ นอกจากนี้ตัวโครงสร้างของเอ็นโค้ดเดอร์จะมีการออกแบบมา ให้ไม่เป็นแหล่งสะสมของสิ่งสกปรกต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุในการสะสมของเชื้อแบคทีเรียได้

2.5 รีเลย์ (Relay)

รีเลย์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแม่เหล็ก เพื่อใช้ในการดึงดูดหน้าสัมผัสของคอนแทคให้เปลี่ยนสถานะ โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เพื่อทำการปิดหรือเปิดหน้าสัมผัสคล้ายกับสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถนำรีเลย์ไปประยุกต์ใช้ ในการควบคุมวงจรต่าง ๆ ในงานช่างอิเล็กทรอนิกส์

2.5.1 โครงสร้างของรีเลย์

2.5.1.1 ส่วนของขดลวด (coil)

เหนี่ยวนำกระแสต่ำ ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้แกนโลหะไปกระตุ้นให้หน้าสัมผัสต่อกัน ทำงานโดยการรับแรงดันจากภายนอกต่อคร่อมที่ขดลวดเหนี่ยวนำนี้ เมื่อขดลวดได้รับแรงดัน(ค่าแรงดันที่รีเลย์ต้องการขึ้นกับชนิดและรุ่นตามที่ผู้ผลิตกำหนด)

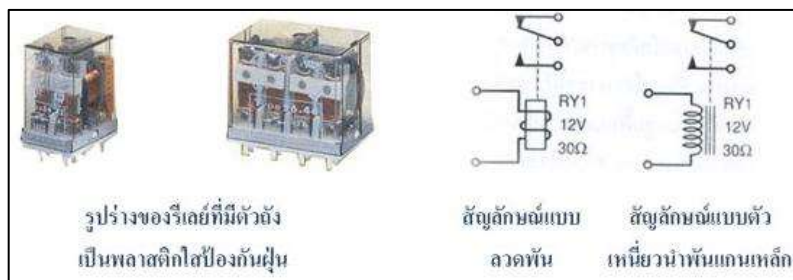
จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้แกนโลหะด้านในไปกระตุ้นให้แผ่นหน้าสัมผัสต่อกัน

2.5.1.2 ส่วนของหน้าสัมผัส (contact)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์จ่ายกระแสไฟให้กับอุปกรณ์ที่เราต้องการ

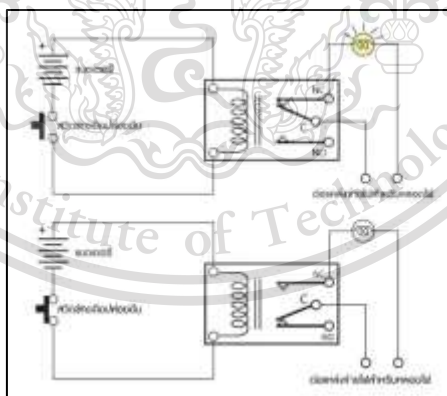


รูปที่ 2.34 รูปร่างและสัญลักษณ์ของรีเลย์

(ที่มา : <http://www.psptech.co.th/>)

2.5.2 การทำงานของรีเลย์

การทำงานเริ่มจากปิดสวิตช์ เพื่อป้อนกระแสให้กับขดลวด (Coil) โดยทั่วไปจะเป็นขดลวดพันรอบแกนเหล็ก ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไปดูดเหล็กอ่อนที่เรียกว่าอาร์เมเจอร์ (Armature) ให้ต่ำลงมา ที่ปลายของอาร์เมเจอร์ด้านหนึ่งมียึดติดกับสปริง (Spring) และปลายอีกด้านหนึ่งยึดติดกับหน้าสัมผัส (Contacts) การเคลื่อนที่ของอาร์เมเจอร์ จึงเป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัส ให้แยกจากหรือแตะกับหน้าสัมผัสอีกอันหนึ่งซึ่งยึดติดอยู่กับที่ เมื่อเปิดสวิตช์อาร์เมเจอร์ ก็จะกลับสู่ตำแหน่งเดิม เราสามารถนำหลักการนี้ไปควบคุมโหลด (Load) หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้ตามต้องการ



รูปที่ 2.35 แสดงการทำงานของรีเลย์

(ที่มา : <http://www.psptech.co.th/>)

2.5.3 ประเภทของรีเลย์

เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์มีหลักการทำงานคล้ายกับ ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโซ

ลีนอยด์ (solenoid) รีเลย์ใช้ในการควบคุมวงจรไฟฟ้าได้อย่างหลากหลาย รีเลย์เป็นสวิตช์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ ควบคุมที่ทำงานด้วยไฟฟ้า แบ่งออกตามลักษณะการใช้งานได้เป็น 2 ประเภทคือ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

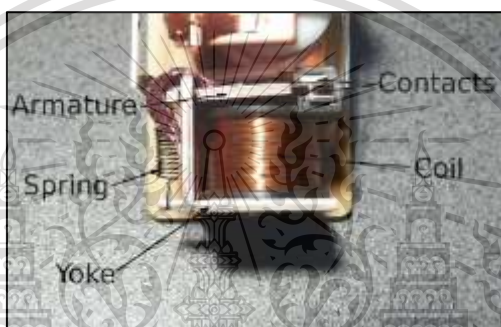
2.5.3.1 รีเลย์กำลัง (power relay) ใช้ในการควบคุมไฟฟ้ากำลัง มีขนาดใหญ่กว่ารีเลย์ธรรมดา

2.5.3.2 รีเลย์ควบคุม (control Relay) มีขนาดเล็กกำลังไฟฟ้าต่ำ ใช้ในวงจรควบคุมทั่วไปที่มีกำลังไฟฟ้าไม่มากนัก หรือเพื่อการควบคุมรีเลย์หรือคอนแทกเตอร์ขนาดใหญ่ รีเลย์ควบคุม บางทีเรียกกันง่าย ๆ ว่า "รีเลย์"

2.5.4 ชนิดของรีเลย์

2.5.4.1 อาร์เมเจอร์รีเลย์ (Armature Relay)

รีเลย์ที่ได้อธิบายหลักการทำงานดังใน รูปที่ 2.36 ซึ่งเป็นรีเลย์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด บางครั้งเรียกรีเลย์แบบนี้ว่า รีเลย์ชนิดแคลปเปอร์ (Clapper Relay)



รูปที่ 2.36 แสดงโครงสร้างอาร์เมเจอร์รีเลย์
(ที่มา : <http://www.pspotech.co.th/>)

2.5.4.2 รีดรีเลย์ (Reed Relay)

รีเลย์ไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแคปซูลขนาดเล็ก ในรูปที่ 2.37 แสดงภาพตัดขวางของรีเลย์ ที่ประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่ารีดแคปซูล ซึ่งมีคอยล์พันบนแกนบ๊อบบี้ รีดแคปซูลจะเป็นหลอดแก้ว ภายในบรรจุก๊าซเฉื่อย หน้าสัมผัสเป็นโลหะผสมแผ่นบาง ๆ ปลายตัด 2 แผ่น วางซ้อนแต่ไม่สัมผัสกัน เป็นสวิตช์ชุดเดียวทางเดียวหน้าสัมผัสปกติเปิดวงจร (SPST-NO)



รูปที่ 2.37 แสดงอุปกรณ์รีดรีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเอกสารนี้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

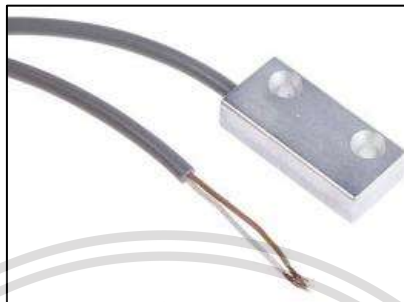
(ที่มา : <https://th.mouser.com/ProductDetail/Littelfuse/>)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5.4.3 รีดสวิตช์ (Reed Switch)

รีเลย์อีกชนิดหนึ่งแต่ไม่มีชุดขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก การควบคุมการปิดเปิดหน้าสัมผัส ของสวิตช์จะใช้สนามแม่เหล็กจากภายนอกมาควบคุม หน้าสัมผัส โครงสร้างภายในของรีดสวิตช์แสดงดังรูปที่ 2.38

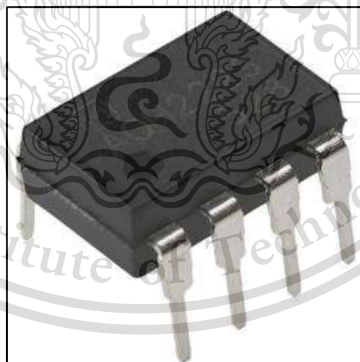


รูปที่ 2.38 แสดงอุปกรณ์รีดสวิตช์

(ที่มา : <https://th.rs-online.com/web/p/magnetic-proximity-switches/>)

2.5.4.4 โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid-State Relay)

รีเลย์ที่ไม่มีโครงสร้างทางกลอยู่ภายใน มีขั้วต่ออย่างละ 2 ขั้ว ขั้วอินพุต เป็นขั้วสำหรับป้อนสัญญาณควบคุม เพื่อบังคับให้ขั้วเอาต์พุตปิดหรือเปิดวงจร โดยจะมีการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างขั้วอินพุตและเอาต์พุต



รูปที่ 2.39 แสดงอุปกรณ์โซลิดสเตตรีเลย์

(ที่มา : <https://th.rs-online.com/web/p/solid-state-relays/>)

2.6 ทรานซิสเตอร์ (Transistor)

ทรานซิสเตอร์(transistor) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถทำหน้าที่ ขยายสัญญาณไฟฟ้า เปิด/ปิดสัญญาณไฟฟ้า คงค่าแรงดันไฟฟ้า หรือกล้ำสัญญาณไฟฟ้า (modulate) เป็นต้น การทำงานของทรานซิสเตอร์เปรียบได้กับวาล์วที่ถูกควบคุมด้วยสัญญาณไฟฟ้าขาเข้า เพื่อปรับขนาดกระแสไฟฟ้าขาออกที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดัน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

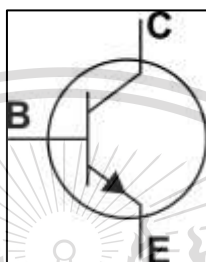
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.6.1 ประเภทของทรานซิสเตอร์

เราจัดประเภทของมันจากการเรียงตัวกันของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ภายในตัวถังของมัน ซึ่งทรานซิสเตอร์แบบพื้นฐาน จะมีสารกึ่งตัวนำวางเรียงกัน 3 ชั้น ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

2.6.1.1 ทรานซิสเตอร์ประเภท NPN

สารกึ่งตัวนำของทรานซิสเตอร์ประเภทนี้ ประกอบด้วยสารชนิด N 2 ตัวและชนิด P 1 ตัววางตัวสลับกันหรืออาจเรียกได้ว่า (Negative-Positive-Negative)

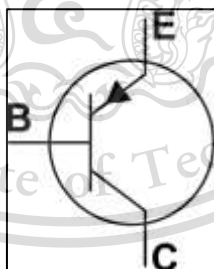


รูปที่ 2.40 แสดงสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ประเภท NPN

(ที่มา : <https://commandronstore.com/learning/transistor000.php>)

2.6.1.2 ทรานซิสเตอร์ PNP

สารกึ่งตัวนำของทรานซิสเตอร์ประเภทนี้ ประกอบด้วยสารชนิด P 2 ตัวและชนิด N 1 ตัววางตัวสลับกัน (Positive-Negative-Positive)



รูปที่ 2.41 แสดงสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ประเภท PNP

(ที่มา : <https://commandronstore.com/learning/transistor000.php>)

2.6.2 การทำงานของทรานซิสเตอร์

เมื่อมีปริมาณกระแสไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยที่ขา Base ,ก็จะสามารถคอนโทรลปริมาณ

กระแสไฟฟ้าที่มากกว่าหลายเท่าตัวของขา Collector และ Emitter ได้ เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ทรานซิสเตอร์มีค่ากำลังขยาย ทรานซิสเตอร์มีโหมดการทำงานอยู่หลัก 4 โหมด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.6.2.1 Active Mode

โหมดที่ีมีการทำงาน ซึ่งในโหมดนี้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขา CE จะเป็นสัดส่วนกับ กระแสไฟฟ้าที่ขา B คือยิ่งกระแสไฟฟ้าที่ขา B มีค่ามาก กระแสที่ CE ก็จะมีค่ามากๆ แต่ จะมากไม่ถึงและไม่เกินแหล่งจ่าย V_{CC}

2.6.2.2 Cut-Off Mode

โหมดที่ไม่มีการทำงาน ไม่มีกระแสที่ขา B จึงไม่มีกระแสที่ CE ด้วย เปรียบเสมือน เป็นวงจรเปิด

2.6.2.3 Saturation Mode

โหมดอิ่มตัว คล้ายๆกับ Active Mode แต่ในโหมดนี้คือการที่กระแสไฟฟ้าที่ขา B มากจนอิ่มตัว เป็นผลให้ CE ได้รับกระแสมากที่สุดคือ จะได้รับแรงดันจากแหล่งจ่าย โดยตรง (แรงดัน CE มีค่าเท่ากับแรงดัน V_{CC}) เปรียบเสมือนทรานซิสเตอร์ Shot Circuit ซึ่งเป็นโหมดที่นิยมใช้ เพราะ LOAD จะได้รับกระแสสูงสุด

2.6.2.4 Reverse-Active Mode

คล้ายกับ Active Mode เช่นกันแต่ในโหมดนี้กระแสไฟฟ้าจะไหลจากขา E ไปขา C

2.7 ไดโอด (Diode)

ไดโอด เป็นอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ p-n สามารถควบคุมให้กระแสไฟฟ้าจากภายนอก ไหลผ่านตัวมันได้ทิศทางเดียว ไดโอดประกอบด้วยขั้ว 2 ขั้ว คือ แอโนด (Anode) ซึ่งต่ออยู่กับสารกึ่ง ตัวนำชนิดพี(p) และ แคโทด (Cathode) ซึ่งต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(n)

2.7.1 การทำงานของไดโอด

ไดโอดจะทำงานได้ต้องต่อแรงดันไฟให้กับขาของไดโอด การต่อแรงดันไฟให้กับไดโอด เรียกว่า การให้ไบแอส (Bias) การให้ไบแอสแก่ไดโอดมีอยู่ 2 วิธี

2.7.1.1 การให้ไบแอสตามหรือเรียกว่า Forward Bias

การให้ไบแอสแบบนี้คือ ต่อขั้วบวกของแรงดันไฟตรงเข้ากับสารกึ่งตัวนำประเภทพี และต่อขั้วลบของแรงดัน ไฟตรงเข้ากับสารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น

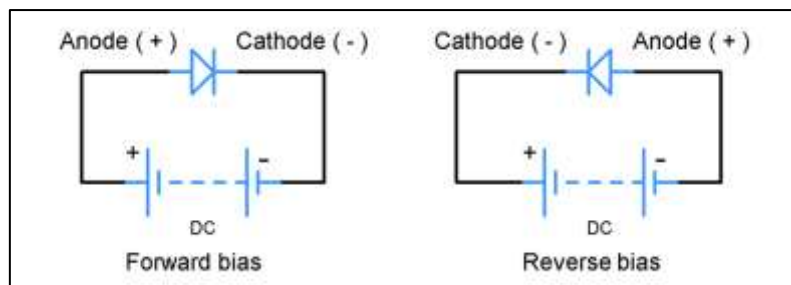
2.7.1.2 การไบแอสอุปกรณ์ไดโอดย้อนกลับ หรือ Reverse Bias

การไบแอสในลักษณะนี้จะเป็นการกำหนดให้ขั้ว A (Anode) ที่มีลักษณะของสาร เป็นสาร P มีค่าของแรงดันน้อยกว่าขั้ว K (Cathode) ที่มีลักษณะของสารเป็นสาร N ซึ่ง จากลักษณะดังกล่าวนี้ก็จะทำให้ไดโอดนั้นไม่สามารถที่จะนำกระแสได้ และจากลักษณะ ของการไบแอสนี้นั้นมันก็จะ เป็นลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ไดโอดในทางอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง (Ideal Diode) ารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

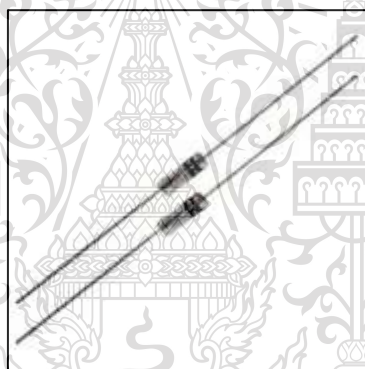


รูปที่ 2.42 แสดงการทำงานของไดโอด แบบ Forward Bias และ Reverse Bias
(ที่มา : <http://www.psptech.co.th/>)

2.7.2 ชนิดของไดโอด

2.7.2.1 ไดโอดดีเท็คเตอร์ (Detector Diode)

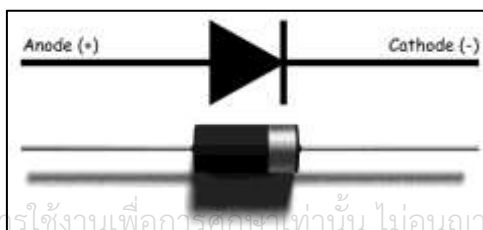
ไดโอดประเภทนี้จะใช้ในวงจรเครื่องรับ-ส่งวิทยุ โดยใช้เป็นตัวแยกสัญญาณวิทยุ หรือ ถดสัญญาณรบกวน



รูปที่ 2.43 แสดง Detector Diode
(ที่มา : <https://www.ebay.co.uk/itm/>)

2.7.2.2 ไดโอดเรกตีฟาย (Rectifier Diode)

ไดโอดประเภทนี้จะใช้ในวงจรเรียงกระแส (Rectifier) หรือวงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง



รูปที่ 2.44 แสดง Rectifier Diode
(ที่มา : <https://www.reddit.com/>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ที่มา : <https://www.reddit.com/>)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.7.2.3 ไดโอดกำลัง (Power Diode)

ไดโอดประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นโลหะขนาดใหญ่ เพื่อช่วยในการระบายความร้อนภายในตัว ส่วนใหญ่จะใช้งานแหล่งจ่ายกำลัง ซึ่งมีกระแสสูง

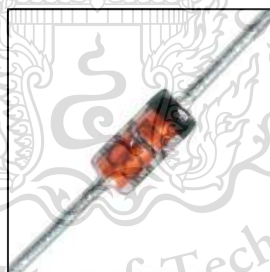


รูปที่ 2.45 แสดงลักษณะของไดโอดกำลัง

(ที่มา: <https://www.indiamart.com/proddetail/power-diodes-4044790348.html/>)

2.7.2.4 ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode)

ไดโอดที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ โดยจะทำงานในสภาวะไบอัสกลับ และมีคุณสมบัติในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ที่ตกคร่อมตัวมัน ให้มีค่าคงที่ จึงนิยมใช้ในวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulator)



รูปที่ 2.46 แสดง Zener Diode

(ที่มา : <https://www.indiamart.com/proddetail/>)

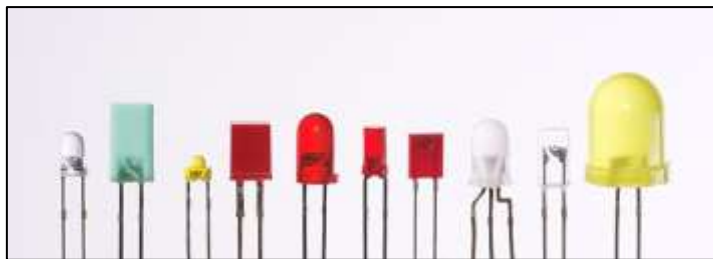
2.7.2.5 ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode)

มักเรียกว่า แอลอีดี (LED) เป็นไดโอดที่ออกแบบมาเป็นพิเศษโดยเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง จะเปล่งแสงออกมาได้ ซึ่งมีทั้ง สีแดง เขียว ฟ้า ส้ม เหลือง ฯลฯ ตามสารที่ใช้ทำ มักใช้ในส่วนของการแสดงผลในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพราะกินไฟน้อยกว่าหลอดไฟมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.47 แสดง Light Emitting Diode

(ที่มา : https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode)

2.7.2.6 ไดโอดรับแสง (Photo Diode)

ไดโอดที่ออกแบบมาเพื่อปรับเปลี่ยนค่าตามความเข้มของแสงที่เข้ามา โดยจะมีลักษณะเป็นช่องหน้าต่างเล็กๆ ไว้ใช้ในการรับแสง ซึ่งอาจเป็นแสงสว่างธรรมดาหรือแสงอินฟราเรด มักใช้กับวงจรตรวจจับสัญญาณ หรือ ในวงจรควบคุมระยะไกล หรือที่เรียกว่ารีโมท



รูปที่ 2.48 แสดง Photo Diode

(ที่มา : <https://th.rs-online.com/web/p/photodiodes/4155722/>)

2.8 การสื่อสารอนุกรมแบบ Serial Peripheral Interface (SPI)

SPI ย่อมาจาก Serial Peripheral Interface คือรูปของแบบการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมแบบซิงโครนัสรูปแบบหนึ่ง ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยโมโตโรล่าในกลางปี ค.ศ. 1980 เพื่อใช้ในการการสื่อสารระยะใกล้โดยเฉพาะในระบบสมองกลฝังตัว การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI จะอาศัยสัญญาณนาฬิกาเป็นตัวกำหนดจังหวะการรับส่งข้อมูล สามารถส่งข้อมูลไปยังปลายทางและรับข้อมูลจากปลายทางกลับมาในครั้งเดียวกัน (Full Duplex) การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI จะแบ่งอุปกรณ์ออกเป็น 2 ฝ่าย คือ Master เป็นตัวควบคุมการรับส่งข้อมูล และ Slave เป็นอุปกรณ์ที่รอรับคำสั่งจาก Master ในบัสการสื่อสารแบบอนุกรมแบบ SPI สามารถมี Slave มีได้มากกว่า 1 ตัว

2.8.1 สายสัญญาณในการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้

2.8.1.1 SCK (Clock Data) ใช้สำหรับส่งสัญญาณนาฬิกาจาก Master ไปยัง Slave

2.8.1.2 MISO (Master In Slave Out) ใช้สำหรับรับข้อมูลจาก Slave

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

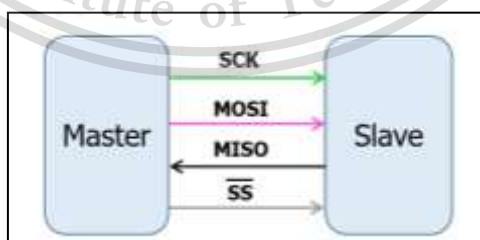
2.8.1.3 MOSI (Master Out Slave In) ใช้สำหรับส่งข้อมูลจาก Master ไปยัง Slave

2.8.1.4 SS/CS (Slave Select/Chip Select) ใช้สำหรับเลือก Slave ที่ต้องการใช้งาน สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI บางชนิดอาจมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น

- Serial Clock ได้แก่ SCLK : SCK
- Master Output Slave Input ได้แก่ SIMO, MTSR
on Slave devices ได้แก่ SDI, DI, DIN, SI
on Master devices ได้แก่ SDO, DO, DOUT, SO
- Master Input Slave Output ได้แก่ SOMI, MRST
on Slave devices ได้แก่ SDO, DO, DOUT, SO
on Master devices ได้แก่ SDI, DI, DIN, SI
- Slave Select ได้แก่ SS, $\overline{SS}$, SSEL, CS, $\overline{CS}$, CE, nSS, /SS, SS#

2.8.2 การเชื่อมต่อระบบด้วยการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI

การเชื่อมต่อระบบด้วยการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI แบบ Slave เดียว ดังรูป 2.49 และการเชื่อมต่อระบบด้วยการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI แบบหลาย Slave ดังรูป 2.50 จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ อุปกรณ์หลัก (Master) และ อุปกรณ์ย่อย (Slave) ในระบบการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI สามารถต่ออุปกรณ์ Slave ได้หลายอุปกรณ์ ภายในการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI จะใช้สายสัญญาณ SCK MOSI และ MISO ร่วมกันแต่จะไม่ใช้สายสัญญาณ $\overline{SS}$ ร่วมกัน เวลาที่ Master ต้องการสื่อสารกับ Slave จะส่งสัญญาณลอจิก LOW ไปยัง Slave ที่ต้องการสื่อสารเพื่อบ่งบอกว่าต้องการสื่อสารกับ Slave ตัวนั้น ทำให้สามารถเลือกสื่อสารกับ Slave ได้ถูกต้อง



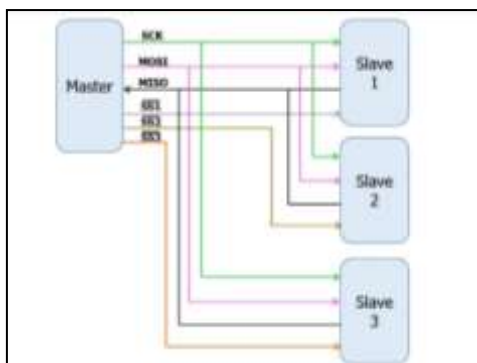
รูปที่ 2.49 แสดงการเชื่อมต่อระบบด้วยการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI แบบ Slave เดียว

(ที่มา : <https://blog.thaieasyelec.com/espino32-ch9-how-to-use-spi/>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

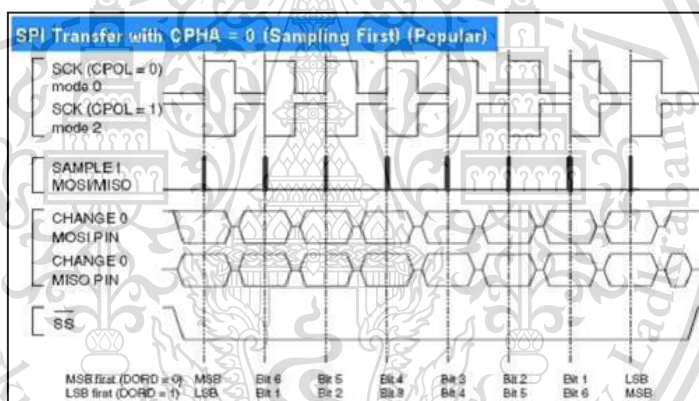
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.50 แสดงการเชื่อมต่อระบบด้วยการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI แบบ Slave เดียว
(ที่มา : <https://blog.thaieasyelec.com/espino32-ch9-how-to-use-spi/>)

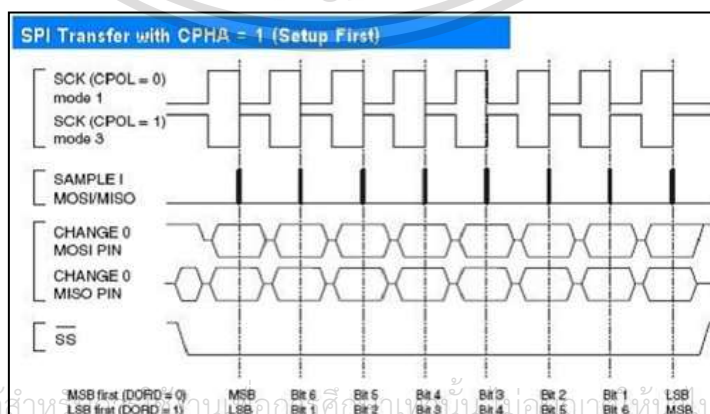
2.8.3 รูปแบบสัญญาณใน SPI BUS

รูปแบบสัญญาณ SPI มี 4 รูปแบบ แตกต่างกันที่ขบสัญญาณนาฬิกา (Clock Polarity) และเฟส (Phase) ดังรูปที่ 2.51 และ รูปที่ 2.52



รูปที่ 2.51 แสดงรูปแบบสัญญาณเมื่อ CPHA = 0

(ที่มา : <https://blog.thaieasyelec.com/espino32-ch9-how-to-use-spi/>)



รูปที่ 2.52 แสดงรูปแบบสัญญาณเมื่อ CPHA = 1

(ที่มา : <https://blog.thaieasyelec.com/espino32-ch9-how-to-use-spi/>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 2.51 เมื่อ CPHA=0 และ CPOL=0 สัญญาณนาฬิกา (Clock) ในสถานะปกติจะเป็น Low และจะรับ-ส่งข้อมูลที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกา (Rising Edge Clock)

เมื่อ CPHA=0 และ CPOL=1 สัญญาณนาฬิกา (Clock) ในสถานะปกติจะเป็น High และจะรับ-ส่งข้อมูลที่ขอบขาลงของสัญญาณนาฬิกา (Falling Edge Clock)

จากรูปที่ 2.52 เมื่อ CPHA=1 และ CPOL=0 สัญญาณนาฬิกา (Clock) ในสถานะปกติจะเป็น Low และจะรับ-ส่งข้อมูลที่ขอบขาลงของสัญญาณนาฬิกา (Falling Edge Clock)

เมื่อ CPHA=1 และ CPOL=1 สัญญาณนาฬิกา (Clock) ในสถานะปกติจะเป็น High และจะรับ-ส่งข้อมูลที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกา (Rising Edge Clock)

ดังนั้น Mode ของ SPI มี 4 โหมด ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงโหมดของการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI

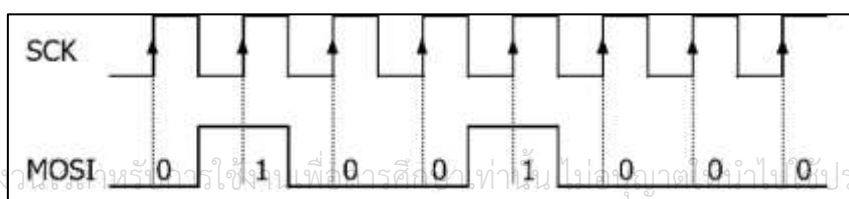
Mode	Clock Polarity (CPOL)	Clock Phase (CPHA)	Output Edge	Data Capture
SPI_MODE0	0	0	Falling	Rising
SPI_MODE1	0	1	Rising	Falling
SPI_MODE2	1	0	Rising	Falling
SPI_MODE3	1	1	Falling	Rising

2.8.4 การใช้งานการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI

สำหรับการใช้งานการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI จะไม่มีรูปแบบการสื่อสารที่เป็นมาตรฐาน จำเป็นต้องใช้รูปแบบของข้อมูลตามเอกสารของอุปกรณ์ที่ต้องการจะใช้งานร่วมกัน

2.8.4.1 ตัวอย่างการส่งข้อมูลแบบ SPI

การส่งข้อมูลแบบ SPI จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิกา (SCK) จากไมโครคอนโทรเลอร์ และสายสัญญาณข้อมูลในการสื่อสาร ยกตัวอย่าง เช่น ให้ไมโครคอนโทรเลอร์ส่งอักขร 'H' (B01001000) ออกไปผ่านช่องทางการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI จะต้องใช้สายสัญญาณนาฬิกาที่คอยควบคุมจังหวะการรับส่งข้อมูล (ตัวอย่างนี้ใช้ SPI Mode 0) จะมีสัญญาณที่สายต่างๆ ดังรูปที่ 2.53 ตัวอย่างการส่งอักขร 'H' แบบ SPI



รูปที่ 2.53 แสดงตัวอย่างการส่งอักขร 'H' แบบ SPI

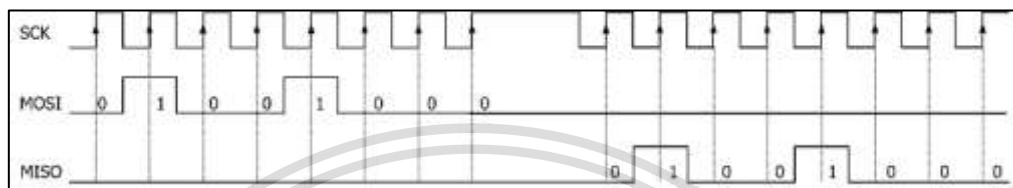
(ที่มา : <https://blog.thaieasyelec.com/espino32-ch9-how-to-use-spi/>)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.8.4.2 ตัวอย่างการส่ง-รับข้อมูลแบบ SPI

การส่ง-รับข้อมูลแบบ SPI จะยังมีลักษณะเดียวกันกับการส่งข้อมูลแบบ SPI จะมีเอาต์พุตตอบกลับมาในสัญญาณนาฬิกาชุดถัดไป ยกตัวอย่าง เช่น ให้ไมโครคอนโทรเลอร์ส่งอักษร 'H' (B01001000) ออกไปผ่านช่องทางการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI และรับข้อมูลตัวอักษร 'H' กลับมา จะมีสัญญาณที่สายต่างๆ ดังรูปที่ 2.54 ตัวอย่างการส่งอักษร 'H' และรับข้อมูลอักษร 'H' ด้วยการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI



รูปที่ 2.54 แสดงตัวอย่างการส่งอักษร 'H' และรับข้อมูลอักษร 'H' ด้วยการสื่อสารอนุกรมแบบ SPI
(ที่มา : <https://blog.thaieasyelec.com/espino32-ch9-how-to-use-spi/>)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

หลักการทำงานและการออกแบบ

3.1 อุปกรณ์

3.1.1 อุปกรณ์บนบอร์ด MCP23S17

- RN1 ถึง RN4	Resistors Network 1k Ω
- R33 ถึง R34	1k Ω
- U1 ถึง U2	MCP23S17
	Socket สำหรับ MCP23S17
- K1	Relay HRS4H DC 5 V
- D1	Diode 1N4001
- Q2	Transistor 2N390
- H5 ถึง H8	มอเตอร์
- Port ต่างๆ	Terminal Block 2 Pins, Female
	Terminal Block 2 Poles, Female
	Terminal Block 3 Pins, Female
	Terminal Block 3 Poles, Female
	Terminal Block 4 Pins, Female
	Terminal Block 4 Poles, Female
	Terminal Block 9 Pins, Female
	Terminal Block 9 Poles, Female
	Pin 40, Female สำหรับ Raspberry Pi

3.1.2 อุปกรณ์บนบอร์ด Encoder

- Absolute Encoder	Absolute Encoder
- Port	Wafer housing 9 ขา

3.1.3 อุปกรณ์ประกอบชิ้นงาน

- เหล็กแผ่นหนา 12, 9 mm.
- เหล็กเพลลาขาว
- ลูกปืนเตเปอร์ 2 ลูก
- ฟุเลย์ GT2 100T, 20T
- สายพาน GT2 ยาว 400 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- น็อต สกรู
- สเต็ปเปอร์มอเตอร์ Nema23
- สเต็ปเปอร์มอเตอร์ไดร์ฟเวอร์ 5A
- สเต็ปเปอร์มอเตอร์ Nema17
- Power supply
- Ball bearing
- แม่เหล็กไฟฟ้า
- แผ่น PVC

3.1.4 อุปกรณ์อื่นๆ

- Raspberry Pi 4 Model B 4 GB
- Micro SD Card ขนาด 16 GB
- เวอร์เนีย
- สายไฟ AWG 22
- ขาตั้ง บอร์ด PCB
- Fan DC 5V

3.2 การเลือกอุปกรณ์

3.2.1 ตัวต้านทาน พิจารณา 3 กรณี คือ

- 3.2.1.1 ค่าความต้านทานที่เหมาะสมต่อวงจร
- 3.2.1.2 ค่าความผิดพลาดในตัวต้านทาน
- 3.2.1.3 ค่ากำลังงานที่ตัวต้านทานสามารถทนได้

3.2.2 Absolute Encoder พิจารณา 3 กรณี คือ

- 3.2.2.1 ความยาวสายสัญญาณของเอ็นโค้ดเดอร์
- 3.2.2.2 ความเร็วสูงสุดของเอ็นโค้ดเดอร์
- 3.2.2.3 Resolution or Pulse rate

3.2.3 MCP23S17 พิจารณา 2 กรณี คือ

- 3.2.3.1 High-Speed SPI Interface ที่มากเพียงพอ
- 3.2.3.2 จำนวนบิต I/O Port ที่เหมาะสมกับการใช้งาน
- 3.2.3.3 สามารถควบคุมให้เป็นอินพุตหรือเอาต์พุตได้แบบอิสระกันทั้ง 16 บิต

3.2.4 Raspberry Pi พิจารณา 2 กรณี คือ

- 3.2.4.1 ความเร็วในการประมวลผล
- 3.2.4.2 ความเหมาะสมในการเชื่อมต่อกับ MCP23S17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3 วิธีการดำเนินงานและลักษณะการทำงาน

3.3.1 วิธีการดำเนินงาน

3.3.1.1 ส่วน Hardware

- 1) ศึกษาการทำงานของ MCP23S17 และ Absolute Encoder จากใน Datasheet ของแต่ละตัวอุปกรณ์
- 2) ออกแบบวงจรการทำงานร่วมกันของ MCP23S17, Absolute Encoder และ Raspberry Pi 4 model B
- 3) ทดลองต่อวงจรที่ออกแบบลงใน Protoboard
- 4) ทดลองการทำงานของวงจรด้วยการเขียนโปรแกรมใน Raspberry Pi เพื่อควบคุมการทำงานและทดสอบว่าวงจรนี้ใช้งานได้หรือไม่
- 5) ออกแบบลายวงจร(PCB) ด้วยโปรแกรม Altium Designer 18.0
- 6) ดำเนินการทำ PCB Board
- 7) ทำการทดสอบระหว่าง PCB Board และ โปรแกรมการทำงาน
- 8) ตรวจสอบปัญหาขึ้น ทำให้ การทำงานของ PCB Board ไม่ถูกต้อง
- 9) ดำเนินการแก้ปัญหา
- 10) นำบอร์ดมาทดสอบการทำงานร่วมกับชิ้นงานและส่วนโปรแกรม

3.3.1.2 ส่วนชิ้นงาน

- 1) ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ต้องการใช้ ได้แก่ สเต็ปมอเตอร์ Nema23 และ สเต็ปมอเตอร์ไดร์ฟเวอร์ 5A
- 2) ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ว่าสามารถทำได้ตรงตาม Datasheet หรือไม่
- 3) ออกแบบชิ้นงานด้วย โปรแกรม AutoCAD
- 4) สร้างแต่ละชิ้นส่วน ประกอบชิ้นงาน และทดสอบการทำงานอีกครั้ง
- 5) ทดสอบ ความเร็ว, ความแรง และระยะเวลาที่มอเตอร์สามารถทำงานได้โดยไม่มีปัญหา ได้ผลดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการทดสอบการทำงานของมอเตอร์

	ความเร็ว	ความแรง	ระยะเวลา
ค่าสูงสุด	120	120	5
ค่าที่ยอมรับได้	60	60	10
ค่าต่ำสุด	45	45	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานาน 45 อนุญาตให้นำไปใช้ 45 โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

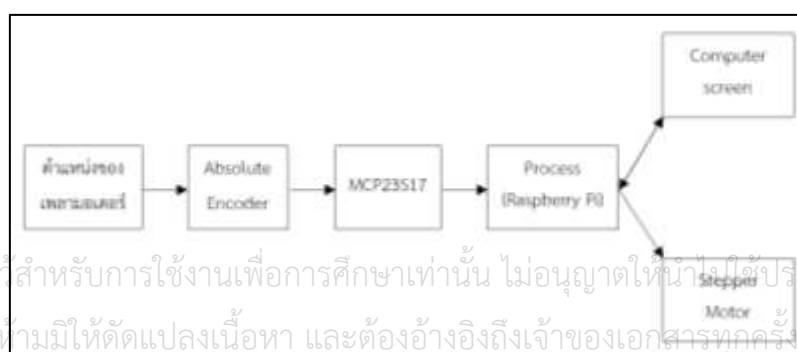
- 6) นำมาทดสอบการทำงานร่วมกับ PCB Board และส่วนโปรแกรม

3.3.1.3 ส่วนโปรแกรม

- 1) ศึกษาการเขียนภาษาไพทอนเบื้องต้น และศึกษาการใช้งานฟังก์ชันภายในโมดูลต่างๆ
- 2) เขียนโปรแกรมเพื่อสร้างหน้าต่าง Graphic User Interface (GUI) เพื่อเป็นหน้าหลักในการสื่อสารกันระหว่างผู้ใช้งานกับโปรแกรม
- 3) เขียนโปรแกรมสื่อสารระหว่าง Raspberry pi กับ MCP23S17 ที่มีการเชื่อมต่อแบบ SPI เพื่อให้ Raspberry pi สามารถอ่านค่าสถานะที่ขาของ MCP ซึ่งจะถูกควบคุมด้วย Absolute Encoder ที่จะคอยวัดตำแหน่ง เพื่อให้ Raspberry pi นำไปประมวลผลและแสดงผลบนหน้าจอ GUI เพื่อให้ผู้ใช้รับรู้ถึงสถานะนี้อยู่ที่มุมที่เท่าไร
- 4) ทดสอบการทำงานของโปรแกรมในการสื่อสาร SPI
- 5) เขียนโปรแกรม ฟังก์ชันควบคุมการทำงานของมอเตอร์
- 6) นำโปรแกรมมาทดสอบการทำงานร่วมกับ PCB Board และชิ้นงาน
- 7) ปรับปรุงหน้า GUI ใหม่ให้โดยมีการเพิ่มฟังก์ชันให้สามารถปรับค่าความเร็วและความเร่งได้
- 8) เพิ่มรูปภาพโครงสร้างประกอบการควบคุมมอเตอร์และเพิ่มช่องสำหรับแสดงข้อความถึงผู้ใช้งาน และเพิ่มปุ่มการควบคุมการทำงานสำหรับแกน XYZ และ gripper
- 9) เพิ่มปุ่มและฟังก์ชันในการบันทึกและการเรียกใช้การทำงานมาใช้นิยามอีกครั้ง

3.3.2 ลักษณะการทำงาน

การทำงานของโครงงานชิ้นนี้ จะเป็นการนำ Raspberry Pi 4 Model B 4 GB เป็นตัวประมวลผลและควบคุม ใช้ MCP23S17 เป็นตัวขยายพอร์ตเพื่ออ่านค่าจาก Absolute Encoder ที่เป็นเซ็นเซอร์ในการวัดตำแหน่ง ใช้ Stepper Motor Nema23 ในการหมุนไปยังตำแหน่งมุมที่ต้องการ และใช้ Stepper Driver ในการขับมอเตอร์ให้สามารถหมุนได้ โดยจะมีการลักษณะทำงานดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของโครงงาน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในรายละเอียดนั้นส่วนของวงจรขยายพอร์ต MCP23S17 สามารถควบคุมให้เป็นอินพุตหรือเอาต์พุตได้แบบอิสระกันทั้ง 16 บิต ใช้แรงดันไฟเลี้ยง 3.3 VDD สำหรับเชื่อมต่อกับ Raspberry Pi เพื่อทำการขยายพอร์ตอินพุตซึ่งจะรับ Input จาก เนื่องสัญญาณ Input ของ Absolute Encoder เป็นสัญญาณที่เล็กมาก

ส่วนที่เชื่อมต่อระหว่าง Hardware และ Software โดย MCP23S17 เป็นการเชื่อมต่อแบบ SPI เป็นบัคการสื่อสารระดับมาสเตอร์ Bus เราสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้มากเท่าที่เราต้องการทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเป็นไปได้ของชิปของเราจำเป็นต้องส่งรหัสไบนารีเพื่อสื่อสารกับ Raspberry Pi

ส่วนที่เชื่อมระหว่าง มอเตอร์ทั้ง 4 ตัว กับ Raspberry Pi เพื่อควบคุม Enable, Pulse, DIR ของมอเตอร์

ส่วนที่เป็นวงจรควบคุมการทำงานของ solenoid valve โดยในวงจร ตัวของ relay จะทำตัว สวิตช์ on/off ของ solenoid valve และ จะมี input digital จาก Raspberry Pi

ส่วนที่เป็น Emergency Switch จะเป็นสวิตช์แบบ pull up switch เพื่อในกรณีฉุกเฉินสามารถกด Switch เพื่อหยุดการทำงานทั้งหมด

ภาพรวมเมื่อเปิดใช้งานโดยเริ่มต้นนั้น เราจะเปิดหน้า Graphic User Interface(GUI) ขึ้นมา ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจะปรากฏรูปโครงสร้างของชิ้นงานเพื่อประกอบระหว่างควบคุมมอเตอร์แต่ละตัวโดยจะมีชื่อเรียกของแต่ละตัว ได้แก่ Waist axis, Shoulder axis, Elbow axis และ Wrist axis พร้อมด้วยปุ่มในการสั่งให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกา รวมถึงปุ่มควบคุมการเคลื่อนที่ในแกน XYZ นอกจากนี้ยังมีปุ่มอื่นๆ รายละเอียดดังนี้

ปุ่ม TEACH ใช้ในการบันทึกตำแหน่งปัจจุบันของแขนกล สำหรับการทำงานวนซ้ำในครั้งต่อไป

ปุ่ม DELETE ใช้ในการลบข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้ด้วยการกดปุ่ม TEACH ในครั้งล่าสุดหรือข้อมูลชุดสุดท้ายที่ถูกบันทึกไว้สำหรับการบันทึกเป็นไฟล์

ปุ่ม SAVE ใช้ในการรวมข้อมูลทั้งหมดที่ถูก TEACH ไว้มารวมเป็นไฟล์และบันทึกไว้ในฐานข้อมูลโดยตั้งชื่อไฟล์ได้ตามที่ต้องการ เพื่อที่จะได้เรียกใช้ในการทำงานที่ต้องการทำงานซ้ำ

ปุ่ม OPEN FILE ใช้สำหรับการเปิดหน้าต่างมาเพื่อเลือกไฟล์ที่เคยบันทึกไว้มาใช้งานด้วยการกดปุ่ม RUN และหยุดการทำงานด้วยปุ่ม STOP เสร็จแล้วตั้งชื่อเพื่อบันทึกเป็นไฟล์ไว้เพื่อนำมาใช้งานในการเคลื่อนแบบเดิมซ้ำหลายครั้ง

แถบสเกลบาร์ สำหรับการปรับค่าความเร็วและความเร่งในการทำงานของมอเตอร์

ปุ่ม Home จะมีหน้าที่ในการสั่งให้มอเตอร์หมุนกลับไปยังตำแหน่งมุมอ้างอิง หรือตำแหน่งมุมเริ่มต้น ซึ่งถูกกำหนดไว้ที่ 106.8250 องศา โดยจะใช้วิธีตรวจสอบตำแหน่งปัจจุบันโดยการอ่านค่าสถานะแรงดันที่ขาของ Absolute Encoder ซึ่งจะต่ออยู่กับ MCP23S17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เอกสารที่เผยแพร่เพื่อใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นแต่มีเหตุอันสมควรและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

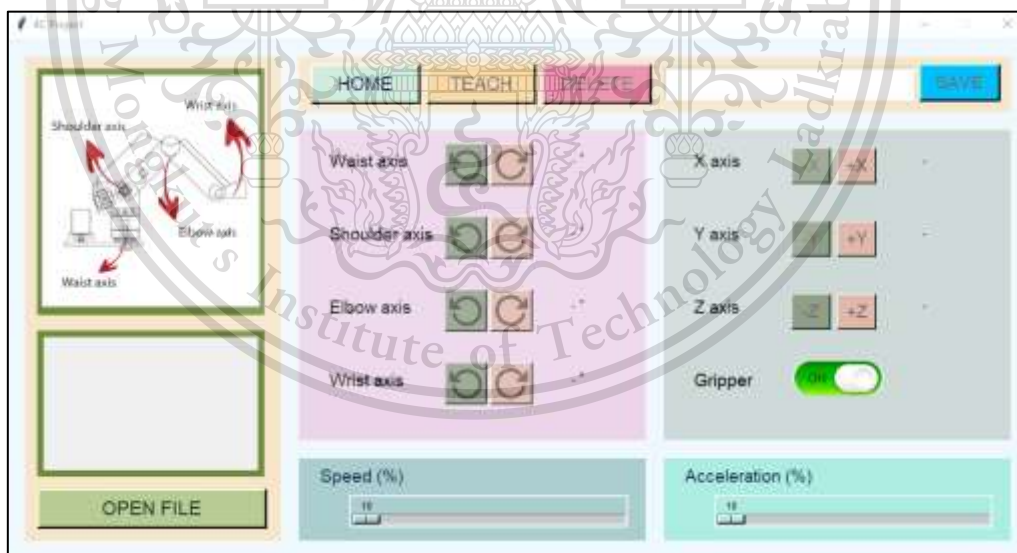
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากนั้น MCP23S17 จะทำการส่งค่าสถานะที่อ่านได้ไปให้ Raspberry pi ประมวลผล โดยจะรับ-ส่งข้อมูลกันแบบ SPI มีรายละเอียดดังนี้

ปุ่ม Waist, Shoulder, Elbow, Wrist axis clockwise และ counter clockwise จะเป็นการสั่งการทำงานมอเตอร์ที่ทำหน้าที่ติดอยู่กับแกนที่กดเลือกให้เคลื่อนที่ไปยังทิศทางที่กำหนด โดยใช้ความเร็วเท่าที่ปรับไว้ตามสเกลบาร์ ซึ่งหากการเคลื่อนที่หลุดออกนอกพื้นที่การทำงานของแขนกล ตัวแขนกลจะหยุดการเคลื่อนไหวทันที (ในส่วนพื้นที่ที่แขนกลส่วนทำงานได้จะอธิบายในหัวข้อต่อไป)

ปุ่ม +x, -x, +y, -y, +z, -z จะเป็นการสั่งให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังทิศทางที่กดเลือก (อ้างอิงการเคลื่อนไหวที่ตำแหน่งปลายของ tool โดยในที่นี้คือ แม่เหล็กไฟฟ้า) ในการทำงาน ของโหมดการทำงานนี้ มอเตอร์จะทำงานแบบร่วมกันพร้อมกัน(synchronous mode) จึงทำให้แขนกลสามารถที่จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงทิศทางที่กำหนดได้ และหากการเคลื่อนที่กำลังจะออกนอกพื้นที่การทำงานของแขนกล ตัวแขนกลจะหยุดการเคลื่อนที่ในทิศทางนั้นในทันที (ในส่วนพื้นที่ที่แขนกลส่วนทำงานได้จะอธิบายในหัวข้อต่อไป)

ปุ่มควบคุมการทำงานของ Tool มีหน้าที่ในการสั่งให้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการหยิบจับ ชิ้นงานทำงาน โดยปุ่มนี้จะไปควบคุมการทำงานของรีเลย์ ดังนั้นเมื่อรีเลย์นำกระแสอุปกรณ์ในที่นี้เป็นแม่เหล็กไฟฟ้า) จึงทำงาน

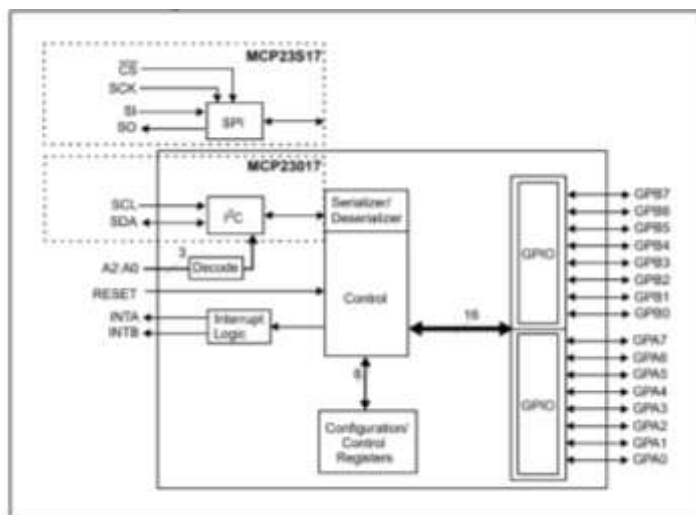


รูปที่ 3.2 แสดงหน้าต่างของ Graphic User Interface (GUI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

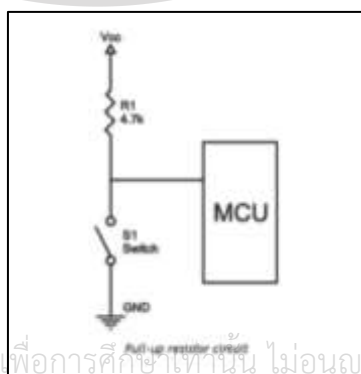
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.3 แสดง Functional Block Diagram ของ MCP23S17

(ที่มา : <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001952C.pdf>)

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าในส่วนวงจรขยายพอร์ตเราใช้ MCP23S17 โดยพอร์ตมี GPA0-GPA7 รับสัญญาณ Input จาก Absolute Encoder และ GPB0-GPB7 รับสัญญาณ Input จาก Absolute Encoder ดังนั้น I/O Port ทั้ง 16 Port ของ MCP23S17 จะเป็น Input Port และขยายสัญญาณจาก Absolute Encoder เพื่อส่งไปยัง Raspberry Pi โดยแต่ละ I/O Port ของ MCP23S17, ไฟเลี้ยง (V_{DD}) และ Reset ของ MCP23S17 จะต่อ Pull UP Resistor ดังรูปที่ 3.4 เพื่อเป็นการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้เป็น HIGH ตลอด Input Pin เหล่านั้น จะอ่านค่าได้ไม่แน่นอนว่าค่าที่รับมาเป็น High หรือ Low เราจึงต้องมีการใส่ตัวต้านทาน Pull-up เพื่อให้สถานะแน่นชัด ส่วนการใส่ Pull UP Resistor ที่ V_{DD} และ Reset ของ MCP23S17 เพื่อป้องกันการลัดกระแส และรักษาแรงดันให้คงที่ เราจะใช้ ตัวต้านทาน $4k7 \Omega$ ในการใช้เป็น Pull UP Resistor



รูปที่ 3.4 แสดง วงจร Pull-UP Resistor

(ที่มา : <https://medium.com/iamgoangle/electronic-101>)

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในส่วนที่เชื่อมต่อระหว่าง Hardware และ Software โดย MCP23S17 เชื่อมโยงกับ Raspberry Pi โดยจะสื่อสารในรูปแบบ SPI เป็นการสื่อสารที่มีโครงสร้างแบบ Master-Slave

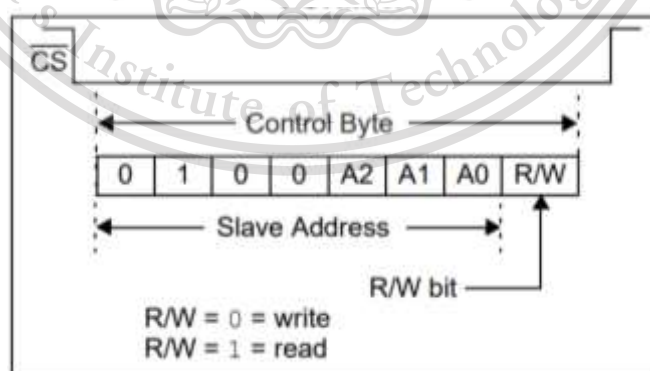
Shift Register ของทั้งฝั่ง Master และ Slave สามารถที่จะส่งข้อมูลออกไปให้อีกฝั่ง พร้อมกับรับข้อมูลที่ถูกส่งเข้ามาได้พร้อมกันในเวลาเดียวกัน ดังนั้น SPI จึงเป็นการสื่อสารแบบ Full Duplex

การดำเนินการเขียน SPI เริ่มต้นโดยการ Lowering $\overline{CS}$ เขียนคำสั่ง (Slave Address) ที่มีการล้าบิต R / W) คือจากนั้นส่ง CLK ลงในอุปกรณ์ ตามด้วย opcode ที่อยู่และข้อมูลอย่างน้อยหนึ่งไบต์

การดำเนินการอ่าน SPI เริ่มต้นโดยการ Lowering $\overline{CS}$ คำสั่งอ่าน SPI (Slave address พร้อมชุดบิต R / W) คือจากนั้นส่ง CLK ลงในอุปกรณ์ ตามด้วย opcode ที่อยู่ โดยมีข้อมูลอย่างน้อยหนึ่งไบต์ที่ถูก Clock out ออกจากอุปกรณ์

การเขียน / อ่านตามลำดับ SPI สำหรับการดำเนินการตามลำดับแทนที่จะยกเลิกการเลือกไฟล์อุปกรณ์โดยการเพิ่ม $\overline{CS}$ นาฬิกาหลักจะเป็นไบต์ถัดไปใช้โดย Address Pointer ลำดับจะจบลงด้วยการเพิ่ม $\overline{CS}$ MCP23S17 Address Pointer จะเลื่อนไปที่ที่อยู่ศูนย์หลังจากถึง register address ล่าสุด

ADDRESSING SPI DEVICES โดย MCP23S17 เป็นอุปกรณ์ Slave SPI มี Slave Address ประกอบด้วยบิตคงที่สี่บิตและผู้ใช้กำหนดสามตัวบิตแอดเดรสฮาร์ดแวร์ (pin A2, A1 และ A0) โดยกรอกข้อมูลบิตอ่าน / เขียนไบต์ ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 แสดง SPI Control byte format ของ MCP23S17

(ที่มา : <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001952C.pdf>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เมื่อทำการ รับ-ส่ง ข้อมูลมาแล้ว Raspberry pi จะทำการประมวลผลข้อมูลที่รับมา เพื่อแปลงเป็นค่าตำแหน่งมูออกมา จากนั้น Raspberry pi จะทำการสั่งให้มอเตอร์วิ่งไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

การทำงานในส่วนของวงจรควบคุม Solenoid Valve โดยเราจะใช้ Solenoid Valve DC 24 V เราจะให้ไฟบวกของ Solenoid เข้าที่ขา NC ของ Relay และไฟลบลงกราวด์ของแหล่งจ่ายไฟ 24 V(DC) แหล่งจ่ายไฟ DC 24V ไฟบวก เข้าที่ขา COM ของ Relay ในส่วนของ Relay จะทำตัวเป็นสวิตช์หนึ่ง เมื่อเรากำหนด input digital กำหนดให้ Relay on จะมีไฟผ่านขดลวดของรีเลย์ทำให้ขา COM ไปที่ขา NC ก็จะทำให้ตัว Solenoid Valve ทำงานและเมื่อเรากำหนด input digital ให้ Relay off จะไม่มีไฟผ่านขดลวดของรีเลย์ ทำให้ขา COM ไปที่ขา NO ก็จะทำให้ตัว Solenoid Valve ไม่ทำงาน เราจำเป็นต้องมีไดโอดที่ตัวขดลวดของรีเลย์เพราะเมื่อเรา Relay off ขดลวดจะมีกระแสสะสมทำให้ส่วนของ Solenoid Valve ยังทำงานอยู่ จึงจำเป็นต้องมีไดโอดเพื่อให้กระแสสะสมไหลภายในเฉพาะขดลวดจนกว่ากระแสสะสมจะหมด และในส่วนของ Input Digital จะมีตัวต้านทาน $1k\Omega$ เป็นตัวลิมิตกระแส และทรานซิสเตอร์ 2N3904 ทำตัวเหมือนสวิตช์ เมื่อกำหนดให้ input digital “on” ทรานซิสเตอร์จะ on และจะทำให้ตัว Relay on ด้วยเช่นกัน

การทำงานในส่วนวงจร Emergency Switch จะมีการต่อแบบ Pull up Resistor เพื่อให้แรงดันอยู่คงที่ในสถานะ High เมื่อเรากดสวิตช์กระแสจะไหลลงกราวด์ซึ่งจะทำให้ Logic output เป็น Low จะเป็น Digital Output ไปที่ Raspberry Pi

3.4 การออกแบบ

3.4.1 Schematic

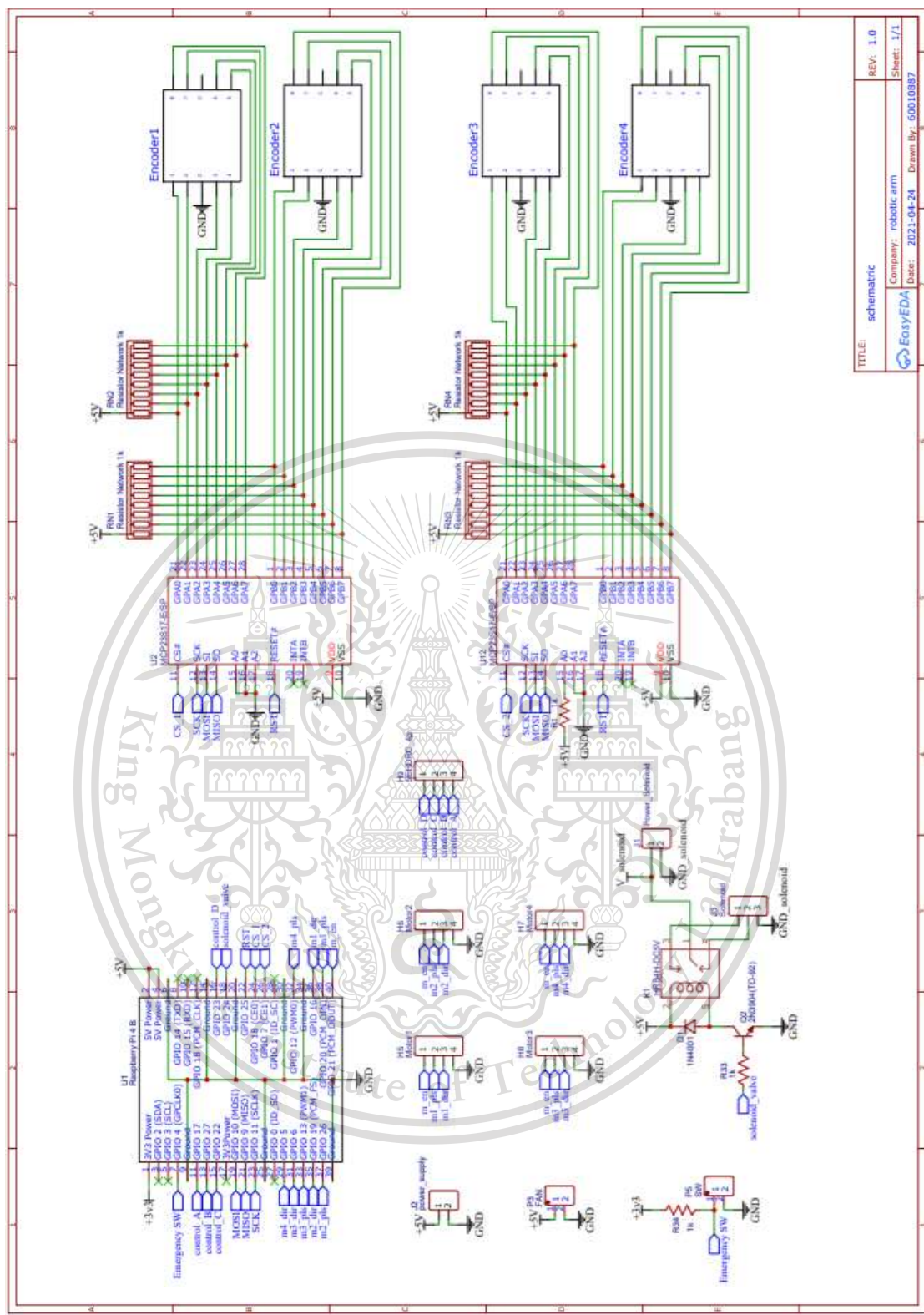
การออกแบบวงจรโดยมีเป้าหมายให้ Raspberry pi สามารถทำงานสั่งการไปยังมอเตอร์ได้ และเพื่อเพิ่มจำนวนอินพุตของ Raspberry pi โดยใช้ MCP13S17 ซึ่งใช้ Protocol การสื่อสารแบบ Serial Peripheral Interface (SPI)

เป็นการออกแบบวงจรทั้งหมดในส่วนของฮาร์ดแวร์ใส่ทุกส่วนได้ ดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.6 แสดง Schematic การทำงานในส่วน Hardware

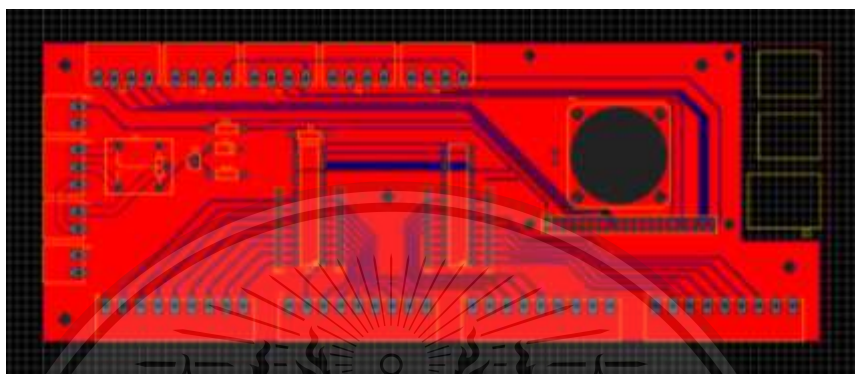
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

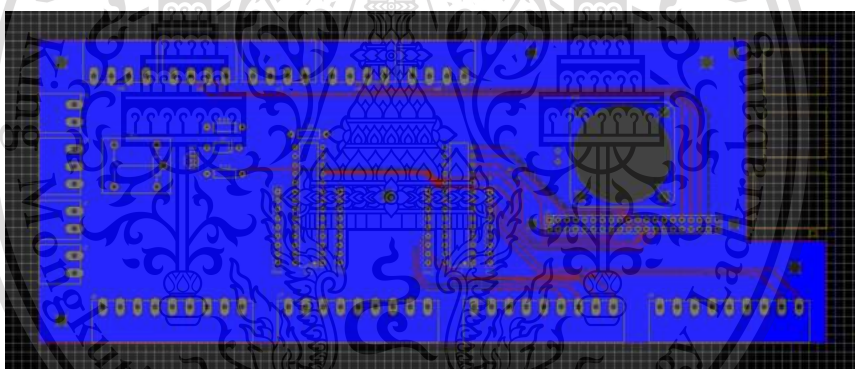
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4.2 PCB Boards

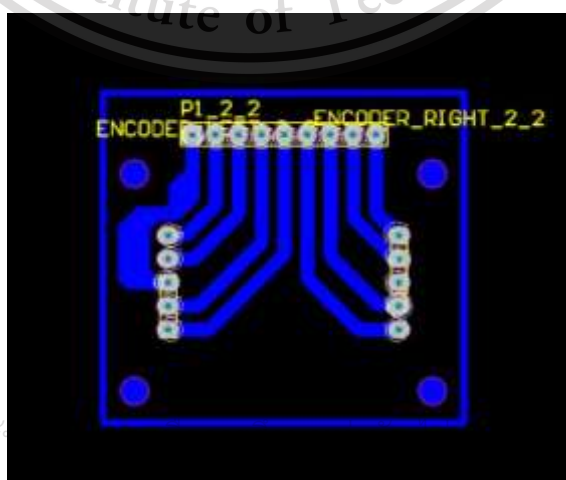
ลายวงจรของ Main board ที่ประกอบไปด้วย Female Header สำหรับการใส่ Raspberry pi, Terminal Block สำหรับการเชื่อมต่อสายไปยังสเต็ปมอเตอร์ไดรฟ์เวอร์, MCP23S17 สำหรับรับสัญญาณอินพุตจาก Encoder และ พัดลมช่วยระบายความร้อนให้กับ Raspberry pi



รูปที่ 3.7 แสดงลาย PCB ด้าน Top Layer ของบอร์ด Hardware



รูปที่ 3.8 แสดงลาย PCB ด้าน Bottom Layer ของบอร์ด Hardware



รูปที่ 3.9 แสดงลาย PCB ของ Absolute Encoder Board

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเป็นต้นแบบและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4.3 ลักษณะของชิ้นงาน

ชิ้นงานประกอบไปด้วยส่วนของแขนกล และส่วนของชุดควบคุมการทำงาน โดยชุดควบคุมการทำงานจะประกอบไปด้วยสเต็ปมอเตอร์ไทร์ฟเวอร์, Raspberry pi, power supply และพัดลมระบายความร้อน

ในส่วนของแขนกลประกอบไปด้วยสเต็ปมอเตอร์, encoder, แม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับหยิบจับชิ้นงาน และโครงสร้างของแขนกล โดยโครงสร้างมีวัสดุหลักคือ เหล็ก และ pvc

โครงสร้างของแขนกลสามารถเคลื่อนที่ออกไปได้ไกลที่สุดเป็นระยะทางรัศมีวงกลม 470 มม. , ระยะที่สามารถเข้ามาใกล้ฐานมากที่สุดเป็นรัศมีวงกลม 330 มม., สามารถทำงานรอบตัวได้ทั้งหมด 200 องศา, สามารถเคลื่อนที่ขึ้นและลง(Z-axis) ได้เป็นระยะทาง 300 มม. และสามารถที่จะรับโหลด(จับชิ้นงานด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า)ได้ 15 นิวตัน

ชุดคอนโทรลจะทราบถึงตำแหน่งของแขนกลได้จากการกดปุ่ม “Home” เพื่อรับค่าจาก encoder และเมื่อเกิดการเคลื่อนไหวขึ้นก็จะทำการอัปเดตตำแหน่งปัจจุบันของแขนกลจากจำนวนพัลส์ที่จ่ายไปยังสเต็ปมอเตอร์ ดังนั้นเมื่อการเคลื่อนที่ต่อไปจะหลุดออกจากพื้นที่การทำงานจะทำให้แขนกลหยุดการทำงานในทิศทางนั้นๆทันที



รูปที่ 3.10 แสดงชิ้นงานเมื่อต่อทุกส่วนเข้าด้วยกันแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองแสดงค่ามุมที่ได้เมื่อควบคุมค่าสถานะของแรงดัน

ในครั้งแรก เป็นการทดลองเพื่อทดสอบโปรแกรมว่า raspberry Pi สามารถติดต่อสื่อสารกับ MCP23S17 ได้อย่างถูกต้องหรือไม่ โดยการต่อ GPIO ของ raspberry Pi เข้ากับ MCP23S17 ด้วยวิธีการต่อแบบ SPI และทำการอ่านค่าสถานะแรงดันที่ Port A ของ MCP23S17 ซึ่งค่าที่จะทำการอ่าน ผู้ทดลองได้ทำการควบคุมแรงดันที่แต่ละขาของ Port A ทั้ง 8 ขา โดยค่าสถานะที่นำมาควบคุมจะตรงตามค่าเอาต์พุตของเอนโคเดอร์ ซึ่งจะทำให้รู้ค่าตำแหน่งเพื่อนำไปคำนวณหาค่ามุม(หน่วยเป็นองศา) โดยในการทดลองครั้งนี้ได้เลือกวัดค่าที่ตำแหน่ง 0, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองแสดงค่ามุมที่ได้เมื่อควบคุมค่าสถานะของแรงดัน

ตำแหน่ง	Decimal o/p	มุม (ทดลอง)	มุม (คำนวณ)	%Error
0	127	0	0	0
30	151	84.3750	84.3750	0
45	195	126.5625	126.5625	0
60	233	168.7500	168.7500	0
75	212	210.9375	210.9375	0
90	74	255.1250	255.1250	0
105	33	295.3125	295.3125	0
120	16	337.5000	337.5000	0

4.1.1 วิธีการคำนวณค่ามุม

จาก Datasheet ของ Absolute encoder จะเห็นว่าทั้งหมด 128 positions คือ 0 ถึง 127 ซึ่งจะเท่ากับ 360 องศา ดังนั้น

$$1 \text{ position} = \frac{360}{128}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{Angle} = (\text{position})(2.8125) \quad (4.1)$$

จะได้ว่า	ตำแหน่งที่ 0	เท่ากับ	0×2.8125	= 0 องศา
	ตำแหน่งที่ 30	เท่ากับ	30×2.8125	= 84.3750 องศา
	ตำแหน่งที่ 45	เท่ากับ	45×2.8125	= 126.5625 องศา
	ตำแหน่งที่ 60	เท่ากับ	60×2.8125	= 168.7500 องศา
	ตำแหน่งที่ 75	เท่ากับ	75×2.8125	= 210.9375 องศา
	ตำแหน่งที่ 90	เท่ากับ	90×2.8125	= 255.1250 องศา
	ตำแหน่งที่ 105	เท่ากับ	105×2.8125	= 295.3125 องศา
	ตำแหน่งที่ 120	เท่ากับ	120×2.8125	= 337.5000 องศา

4.2 ผลการทดลองแสดงค่า Decimal output ที่ได้เมื่อต่อกับเอ็นโค้ดเดอร์

ต่อมาเป็นการทดลองเพื่ออ่านค่าสถานะที่ Port A โดยต่อเข้ากับเอ็นโค้ดเดอร์ต่างจากตอนแรกที่จะควบคุมโดยตรง เป็นการทดสอบว่าค่าที่แสดงผลออกมา มีความผิดพลาดหรือไม่ โดยกำหนดวัดที่มุม $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$ และ 315° แล้วนำค่ามุมดังกล่าวมาคำนวณหาค่าตำแหน่งแล้วไปเทียบดูค่า decimal output จากใน datasheet และเปรียบเทียบกับค่าที่แสดงผลออกมาได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองแสดงค่า Decimal output ที่ได้เมื่อต่อกับเอ็นโค้ดเดอร์

มุม(องศา)	ตำแหน่ง (คำนวณ)	Decimal o/p (Datasheet)	Decimal o/p (ทดลอง)	%Error
0	0	127	127	0
45	16	191	191	0
90	32	223	223	0
135	48	239	239	0
180	64	247	247	0
225	80	251	251	0
270	96	253	253	0
315	112	254	254	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.2.1 วิธีการคำนวณค่าตำแหน่ง (Position)

จาก สมการที่ (4.1) จะได้ว่า

ที่	0	องศา	ตรงกับตำแหน่งที่	$\frac{0}{2.8125}$	= 0
ที่	45	องศา	ตรงกับตำแหน่งที่	$\frac{45}{2.8125}$	= 16
ที่	90	องศา	ตรงกับตำแหน่งที่	$\frac{90}{2.8125}$	= 32
ที่	135	องศา	ตรงกับตำแหน่งที่	$\frac{135}{2.8125}$	= 48
ที่	180	องศา	ตรงกับตำแหน่งที่	$\frac{180}{2.8125}$	= 64
ที่	225	องศา	ตรงกับตำแหน่งที่	$\frac{225}{2.8125}$	= 80
ที่	270	องศา	ตรงกับตำแหน่งที่	$\frac{270}{2.8125}$	= 96
ที่	315	องศา	ตรงกับตำแหน่งที่	$\frac{315}{2.8125}$	= 112

4.3 ผลการทดลองความแม่นยำของการกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นของมอเตอร์

เป็นการทดลองว่าเมื่อนำทุกส่วนมาประกอบรวมกัน เพื่อทดสอบการทำงานร่วมกันของทุกส่วน ซึ่งการทดลองส่วนนี้ จะเป็นการทดสอบการทำงานของปุ่ม Home บนหน้า Graphic User Interface (GUI) ว่าเมื่อกดปุ่มนี้แล้ว มีความแม่นยำของ Stepper motor ในการกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นหรือตำแหน่งอ้างอิง (กำหนดไว้ที่ตำแหน่ง 171.5625 องศา) มากน้อยเพียงใด โดยจะทำการทดสอบจำนวน 15 ครั้ง ซึ่งจะทดสอบความแม่นยำของการที่ประมวลผลออกมาระหว่างการวัดจาก Encoder แบบไม่มีการหน่วงเวลา, มีการหน่วงเวลา 100 ms. และแบบมีการหน่วงเวลา 500 ms. ซึ่งความแม่นยำนี้ มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะเมื่อได้มีการระบุตำแหน่งมุมที่ต้องการ หากมีค่าความแม่นยำต่ำ จะส่งผลทำให้มีความคลาดเคลื่อนต่อตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งผลการทดสอบความแม่นยำ ได้ดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองความแม่นยำในการกลับสู่ตำแหน่งอ้างอิง

ครั้งที่	ตำแหน่ง (วัดจาก Encoder)			ผลการวิเคราะห์	
	Delay (0 ms.)	Delay (100 ms.)	Delay (500 ms.)	ความแม่นยำของ ค่าที่วัด	ความถูกต้อง (Home)
1	196.8750	174.3750	171.5625	แม่นยำที่ Delay สูง	ถูกต้อง
2	171.5625	171.5625	171.5625	แม่นยำทุกกรณี	ถูกต้อง
3	171.5625	171.5625	171.5625	แม่นยำทุกกรณี	ถูกต้อง
4	171.5625	171.5625	171.5625	แม่นยำทุกกรณี	ถูกต้อง
5	171.5625	171.5625	171.5625	แม่นยำทุกกรณี	ถูกต้อง
6	168.7500	168.7500	168.7500	แม่นยำทุกกรณี	คลาดเคลื่อน 1.6393 %
7	171.5625	171.5625	171.5625	แม่นยำทุกกรณี	ถูกต้อง
8	171.5625	171.5625	171.5625	แม่นยำทุกกรณี	ถูกต้อง
9	171.5625	171.5625	171.5625	แม่นยำทุกกรณี	ถูกต้อง
10	151.8750	171.5625	171.5625	แม่นยำเมื่อมี Delay	ถูกต้อง
11	101.2500	160.3125	171.5625	แม่นยำที่ Delay สูง	ถูกต้อง
12	171.5625	171.5625	171.5625	แม่นยำทุกกรณี	ถูกต้อง
13	185.6250	174.3750	174.3750	แม่นยำเมื่อมี Delay	คลาดเคลื่อน 1.6393 %
14	168.7500	171.5625	171.5625	แม่นยำเมื่อมี Delay	ถูกต้อง
15	171.5625	171.5625	171.5625	แม่นยำทุกกรณี	ถูกต้อง
ผลรวม	2517.1875	2565	2573.4375	-	-
ค่าเฉลี่ย	167.8125	171.0000	171.5625	-	-
%Error	2.1858	0.3279	0	-	13.3333

4.3.1 ยกตัวอย่างการคำนวณ

จากสมการหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาของเอกสารนี้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.2)$$

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ยกตัวอย่างการคำนวณ จากสมการที่ 4.2 จะได้ว่า ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งเมื่อไม่มีการ
 หน่วงเวลา เท่ากับ

$$\bar{x} = \frac{2517.1875}{15} = 167.8125$$

จากสมการหา เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

$$\%Error = \frac{|Exact\ value - Approximate\ value|}{Exact\ value} \times 100 \quad (4.3)$$

ยกตัวอย่างการคำนวณ จากสมการที่ 4.3 จะได้ว่า %Error ของตำแหน่งเมื่อไม่มีการ
 หน่วงเวลา เท่ากับ

$$\%Error = \frac{|171.5625 - 167.8125|}{171.5625} \times 100 = 2.1858 \%$$

%Error ของความแม่นยำในการกลับเข้าสู่ตำแหน่งเริ่มต้น เท่ากับ

$$\%Error = \frac{2}{15} \times 100 = 13.3333 \%$$

4.4 ผลการทดลองความถูกต้องของค่าที่แสดงผลและค่าตำแหน่ง

การทดลองส่วนนี้เป็นการทดสอบการทำงานร่วมกันของส่วนฮาร์ดแวร์, โดยเมื่อเชื่อมต่อกัน
 เรียบร้อยแล้วจะเปิดหน้า GUI จากนั้นจะควบคุมให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนด เมื่อ
 มอเตอร์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งนั้นๆ จะมีการวัดตำแหน่งด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ บันทึกค่าที่แสดงบนหน้า
 GUI และค่าตำแหน่งของเอ็นโค้ดเดอร์ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองความถูกต้องของค่าที่แสดงผลและค่าตำแหน่ง

ตำแหน่งที่ ต้องการ	ค่าแสดง บน GUI	%Error ของ ค่าแสดงผล	ตำแหน่ง (Encoder)	ตำแหน่ง (คำนวณ*)	%Error ของ ตำแหน่งที่วัด
15	15.03	0.2000	188.4375	186.5625	1.0050
30	29.97	0.1000	199.6875	201.5625	0.9302
45	45.09	0.2000	216.5625	216.5625	0.0000
90	90.00	0.0000	261.5625	261.5625	0.0000
180	180.00	0.0000	351.5625	351.5625	0.0000
240	240.03	0.0125	50.6250	51.5625	1.8182
270	270.00	0.0000	78.7500	81.5625	3.4483
300	299.97	0.2000	109.6875	111.5625	1.0050

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามนำไปดัดแปลง และนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คำนวณ* ในกรณีนี้ ค่าตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณครั้งนี้จะมาจากการรวมกันของค่าตำแหน่งมุมเริ่มต้นกับค่าตำแหน่งมุมที่ต้องการให้เคลื่อนที่ไป กล่าวคือ

$$\text{ตำแหน่งมุมปัจจุบัน} = \text{ตำแหน่งมุมเริ่มต้น} + \text{ตำแหน่งมุมที่ต้องการ} \quad (4.4)$$

เนื่องจากที่ตำแหน่ง Home หรือตำแหน่งมุมเริ่มต้นการทำงานที่ถูกตั้งค่าไว้มีค่าไม่เท่ากับ 0 ดังนั้น จึงต้องทำการบวกค่าตำแหน่งมุมเริ่มต้นเข้าไปด้วยเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ตำแหน่งของ Encoder ที่ทดลองออกมาได้

4.4.1 ยกตัวอย่างการคำนวณ

ณ ตำแหน่งที่ต้องการ 15 องศา

จากสมการที่ 4.3 จะได้ %Error ของค่าที่แสดงผล เท่ากับ

$$\%Error = \frac{|15 - 15.03|}{15} \times 100 = 0.2000 \%$$

จากสมการที่ 4.4 จะได้ค่าตำแหน่งปัจจุบันที่ Encoder วัดได้ เท่ากับ

$$\text{ตำแหน่งมุมปัจจุบัน} = 171.5625 + 15$$

$$\text{ตำแหน่งมุมปัจจุบัน} = 186.5625$$

4.5 ผลการทดลองการเคลื่อนที่เข้าตำแหน่งโฮม (Referent Position)

การทดลองส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่กลับเข้าสู่ตำแหน่งโฮม เนื่องจากความแม่นยำในการเคลื่อนที่เข้าตำแหน่งโฮมมีความสำคัญเป็นอย่างมากเพราะหากผิดพลาดจะส่งผลให้การใช้งานผิดพลาดจึงต้องมีความแม่นยำสูงเพื่อการใช้งานที่มีประสิทธิภาพจึงได้ทดสอบโดยการทดลองให้แขนกลเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งโฮม หลังจากนั้นกดปุ่มโฮมเพื่อให้ robot เคลื่อนที่กลับมาตำแหน่งโฮมดังเดิมจากนั้นนำฉากวัดองศามาตรวัดขนาดมุมที่ได้และบันทึกค่าลงในตาราง โดยทำการทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองเคลื่อนที่เข้าตำแหน่งโฮม

ครั้งที่	Waist axis (องศา)	Shoulder axis (องศา)	Elbow axis (องศา)	Wrist axis (องศา)
1	90	45	107	0
2	90	45	107	0
3	90	45	107	0
4	90	45	107	0
5	90	45	107	0

4.6 ผลการทดลองหาระยะการเคลื่อนที่

การทดลองนี้เป็นการทดลองให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งโฮม จากนั้นจะให้แขนกลเคลื่อนที่ในแกน x, y, z จนกว่าจะถึงขอบของพื้นที่การทำงาน เพื่อที่เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จนถึงขอบของพื้นที่การทำงาน แขนกลจะหยุดการเคลื่อนที่ทันที จากนั้นอ่านค่าที่แสดงผลบนหน้า GUI พร้อมทั้งใช้ตลับเมตรวัดระยะทางที่เคลื่อนที่ไป เพื่อหาระยะที่ไกลที่สุดที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปทำงานได้ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองหาระยะการเคลื่อนที่

ทดสอบ limit end	สถานะ การตัด การทำงานของ มอเตอร์	อ่านได้จาก GUI			ที่ระยะวัดได้		
		x	y	z	x	y	z
max x	ได้	469.98	0.3	0.4	471	0	1
min x	ได้	-469.72	0	1.2	468	0	3
min y	ได้	0	330.43	-0.4	0	329	0
max y	ได้	0	470.2	0.6	0	469	0
max z	ได้	0	346.5	99.8	0	344	101
min z	ได้	0	346.9	-199.81	0	344	-197

4.7 ผลการทดลองความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability)

ในการทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองเพื่อหาความคาดเคลื่อนของการทำงานซ้ำของแขนกล เอกสารนี้เป็นเอกสารจริงของแขนกลนั้นจะเป็นการทำงานที่ซ้ำไปซ้ำมาหลายครั้ง ดังนั้นถ้าหากว่าการเคลื่อนใหม่มีการคาดเคลื่อนอาจจะทำให้ชิ้นงานหรือตัวแขนกลเสียหายได้ เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การทดลองควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการจากนั้นใช้ไม้บรรทัดและเวอร์เนียในการวัด จากนั้นให้โรบอทเคลื่อนที่กลับตำแหน่งโฮมและทำเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอื่นๆ ต่อๆ ไป ได้ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองความสามารถในการทำซ้ำ

ครั้งที่	ค่าที่ต้องการ		ค่าที่วัดได้		%Error	
	X	y	x	y	x	y
1	324.33	215.24	323	215	0.4101	0.1115
2	236.51	247.92	236.5	258.3	0.0042	4.1868
3	280.56	173.75	278	170	0.9125	2.1583
4	412.41	174	400	169.7	3.0091	2.4713
5	365.04	122.49	359.5	118.1	1.5176	3.5840

4.7.1 ยกตัวอย่างการคำนวณ

ณ ครั้งที่ 1

จากสมการที่ 4.3 จะได้ %Error ของค่า x เท่ากับ

$$\%Error = \frac{|324.33 - 323|}{324.33} \times 100 = 0.4101 \%$$

และจะได้ %Error ของค่า y เท่ากับ

$$\%Error = \frac{|215.24 - 215|}{215.24} \times 100 = 0.1115 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การแสดงผลของแขนกล (User Interface)

แขนกลสามารถควบคุมได้จากหน้าจอแสดงผลของ Raspberry pi ซึ่งเป็นการเขียนด้วยภาษาไพทอน โดยสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละข้อต่อของแขนกล เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จนถึงเป้าหมายแล้วหน้าจอจะแสดงตำแหน่งปัจจุบันของแขนกล สาเหตุที่จะต้องแสดงตำแหน่งบนหน้าจอเพราะเมื่อการเคลื่อนที่ได้จบลงแล้วนั้นก็เป็นที่เพราะว่า ตัวคอนโทรลเลอร์ที่นำมาใช้นั้นไม่สามารถที่จะประมวลผลและแสดงผลขึ้นบนหน้าจอได้ทัน นอกจากนั้นยังสามารถสั่งการให้แขนกลเคลื่อนที่ในระนาบเดียวกับพื้นโลกหรือขึ้นลงตามแนวตั้งได้อีกด้วย ซึ่งเมื่อการเคลื่อนที่จบลง หน้าจอแสดงผลก็จะแสดงตำแหน่งปัจจุบันที่แขนกลหยุดอยู่

5.1.2 การทดลองการหาตำแหน่งอ้างอิง (Home Position)

ทดลองโดยการให้แขนกลเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งอ้างอิง จากนั้นทำการกดปุ่มให้แขนกลเคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งอ้างอิง แต่เนื่องจาก absolute encoder มีความละเอียดมากไม่พอ จึงใช้ตำแหน่งอ้างอิงเป็นบริเวรรอยต่อสองตำแหน่งที่ติดกันของ encoder เป็นตำแหน่งอ้างอิงเพื่อเพิ่มความแม่นยำ

Absolute encoder เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สายไฟเป็นจำนวนมากจึงจำเป็นต้องใช้ I/O เพิ่มจากตัว MCP23S17 เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งานครบทั้ง 4 แกนของแขนกล โดย MCP23S17 จะเชื่อมต่อกับ Raspberry pi ด้วย SPI Protocol (สื่อสารกันด้วยความ)

หลังจากที่แขนกลเคลื่อนที่เข้าตำแหน่งอ้างอิงเรียบร้อยแล้วจึงใช้ฉากวัดองศาเพื่อวัดมุมองศาที่เกิดขึ้นของแต่ละแกน จึงได้พบว่ามีองศาที่ได้หลังจากเคลื่อนที่เข้าตำแหน่งอ้างอิงนั้นมีความแม่นยำ ซึ่งความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการอ่านสเกลวัดบนฉากวัดองศาด้วยสายตา แต่พื้นผิวที่นำมาใช้อ้างอิงก็มีความเอียงเล็กน้อย

5.1.3 การทดสอบการเคลื่อนที่ออกนอกระยะที่กำหนด (Exceed Limit Test)

จากการทดสอบพบว่าแขนกลไม่สามารถเคลื่อนที่ออกนอกระยะที่กำหนดได้ โดยเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่เข้าใกล้ระยะขอบของการเคลื่อนที่ แขนกลจะทำการลดความเร็ว, จะหยุดและไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปยังทิศทางที่จะออกนอกพื้นที่การทำงานต่อไปได้อีกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การป้องกันการเคลื่อนที่ออกนอกพื้นที่การทำงานช่วยป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นแกนกลเมื่อเคลื่อนที่ออกนอกพื้นที่ เช่น เป็นการป้องกันสายไฟตรงจนเกินไป เป็นต้น โดยรัศมีการเคลื่อนที่ที่ไกลที่สุดคือ 470 มม. ระยะเคลื่อนที่เข้าใกล้ฐานมากที่สุดคือ 330 มม. ระแนบการทำงานที่สูงที่สุดคือ 100 มม. และต่ำที่สุดคือ -190 มม.

5.1.4 ส่วนการทดลองการทำงานของแกนกล

การทดลองการทำงานของแกนกลจะทำการเคลื่อนไหวแกนกลไปยังตำแหน่งต่างๆ และทำการวัดระยะทางที่เกิดขึ้นด้วยตลับเมตร, ไม้บรรทัด, เวอร์เนีย จากนั้นจะนำระยะทางที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับระยะทางที่แสดงผลของแต่ละมอเตอร์

จากนั้นทดลองจะเห็นได้ว่า ระยะที่วัดได้นั้นมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดมาจากสเกลการวัดมีความละเอียดมากไม่พอ และ หากมอเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจะทำให้ระยะทางที่ได้มีความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นตามเพราะว่า การเคลื่อนไหวที่รวดเร็วของมอเตอร์นั้นจะต้องอาศัยกระแสที่ไหลผ่านขดลวดมอเตอร์ที่มากพอ ดังนั้นหากมอเตอร์เคลื่อนที่เร็วจนเกินไปอาจจะทำให้มอเตอร์หยุดหมุนในบางจังหวะได้ ส่งผลให้ระยะที่ได้นั้นมีความคลาดเคลื่อน นอกจากนั้นเนื่องด้วยมอเตอร์ที่ใช้นั้นมีความสามารถในการรับแรงไม่ได้มากนัก จึงทำให้มีข้อจำกัดในการแบกรับน้ำหนักของตัวแกนกล

5.2 ปัญหา อุปสรรค และการแก้ไข

เนื่องด้วย Raspberry pi มีข้อจำกัดทางด้านความเร็วในการประมวลผลจึงทำให้ไม่สามารถแสดงผลออกมาทางหน้าจอแสดงผลได้ตลอดเวลา จึงจำเป็นที่จะต้องหยุดการแสดงผลค่ามุมมองศาในขณะประมวลผลส่วนอื่น

สเต็ปมอเตอร์ที่ใช้นั้นเป็นมอเตอร์ที่มีขนาดเล็ก จึงไม่สามารถที่จะรับพัลส์ด้วยความถี่สูงอย่างต่อเนื่องได้ เนื่องจากจะให้เกิดความร้อนจำนวนมากจนทำให้มอเตอร์หยุด หรือ อาจจะสร้างความเสียหายต่อตัวมอเตอร์ได้ โดยปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการลดความถี่ของพัลส์ที่มอเตอร์ได้รับ (มอเตอร์จะเคลื่อนที่ได้ช้าลง), ลดกระแสที่ไดร์ฟเวอร์จ่ายไปยังมอเตอร์ (ส่งผลให้-มอเตอร์มีแรงบิดที่ลดลง), มีเวลาให้มอเตอร์ได้หยุดพักเพื่อคายความร้อน, ควรจะติดตั้งอลูมิเนียมระบายความร้อน (Heat Sink) และ พัดลมให้กับมอเตอร์

การเคลื่อนที่ที่เกิดความผิดพลาดนั้นเกิดจากมอเตอร์ไม่มีแรงมากพอที่จะแบกรับภาระของแกนกลในจังหวะที่เกิดแรงเหวี่ยงได้ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้สเต็ปมอเตอร์ที่มีแรงบิดที่สูงกว่านี้ เพื่อที่จะสามารถรับภาระหนักของส่วนแกนได้ แต่เนื่องด้วยภายในระยะเวลาของโครงการครั้งนี้ไม่สามารถที่จะจัดหามอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ได้ทัน จึงจำเป็นที่จะต้องแก้ไขด้วยการลดความเร็ว, ความเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารในการเคลื่อนที่ เพื่อที่จะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงน้อยที่สุด และ เลือกใช้การทำงานของสเต็ปมอเตอร์ในการคำนวณการเคลื่อนที่แบบ full step (200 pulse per revolution) อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การเคลื่อนที่เข้าไปยังตำแหน่งอ้างอิง (Home Position) จะมีความแม่นยำมากขึ้นได้หากใช้ Absolute Encoder ที่มีตำแหน่งมากกว่านี้(ตัวที่ใช้้นั้นสามารถตรวจจับระยะได้เพียง 128 มุม หรือก็คือ 2.8125 ต่อ 1 ตำแหน่ง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บรรณานุกรม

- [1.] การเคลื่อนที่ : <http://th.wikipedia.org/> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ. 2563).
- [2.] แรงคืออะไร : <https://sites.google.com/site/somo34bangli/> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ. 2563).
- [3.] มวล แรง และกฎการเคลื่อนที่ : <https://sites.google.com/site/mattayom46/science/raeng-laea-kar-kheluxnithi/2-mwl-raeng-laea-kd-kar-kheluxnithi> (วันที่ ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ. 2563).
- [4.] กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน : <https://sites.google.com/site/khaimook770/raeng-laea-kar-kheluxnithi/kd-kar-kheluxnithi-khxng-ni-w-tan> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ. 2563).
- [5.] การเคลื่อนที่แนวตรง : <https://rectilinearmotion.wordpress.com/> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).
- [6.] ความรู้เบื้องต้นและการทำงานของ Step motor : <http://www.thaiio.com/Hardware/stepmotor.htm> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ. 2563).
- [7.] การทำงานของ Stepping motor : <https://mall.factomart.com/principle-of-stepping-motor/> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ. 2563).
- [8.] Step motor : <http://www.advance-electronic.com/blog/detail/107/8C.html> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 มีนาคม พ.ศ.2563).
- [9.] ชนิดของ Step motor : <https://www.arduino2robot.com/article/8/> (วันที่ ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).
- [10.] การต่อสายไฟ : <https://www.arduino2robot.com/article/8/> (วันที่ ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).
- [11.] Raspberry Pi : <https://www.scimath.org/article-technology/item/9104-raspberry-pi> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).
- [12.] Raspberry Pi คืออะไร : <https://www.arduino-makerzone.com/article/57/> (วันที่ ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).
- [13.] Raspberry Pi 4 Model B : <https://www.arduinoall.com/product/3472/raspberry-pi-4-model-b-4gb> (วันที่ ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).
- [14.] เ็นโค้ดเดอร์คืออะไร : <https://mall.factomart.com/what-is-encoder/> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เพื่อประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [15.] **ประเภทของโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์** : <https://mall.factomart.com/type-of-rotary-encoder/> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).
- [16.] **อุปกรณ์เสริมประสิทธิภาพเอ็นโค้ดเดอร์** : <https://mall.factomart.com/accessories-of-rotary-encoder/> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).
- [17.] **เอ็นโค้ดเดอร์ในโรงงาน** : https://www.tngroup.co.th/media/article_detail/485 (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).
- [18.] **การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI** : <https://blog.thairasyelec.com/espino32-ch9-how-to-use-spi/> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).
- [19.] **Data Sheet ของ Absolute Encoder** : <http://docs.rs-online.com/ebc1/0900766b8002b224.pdf> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).
- [20.] **Data Sheet ของ MCP23S17** : <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001952C.pdf> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 7 กันยายน พ.ศ.2563).
- [21.] **รีเลย์คืออะไร** : <http://www.pspotech.co.th/%A3-15696.page> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 1 มีนาคม พ.ศ.2564).
- [22.] **การทำงานของรีเลย์** : <http://www.micronsupply.com/article/1/%8C-relay> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 1 มีนาคม พ.ศ.2564).
- [23.] **ทรานซิสเตอร์คืออะไร** : <https://edltv.thai.net/courses/135/50scM3-MO050401.htm> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 1 มีนาคม พ.ศ.2564).
- [24.] **ประเภทของทรานซิสเตอร์** : <https://commandronestore.com/learning/transistor000.php> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 1 มีนาคม พ.ศ.2564).
- [25.] **การทำงานของทรานซิสเตอร์** : http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=2511 (วันที่ค้นหาข้อมูล: 1 มีนาคม พ.ศ.2564).
- [26.] **ไดโอดคืออะไร** : <http://www.pspotech.co.th/%A3-15184.page> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 1 มีนาคม พ.ศ.2564).
- [27.] **ชนิดของไดโอด** : <https://sites.google.com/site/chniddixod/> (วันที่ค้นหาข้อมูล: 1 มีนาคม พ.ศ.2564).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โปรแกรมส่วนต่างๆ

หน้าโปรแกรมหลักในการควบคุมการทำงานทั้งหมดในโครงงานนี้ก็คือหน้า GUI นั่นเอง มีการออกแบบดังนี้

```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk
from tkinter import *
import pickle
import numpy as np
import os
from calculate import*

import threading
import urllib
from PIL import Image
import time

try:
    from pi_gpio import *
    gpio_setup()
    from mcp import *
    spi_setup()
    print("import success")
except:
    from in_com_test import *
    print("import unsuccess")

auto_mode = 0
ccw_1, cw_1, ccw_2, cw_2, ccw_3, cw_3, ccw_4, cw_4 = 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
nx, px, ny, py, nz, pz = 0, 0, 0, 0, 0, 0
pulse_pin = [var.m1_pls,var.m2_pls,var.m3_pls,var.m4_pls]
direction_pin = [var.m1_dir,var.m2_dir,var.m3_dir,var.m4_dir]
m1_angle, m2_angle, m3_angle, m4_angle = [0,0,0,0]

root = Tk()
root.geometry('1120x570')
root.configure(background='#F0F8FF')
root.title('4C Project')
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

root.option_add("**font","arial 20 normal")

T_frame = Frame(root, width=780, height=60, bg='#F8E6CB')
T_frame.place(x=320, y=20)
BL_frame = Frame(root, width=380, height=90, bg='#ABCFD1')
BL_frame.place(x=320, y=460)
BR_frame = Frame(root, width=380, height=90, bg='#ADEEE2')
BR_frame.place(x=720, y=460)
L_frame = Frame(root, width=280, height=530, bg='#F8E6CB')
L_frame.place(x=20, y=20)
C_frame = Frame(root, width=380, height=340, bg='#ECD4EA')
C_frame.place(x=320, y=100)
R_frame = Frame(root, width=380, height=340, bg='#CDDAD8')
R_frame.place(x=720, y=100)
pic_area =Frame(L_frame, width=249, height=270, bg='#6E8B3D')
pic_area.place(x=13, y=13)
pic = PhotoImage(file = "4dof_pic.png")
Label(pic_area, image = pic).place(x=5, y=7)

text_area =Frame(L_frame, width=249, height=160, bg='#6E8B3D')
text_area.place(x=13, y=300)
text_frame =Frame(text_area, width=235, height=146)
text_frame.place(x=7, y=7)

# global del_btn, sv_btn, get_name, speed, acc, c, c2, y, x, get_data, teach_pos
get_data, teach_pos,run_status,read_data = [], [], 0, []
thread1_state = 1
thread2_state = 1
c, c2, x, y = 0, 0, 0, 0
b4 = "off" # gripper status

#----- check file -----
def ch_listdir():
    global fileN
    fileN = os.listdir()
    fileN.remove("4dof_pic.png")
    fileN.remove("ccw.png")
    fileN.remove("cw.png")
    fileN.remove("off.png")
    fileN.remove("on.png")
    fileN.remove("var.py")

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดให้ติดต่อผู้จัดทำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

fileN.remove("mcp.py")
fileN.remove("calculate.py")
fileN.remove("Main.py")
fileN.remove("in_com_test.py")
fileN.remove("pi_gpio.py")
try:
    fileN.remove("__pycache__")
except:
    pass

#----- switch gripper -----
def switch_tool():
    global is_on_1, b4
    if is_on_1:
        on_button1.config(image = off_1)
        is_on_1 = False
        b4 = "off"
    else:
        on_button1.config(image = on_1)
        is_on_1 = True
        b4 = "on"
    return b4

#----- Read & Write file -----
def RFile():
    global read
    rfile = os.listdir()
    count = len(rfile)
    for i in range(count):
        if rfile[i] == cmb.get():
            file = open(cmb.get(), 'rb')
            read = pickle.load(file)
            # print("Read: ", read)
    return read

def Wfile():
    name = get_name.get() + ".txt"
    file = open(name, 'wb')
    pickle.dump(get_data, file)
    file.close()

def btn_H0:

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หากมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

# Gpio_setup()
global m1_angle, m2_angle, m3_angle, m4_angle

val_m4 = get_mcp_m4()
val_m3 = get_mcp_m3()
val_m2 = get_mcp_m2()
val_m1 = get_mcp_m1()

m1_t = var.m1_dstep/(2*var.m1_vmax*speed.get()/100)
m2_t = var.m2_dstep/(2*var.m2_vmax*speed.get()/100)
m3_t = var.m3_dstep/(2*var.m3_vmax*speed.get()/100)
m4_t = var.m4_dstep/(2*var.m4_vmax*speed.get()/100)

e4_home = 289.6875
e3_home = 185.625
e2_home = 222.1875
e1_home = 171.5625
if val_m4 >= e4_home:
    m4_set(0)
    while val_m4 >= e4_home-3:
        m4_move(1)
        time.sleep(m4_t)
        m4_move(0)
        time.sleep(m4_t)
        val_m4 = get_mcp_m4()
    m4_set(1)
    while val_m4 < e4_home:
        m4_move(1)
        time.sleep(m4_t)
        m4_move(0)
        time.sleep(m4_t)
        val_m4 = get_mcp_m4()
else:
    m4_set(1)
    while val_m4 <= e4_home-3:
        m4_move(1)
        time.sleep(m4_t)
        m4_move(0)
        time.sleep(m4_t)
        val_m4 = get_mcp_m4()

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

while val_m4 > e4_home:
    m4_move(1)
    time.sleep(m4_t)
    m4_move(0)
    time.sleep(m4_t)
    val_m4 = get_mcp_m4()

if val_m2 >= e2_home:
    m2_set(0)
    while val_m2 >= e2_home-3:
        m2_move(1)
        time.sleep(m2_t)
        m2_move(0)
        time.sleep(m2_t)
        val_m2 = get_mcp_m2()
    m2_set(1)
    while val_m2 < e2_home:
        m2_move(1)
        time.sleep(m2_t)
        m2_move(0)
        time.sleep(m2_t)
        val_m2 = get_mcp_m2()
    else:
        m2_set(1)
        while val_m2 <= e2_home-3:
            m2_move(1)
            time.sleep(m2_t)
            m2_move(0)
            time.sleep(m2_t)
            val_m2 = get_mcp_m2()
        m2_set(0)
        while val_m2 > e2_home:
            m2_move(1)
            time.sleep(m2_t)
            m2_move(0)
            time.sleep(m2_t)
            val_m2 = get_mcp_m2()

```

```

if val_m3 >= e3_home:
    m3_set(0)
    while val_m3 >= e3_home-3:

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

    m3_move(1)
    time.sleep(m3_t)
    m3_move(0)
    time.sleep(m3_t)
    val_m3 = get_mcp_m3()
    m3_set(1)
    while val_m3 < e3_home:
        m3_move(1)
        time.sleep(m3_t)
        m3_move(0)
        time.sleep(m3_t)
        val_m3 = get_mcp_m3()
    else:
        m3_set(1)
        while val_m3 <= e3_home-3:
            m3_move(1)
            time.sleep(m3_t)
            m3_move(0)
            time.sleep(m3_t)
            val_m3 = get_mcp_m3()
        m3_set(0)
        while val_m3 > e3_home:
            m3_move(1)
            time.sleep(m3_t)
            m3_move(0)
            time.sleep(m3_t)
            val_m3 = get_mcp_m3()

    if val_m1 >= e1_home:
        m1_set(1)
        while val_m1 >= e1_home-3:
            m1_move(1)
            time.sleep(m1_t)
            m1_move(0)
            time.sleep(m1_t)
            val_m1 = get_mcp_m1()
        m1_set(0)
        while val_m1 < e1_home:
            m1_move(1)
            time.sleep(m1_t)
            m1_move(0)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

        time.sleep(m1_t)
        val_m1 = get_mcp_m1()
    else:
        m1_set(0)
        while val_m1 <= e1_home-3:
            m1_move(1)
            time.sleep(m1_t)
            m1_move(0)
            time.sleep(m1_t)
            val_m1 = get_mcp_m1()
        m1_set(1)
        while val_m1 > e1_home:
            m1_move(1)
            time.sleep(m1_t)
            m1_move(0)
            time.sleep(m1_t)
            val_m1 = get_mcp_m1()

    m1_angle, m2_angle, m3_angle, m4_angle = var.m1_home, var.m2_home, var.m3_home,
    var.m4_home
    showing_angle()
    showing_xyz()
    if not(thr_1.isAlive()):
        thr_1.start()
        thr_2.start()
    m1_ccw_button["state"] = NORMAL
    m1_cw_button["state"] = NORMAL
    m2_ccw_button["state"] = NORMAL
    m2_cw_button["state"] = NORMAL
    m3_ccw_button["state"] = NORMAL
    m3_cw_button["state"] = NORMAL
    m4_ccw_button["state"] = NORMAL
    m4_cw_button["state"] = NORMAL
    neg_x_button["state"] = NORMAL
    pos_x_button["state"] = NORMAL
    neg_y_button["state"] = NORMAL
    pos_y_button["state"] = NORMAL
    neg_z_button["state"] = NORMAL
    pos_z_button["state"] = NORMAL
    tch_btn['state'] = NORMAL
    print("HOME DONE")

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

def btn_tch():
    del_btn['state'] = NORMAL
    sv_btn['state'] = NORMAL
    data = [m1_angle,m2_angle,m3_angle,m4_angle-(90-m1_angle),speed.get(),acc.get(),1]
    if len(teach_pos) != 0:
        # [x1,y1,_] = cal_xyz(teach_pos[len(teach_pos)-1][0], teach_pos[len(teach_pos)-1][1],
teach_pos[len(teach_pos)-1][2])
        # [x2,y2,_] = cal_xyz(m1_angle,m2_angle,m3_angle)
        # if line_to_zero(x1, x2, y1, y2) < var.inside:
        #     Text_box("over_linear")
        #     data = [m1_angle,m2_angle,m3_angle,m4_angle,speed.get(),acc.get(),0]
        if teach_pos[len(teach_pos)-1] == data:
            Text_box("joint")
            data = [m1_angle,m2_angle,m3_angle,m4_angle,speed.get(),acc.get(),0]
            teach_pos.pop(len(teach_pos)-1)
        elif teach_pos[len(teach_pos)-1] ==
[m1_angle,m2_angle,m3_angle,m4_angle,speed.get(),acc.get(),0]:
            Text_box("linear")
            teach_pos.pop(len(teach_pos)-1)
        teach_pos.append(data)
    del_btn['state'] = NORMAL
    sv_btn['state'] = NORMAL

def btn_dlt():
    teach_pos.remove(teach_pos[len(teach_pos)-1])
    if len(teach_pos) < 1:
        del_btn['state'] = DISABLED
        sv_btn['state'] = DISABLED

def btn_sv():
    global data_name, c, error_pr, c2, error_pr2
    if get_name.get()=="":
        c = 1
        error_pr = Label(root,text="Please enter your filename.", fg="red", bg='#F8D49B', font=('arial',
12, 'normal'))
        error_pr.place(x=730, y=5)
        #print(c)

    else:
        if c==1:
            error_pr.destroy()
            c = 0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ผู้ใช้มีสิทธิตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

c = 0
check_exists()

def check_exists():
    global data_name, get_data, c, error_pr, c2, error_pr2
    s = 0
    if len(fileN) > 0:
        for i in range(len(fileN)):
            if fileN[i] == get_name.get():
                c2 = 1
                error_pr2 = Label(root, text=fileN[i] + " already exists.", fg="red", bg='#F8D49B',
font=('arial', 12, 'normal'))
                error_pr2.place(x=730, y=5)

            else:
                s += 1
                if s == len(fileN):
                    if c2 == 1:
                        error_pr2.destroy()
                        c2 = 0
                        save_mth()
                    elif len(fileN) == 0:
                        save_mth()

def save_mth():
    global get_data
    get_data = teach_pos
    Wfile()
    get_name.delete(0, END)
    get_data.clear()
    opf_btn['state'] = NORMAL
    del_btn['state'] = DISABLED
    sv_btn['state'] = DISABLED

def btn_opf():
    global auto_mode
    ch_listdir()
    n = len(fileN)
    if (n == 0):
        opf_btn['state'] = DISABLED
    else:

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

auto_mode = 1
open_window()

def comboclick(event):
    btn_run_2['state'] = NORMAL
    btn_del2['state'] = NORMAL

def btn_run():
    global run_status, read_data
    if not(run_status):
        print("Start Run")
        read_data = RFile()
        run_status = 1
        btn_run_2['state'] = DISABLED

def btn_del_2():
    ch_listdir()
    n = len(fileN)
    for i in range(n):
        if cmb.get() == fileN[i]:
            os.remove(fileN[i])
    ch_listdir()
    global auto_mode
    top.destroy()
    auto_mode = 0
    if n>1:
        open_window()
    else:
        opf_btn['state'] = DISABLED

def open_window():
    global top, cmb, btn_run_2, btn_stop, btn_del2
    top = Toplevel()
    top.title('select filename')
    top.geometry('450x300')
    top.configure(background='#F0F8FF')
    top.option_add("**font", "arial 14 normal")
    ch_listdir()
    cmb = ttk.Combobox (top, width=30)
    cmb['values'] = fileN
    #cmb.current(0)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

cmb.place(x=50, y=100)
cmb.bind("<<ComboboxSelected>>",comboclick)

btn_run_2 = Button(top, text = 'RUN', width=12, bg='#66CD00', font=('arial', 14,
'normal'),command = btn_run)
btn_run_2.place(x=80, y=200)

Button(top, text = 'Close and Back', width=15, bg='#FFA500', font=('arial', 12, 'normal'),
command=destroy_window).place(x=10, y=10)

btn_stop = Button(top, text='STOP', width=12, bg='#FF0000', font=('arial', 14, 'normal'))
btn_stop.place(x=240, y=200)

btn_del2 = Button(top, text = "DELETE", bd = 2, bg='#FF0000', font=('arial', 10, 'normal'),
command=btn_del_2)
btn_del2.place(x=341, y=73)
btn_del2['state'] = DISABLED
btn_run_2['state'] = DISABLED
btn_stop['state'] = DISABLED
top.protocol("WM_DELETE_WINDOW", disable_event)
top.resizable(width=False, height=False)
def destroy_window():
    global auto_mode
    top.destroy()
    auto_mode = 0
def disable_event():
    pass

def Text_box(text):
    if text == "unknow_pos":
        error_ = Label(text_frame, text = "Unknow Position.", fg="red", font=('arial', 10, 'normal'))
        error_.place(x = 8, y = 8)
        y = 1
    elif text=="over_linear":
        error_ = Label(text_frame, text = "Can't find path. save as Joint_Mode ", fg="red", font=('arial',
10, 'normal'))
        error_.place(x = 8, y = 8)
        y = 1
    elif text=="joint":
        error_ = Label(text_frame, text = "Change last teach to Joint_Mode", fg="blue", font=('arial',
10, 'normal'))
        error_.place(x = 8, y = 8)
    elif text=="linear":
        error_ = Label(text_frame, text = "Change last teach to Linear_Mode", fg="blue", font=('arial',
10, 'normal'))

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขได้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

error_.place(x = 8, y = 8)

def thread_1(): # xyz
    global m1_angle, m2_angle, m3_angle, m4_angle, read_data, run_status
    move_table = [0,0,0,0]
    while thread1_state:
        if run_status:
            if move_table == [0,0,0,0] and len(read_data) > 0:
                if read_data[0][6]:
                    [x1,y1,z1] = cal_xyz(m1_angle,m2_angle,m3_angle)
                    [x2,y2,z2] = cal_xyz(read_data[0][0],read_data[0][1],read_data[0][2])
                    move_table =
                    cal(read_data[0][4],read_data[0][3],var.v_max*read_data[0][4]/100,var.v_min*read_data[0][4]/100,va
                    r.a_max*read_data[0][5]/100,x1,y1,z1,x2,y2,z2)
                elif not(read_data[0][6]):
                    move_table = cal_j(read_data[0][4],read_data[0][5],read_data[0][0]-
                    m1_angle,read_data[0][1]-m2_angle,read_data[0][2]-m3_angle,read_data[0][3]-m4_angle)
                    read_data.pop(0)
                    time.sleep(0.5)
                elif len(read_data) == 0:
                    run_status = 0
                    print("stop")
                    btn_run_2['state'] = NORMAL
                if nx and not(auto_mode):
                    [x1,y1,z1] = cal_xyz(m1_angle, m2_angle, m3_angle)
                    end = x_min_max(x1,y1,z1)
                    move_table =
                    cal(1,0,var.v_max*speed.get()/100,var.v_min*speed.get()/100,var.a_max*acc.get()/100,x1,y1,z1,end[0]
                    ,y1,z1)
                    if x1 < end[0]: move_table=[0,0,0,0]
                elif px and not(auto_mode):
                    [x1,y1,z1] = cal_xyz(m1_angle, m2_angle, m3_angle)
                    end = x_min_max(x1,y1,z1)
                    move_table =
                    cal(1,0,var.v_max*speed.get()/100,var.v_min*speed.get()/100,var.a_max*acc.get()/100,x1,y1,z1,end[1]
                    ,y1,z1)
                    if x1 > end[1]: move_table=[0,0,0,0]
                elif ny and not(auto_mode):
                    [x1,y1,z1] = cal_xyz(m1_angle, m2_angle, m3_angle)
                    end = y_min_max(x1,y1,z1)
                    move_table =
                    cal(1,0,var.v_max*speed.get()/100,var.v_min*speed.get()/100,var.a_max*acc.get()/100,x1,y1,z1,end[2]
                    ,y1,z1)
                    if y1 > end[2]: move_table=[0,0,0,0]
                elif nz and not(auto_mode):
                    [x1,y1,z1] = cal_xyz(m1_angle, m2_angle, m3_angle)
                    end = z_min_max(x1,y1,z1)
                    move_table =
                    cal(1,0,var.v_max*speed.get()/100,var.v_min*speed.get()/100,var.a_max*acc.get()/100,x1,y1,z1,end[3]
                    ,z1)
                    if z1 > end[3]: move_table=[0,0,0,0]

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

cal(1,0,var.v_max*speed.get()/100,var.v_min*speed.get()/100,var.a_max*acc.get()/100,x1,y1,z1,x1,end[0],z1)

    if y1 < end[0]: move_table=[0,0,0,0]
elif py and not(auto_mode):
    [x1,y1,z1] = cal_xyz(m1_angle, m2_angle, m3_angle)
    end = y_min_max(x1,y1,z1)
    move_table =
cal(1,0,var.v_max*speed.get()/100,var.v_min*speed.get()/100,var.a_max*acc.get()/100,x1,y1,z1,x1,end[1],z1)

    if y1 > end[1]: move_table=[0,0,0,0]
elif nz and not(auto_mode):
    [x1,y1,z1] = cal_xyz(m1_angle, m2_angle, m3_angle)
    end = z_min_max(x1,y1,z1)
    move_table =
cal(1,0,var.v_max*speed.get()/100,var.v_min*speed.get()/100,var.a_max*acc.get()/100,x1,y1,z1,x1,y1,end[0])

    if z1 < end[0]: move_table=[0,0,0,0]
elif pz and not(auto_mode):
    [x1,y1,z1] = cal_xyz(m1_angle, m2_angle, m3_angle)
    end = z_min_max(x1,y1,z1)
    move_table =
cal(1,0,var.v_max*speed.get()/100,var.v_min*speed.get()/100,var.a_max*acc.get()/100,x1,y1,z1,x1,y1,end[1])

    if z1 > end[1]: move_table=[0,0,0,0]
if move_table != [0,0,0,0]:
    high_state,low_state,time_table = move_table[2],move_table[3],move_table[4]
    i,time_start,motor_count = 0,time.time(),[0,0,0,0]
    while i < len(time_table) and ((nx or px or ny or py or nz or pz) or auto_mode):
        if(time.time() - time_start >= time_table[i]):
            for j in range(4):
                if high_state[i][j]:
                    motor_move(dir_pin[j],bool(((high_state[i][j]+1)/2))
                    motor_move(pls_pin[j],1)
                    motor_count[j] += high_state[i][j]
                elif low_state[i][j]:
                    motor_move(pls_pin[j],0)
            i += 1
        if m1_angle + motor_count[0]*var.m1_dstep >= var.m1_max or m1_angle +
        motor_count[0]*var.m1_dstep <= var.m1_min:
            print("break, cannot find path")
            break

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

m1_angle = m1_angle + motor_count[0]*var.m1_dstep
m2_angle = m2_angle + motor_count[1]*var.m2_dstep
m3_angle = m3_angle + motor_count[2]*var.m3_dstep
m4_angle = m4_angle + motor_count[3]*var.m4_dstep
while(nx or px or ny or py or nz or pz) and not(auto_mode):
    time.sleep(0.2)
    showing_xyz()
    showing_angle()
    move_table = [0,0,0,0]
thr_1 = threading.Thread(target=thread_1)

def thread_2(): # joint
    global m1_angle, m2_angle, m3_angle, m4_angle
    while thread2_state:
        time.sleep(0.1)
        if (ccw_1 or cw_1 or ccw_2 or cw_2 or ccw_3 or cw_3 or ccw_4 or cw_4) and not(auto_mode):
            if ccw_1 or cw_1:
                m1_t = var.m1_dstep/(2*var.m1_vmax*speed.get()/100)
                mask = ccw_1 + cw_1
                m1_set(ccw_1)
                while ccw_1 or cw_1:
                    if m1_angle + var.m1_dstep*mask <= var.m1_min or m1_angle + var.m1_dstep*mask
                    >= var.m1_max:break
                    m1_move(1)
                    time.sleep(m1_t)
                    m1_move(0)
                    time.sleep(m1_t)
                    m1_angle = m1_angle + (mask)*var.m1_dstep
                while ccw_1 or cw_1:time.sleep(0.1)
            elif ccw_2 or cw_2:
                m2_t = var.m2_dstep/(2*var.m2_vmax*speed.get()/100)
                mask = ccw_2 + cw_2
                m2_set(ccw_2)
                while ccw_2 or cw_2:
                    [x,y,z] = cal_xyz(m1_angle,(m2_angle + (mask)*var.m2_dstep),m3_angle)
                    if np.sqrt(x*x+y*y) < var.inside or np.sqrt(x*x+y*y+z*z) > var.outside or z <
                    var.z_min:break
                    m2_move(1)
                    time.sleep(m2_t)
                    m2_move(0)
                    time.sleep(m2_t)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

        m2_angle = m2_angle + (mask)*var.m2_dstep
        while ccw_2 or cw_2:time.sleep(0.1)
    elif ccw_3 or cw_3:
        m3_t = var.m3_dstep/(2*var.m3_vmax*speed.get()/100)
        mask = ccw_3 + cw_3
        m3_set(ccw_3)
        while ccw_3 or cw_3:
            [x,y,z] = cal_xyz(m1_angle,m2_angle,(m3_angle + (mask)*var.m3_dstep))
            if np.sqrt(x*x+y*y) < var.inside or np.sqrt(x*x+y*y+z*z) > var.outside or z <
var.z_min:break
            m3_move(1)
            time.sleep(m3_t)
            m3_move(0)
            time.sleep(m3_t)
            m3_angle = m3_angle + (mask)*var.m3_dstep
            while ccw_3 or cw_3:time.sleep(0.1)
    elif ccw_4 or cw_4:
        m4_t = var.m4_dstep/(2*var.m4_vmax*speed.get()/100)
        mask = ccw_4 + cw_4
        m4_set(ccw_4)
        while ccw_4 or cw_4:
            if m4_angle + var.m4_dstep*mask <= var.m4_min or m4_angle + var.m4_dstep*mask
>= var.m4_max:break
            m4_move(1)
            time.sleep(m4_t)
            m4_move(0)
            time.sleep(m4_t)
            m4_angle = m4_angle + (mask)*var.m4_dstep
            while ccw_4 or cw_4:time.sleep(0.1)
        showing_xyz()
        showing_angle()

```

```
thr_2 = threading.Thread(target=thread_2)
```

```
# ----- CCW & CW -Button -----
```

```
global m1_current_axis, m2_current_axis, m3_current_axis, m4_current_axis, axis_max, axis_min
```

```
m1_current_axis, m2_current_axis, m3_current_axis, m4_current_axis = 5, 5, 5, 5
```

```
axis_max = 10
```

```
axis_min = 0
```

```
# ----- M1_CCW -----
```

```
def m1_ccw_press(event):
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม หากมีผู้ใดที่ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

global ccw_1
ccw_1 = 1

def m1_ccw_release(event):
    global ccw_1
    ccw_1 = 0
#----- M1_CW -----
def m1_cw_press(event):
    global cw_1
    cw_1 = -1

def m1_cw_release(event):
    global cw_1
    cw_1 = 0
#----- M2_CCW -----
def m2_ccw_press(event):
    global ccw_2
    ccw_2 = 1

def m2_ccw_release(event):
    global ccw_2
    ccw_2 = 0
#----- M2_CW -----
def m2_cw_press(event):
    global cw_2
    cw_2 = -1

def m2_cw_release(event):
    global cw_2
    cw_2 = 0
#----- M3_CCW -----
def m3_ccw_press(event):
    global ccw_3
    ccw_3 = 1

def m3_ccw_release(event):
    global ccw_3
    ccw_3 = 0
#----- M3_CW -----
def m3_cw_press(event):
    global cw_3

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

cw_3 = -1

def m3_cw_release(event):
    global cw_3
    cw_3 = 0
#----- M4_CCW -----
def m4_ccw_press(event):
    global ccw_4
    ccw_4 = 1

def m4_ccw_release(event):
    global ccw_4
    ccw_4 = 0
#----- M4_CW -----
def m4_cw_press(event):
    global cw_4
    cw_4 = -1

def m4_cw_release(event):
    global cw_4
    cw_4 = 0
#----- XYZ -Button -----
#----- X -----
def neg_x_press(event):
    global nx
    nx = 1
def neg_x_release(event):
    global nx
    nx = 0
def pos_x_press(event):
    global px
    px = 1
    #pos_x()
def pos_x_release(event):
    global px
    px = 0
#----- Y -----
def neg_y_press(event):
    global ny
    ny = 1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ห้ามนำไปดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

global ny
ny = 0
def pos_y_press(event):
    global py
    py = 1
def pos_y_release(event):
    global py
    py = 0
#----- Z -----
def neg_z_press(event):
    global nz
    nz = 1
def neg_z_release(event):
    global nz
    nz = 0
def pos_z_press(event):
    global pz
    pz = 1
def pos_z_release(event):
    global pz
    pz = 0
#----- bind key -----
def key(event):
    if repr(event.char) == repr('\r'):
        input_update("Enter")
    elif repr(event.char) == repr('\x1b'):
        root.destroy()
#----- showing value -----
def showing_angle():
    global val_m1_show, val_m2_show, val_m3_show, val_m4_show
    val_m1_show.destroy()
    val_m2_show.destroy()
    val_m3_show.destroy()
    val_m4_show.destroy()
    m1_ang = str(round(m1_angle,2))+ ' °'
    m2_ang = str(round(m2_angle,2))+ ' °'
    m3_ang = str(round(m3_angle,2))+ ' °'
    m4_ang = str(round(m4_angle,2))+ ' °'
    val_m1_show = Label(C_frame, text=m1_ang, fg='#11334D', bg='#ECD4EA', font=('arial', 12,
'normal'))
    val_m1_show.place(x=295, y=20)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

val_m2_show = Label(C_frame, text=m2_ang, fg='#11334D', bg='#ECD4EA', font=('arial', 12,
'normal'))
val_m2_show.place(x=295, y=100)
val_m3_show = Label(C_frame, text=m3_ang, fg='#11334D', bg='#ECD4EA', font=('arial', 12,
'normal'))
val_m3_show.place(x=295, y=180)
val_m4_show = Label(C_frame, text=m4_ang, fg='#11334D', bg='#ECD4EA', font=('arial', 12,
'normal'))
val_m4_show.place(x=295, y=260)

def showing_xyz():
    global val_x_show, val_y_show, val_z_show
    val_x_show.destroy()
    val_y_show.destroy()
    val_z_show.destroy()
    xyz_val = cal_xyz(m1_angle, m2_angle, m3_angle)
    x_val = round(xyz_val[0],2)
    y_val = round(xyz_val[1],2)
    z_val = round(xyz_val[2],2)
    val_x_show = Label(R_frame, text=x_val, fg='#11334D', bg='#CDDAD8', font=('arial', 12, 'normal'))
    val_x_show.place(x=280, y=20)
    val_y_show = Label(R_frame, text=y_val, fg='#11334D', bg='#CDDAD8', font=('arial', 12, 'normal'))
    val_y_show.place(x=280, y=100)
    val_z_show = Label(R_frame, text=z_val, fg='#11334D', bg='#CDDAD8', font=('arial', 12, 'normal'))
    val_z_show.place(x=280, y=180)

global m1_ang, m2_ang, m3_ang, m4_ang, x_val, y_val, z_val
m1_ang = "-" + '°'
m2_ang = "-" + '°'
m3_ang = "-" + '°'
m4_ang = "-" + '°'
val_m1_show = Label(C_frame, text=m1_ang, fg='#11334D', bg='#ECD4EA', font=('arial', 12,
'normal'))
val_m1_show.place(x=295, y=20)
val_m2_show = Label(C_frame, text=m2_ang, fg='#11334D', bg='#ECD4EA', font=('arial', 12,
'normal'))
val_m2_show.place(x=295, y=100)
val_m3_show = Label(C_frame, text=m3_ang, fg='#11334D', bg='#ECD4EA', font=('arial', 12,
'normal'))
val_m3_show.place(x=295, y=180)
val_m4_show = Label(C_frame, text=m4_ang, fg='#11334D', bg='#ECD4EA', font=('arial', 12,

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และจะรีบแก้ไขทันที

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

'normal'))
val_m4_show.place(x=295, y=260)

x_val = "-"
y_val = "-"
z_val = "-"
val_x_show = Label(R_frame, text=x_val, fg='#11334D', bg='#CDDAD8', font=('arial', 12, 'normal'))
val_x_show.place(x=280, y=20)
val_y_show = Label(R_frame, text=y_val, fg='#11334D', bg='#CDDAD8', font=('arial', 12, 'normal'))
val_y_show.place(x=280, y=100)
val_z_show = Label(R_frame, text=z_val, fg='#11334D', bg='#CDDAD8', font=('arial', 12, 'normal'))
val_z_show.place(x=280, y=180)
#-----
ch_listdir()

Button(T_frame, text='HOME', width=9, bg='#CDE9DA', fg='#151B54', bd = 3, font=('arial', 16,
'normal'), command=btn_h).place(x=13, y=8)
opf_btn = Button(L_frame, text='OPEN FILE', width=20, bg='#B9CC95', fg='#153223', bd = 3,
font=('arial', 16, 'normal'), command=btn_opf)
opf_btn.place(x=13, y=473)
if len(fileN)== 0:
    opf_btn['state'] = DISABLED
else:
    opf_btn['state'] = NORMAL

tch_btn = Button(T_frame, text='TEACH', width=9, bg='#F8D49B', fg='#8E3800', bd = 3, font=('arial',
16, 'normal'), command=btn_tch)
tch_btn.place(x=140, y=8)
tch_btn['state'] = DISABLED
del_btn = Button(T_frame, text='DELETE', width=9, bg='#E984A2', fg='#7E3517', bd = 3, font=('arial',
16, 'normal'), command=btn_dlt)
del_btn.place(x=267, y=8)
del_btn['state'] = DISABLED
get_name = Entry(T_frame, width=18)
get_name.place(x=400, y=12)

sv_btn = Button(T_frame, text='SAVE', width=7, bg='#00BFFF', fg='#151B54', bd = 3, font=('arial', 14,
'normal'), command=btn_sv)
sv_btn.place(x=680, y=8)
sv_btn['state'] = DISABLED

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

Label(C_frame, text='Waist axis', bg='#ECD4EA', font=('arial', 14, 'normal')).place(x=30, y=20)
Label(C_frame, text='Shoulder axis', bg='#ECD4EA', font=('arial', 14, 'normal')).place(x=30, y=100)
Label(C_frame, text='Elbow axis', bg='#ECD4EA', font=('arial', 14, 'normal')).place(x=30, y=180)
Label(C_frame, text='Wrist axis', bg='#ECD4EA', font=('arial', 14, 'normal')).place(x=30, y=260)

cw = PhotoImage(file = "cw.png")
ccw = PhotoImage(file = "ccw.png")
m1_ccw_button = Button(C_frame, image = ccw, bg='#919F89',activebackground="#00FF33", bd = 2,
font=('arial', 14, 'normal'))
m1_ccw_button.place(x=160, y=15)
m1_ccw_button.bind("<ButtonRelease>", m1_ccw_release)
m1_ccw_button.bind("<ButtonPress>", m1_ccw_press)

m1_cw_button = Button(C_frame, image = cw, bg='#E2B8AC',activebackground="#00FF33", bd = 2,
font=('arial', 14, 'normal'))
m1_cw_button.place(x=210, y=15)
m1_cw_button.bind("<ButtonRelease>", m1_cw_release)
m1_cw_button.bind("<ButtonPress>", m1_cw_press)

m2_ccw_button = Button(C_frame, image = ccw, bg='#919F89',activebackground="#00FF33", bd = 2,
font=('arial', 14, 'normal'))
m2_ccw_button.place(x=160, y=95)
m2_ccw_button.bind("<ButtonRelease>", m2_ccw_release)
m2_ccw_button.bind("<ButtonPress>", m2_ccw_press)

m2_cw_button = Button(C_frame, image = cw, bg='#E2B8AC',activebackground="#00FF33", bd = 2,
font=('arial', 14, 'normal'))
m2_cw_button.place(x=210, y=95)
m2_cw_button.bind("<ButtonRelease>", m2_cw_release)
m2_cw_button.bind("<ButtonPress>", m2_cw_press)

m3_ccw_button = Button(C_frame, image = ccw, bg='#919F89',activebackground="#00FF33", bd = 2,
font=('arial', 14, 'normal'))
m3_ccw_button.place(x=160, y=175)
m3_ccw_button.bind("<ButtonRelease>", m3_ccw_release)
m3_ccw_button.bind("<ButtonPress>", m3_ccw_press)

m3_cw_button = Button(C_frame, image = cw, bg='#E2B8AC',activebackground="#00FF33", bd = 2,
font=('arial', 14, 'normal'))
m3_cw_button.place(x=210, y=175)
m3_cw_button.bind("<ButtonRelease>", m3_cw_release)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ผู้ใช้ที่ละเมิดลิขสิทธิ์จะถูกลงโทษอย่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

m3_cw_button.bind("<ButtonPress>", m3_cw_press)

m4_ccw_button = Button(C_frame, image = ccw, bg='#919F89',activebackground="#00FF33", bd = 2,
font=('arial', 14, 'normal'))
m4_ccw_button.place(x=160, y=255)
m4_ccw_button.bind("<ButtonRelease>", m4_ccw_release)
m4_ccw_button.bind("<ButtonPress>", m4_ccw_press)

m4_cw_button = Button(C_frame, image = cw, bg='#E2B8AC',activebackground="#00FF33", bd = 2,
font=('arial', 14, 'normal'))
m4_cw_button.place(x=210, y=255)
m4_cw_button.bind("<ButtonRelease>", m4_cw_release)
m4_cw_button.bind("<ButtonPress>", m4_cw_press)

Label(R_frame, text='Tool', bg='#CDDAD8', font=('arial', 14, 'normal')).place(x=30, y=260)
Label(R_frame, text='X axis', bg='#CDDAD8', font=('arial', 14, 'normal')).place(x=30, y=20)
Label(R_frame, text='Y axis', bg='#CDDAD8', font=('arial', 14, 'normal')).place(x=30, y=100)
Label(R_frame, text='Z axis', bg='#CDDAD8', font=('arial', 14, 'normal')).place(x=30, y=180)

neg_x_button = Button(R_frame, width=3, text='-X', fg='#34282C',
bg='#919F89',activebackground="#00FF33", bd = 2, font=('arial', 14, 'normal'))
neg_x_button.place(x=140, y=20)
neg_x_button.bind("<ButtonRelease>", neg_x_release)
neg_x_button.bind("<ButtonPress>", neg_x_press)
neg_y_button = Button(R_frame, width=3, text='-Y', fg='#34282C',
bg='#919F89',activebackground="#00FF33", bd = 2, font=('arial', 14, 'normal'))
neg_y_button.place(x=140, y=100)
neg_y_button.bind("<ButtonRelease>", neg_y_release)
neg_y_button.bind("<ButtonPress>", neg_y_press)
neg_z_button = Button(R_frame, width=3, text='-Z', fg='#34282C',
bg='#919F89',activebackground="#00FF33", bd = 2, font=('arial', 14, 'normal'))
neg_z_button.place(x=140, y=180)
neg_z_button.bind("<ButtonRelease>", neg_z_release)
neg_z_button.bind("<ButtonPress>", neg_z_press)

pos_x_button = Button(R_frame, width=3, text='+X', fg='#34282C',
bg='#E2B8AC',activebackground="#00FF33", bd = 2, font=('arial', 14, 'normal'))
pos_x_button.place(x=190, y=20)
pos_x_button.bind("<ButtonRelease>", pos_x_release)
pos_x_button.bind("<ButtonPress>", pos_x_press)
pos_y_button = Button(R_frame, width=3, text='+Y', fg='#34282C',

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีผู้ใดฝ่าฝืนขโมยเอกสารไปเผยแพร่หรือจำหน่ายแก่ผู้อื่น จะถือว่าผิดกฎหมายและจะดำเนินคดีตามกฎหมายต่อไป

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

bg='#E2B8AC',activebackground="#00FF33", bd = 2, font=('arial', 14, 'normal'))
pos_y_button.place(x=190, y=100)
pos_y_button.bind("<ButtonRelease>", pos_y_release)
pos_y_button.bind("<ButtonPress>", pos_y_press)
pos_z_button = Button(R_frame, width=3, text='+Z', fg='#34282C',
bg='#E2B8AC',activebackground="#00FF33", bd = 2, font=('arial', 14, 'normal'))
pos_z_button.place(x=190, y=180)
pos_z_button.bind("<ButtonRelease>", pos_z_release)
pos_z_button.bind("<ButtonPress>", pos_z_press)

Label(BL_frame, text="Speed (%)", fg='#11334D', bg='#ABCFD1', font=('arial', 14,
'normal')).place(x=20, y=5)
Label(BR_frame, text="Acceleration (%)", fg='#11334D', bg='#ADEEE2', font=('arial', 14,
'normal')).place(x=20, y=5)
speed = Scale(BL_frame, from_=10,to=100,orient=HORIZONTAL, width=10, length=300,
bg='#ABCFD1', font=('arial', 8, 'normal'))
speed.place(x=55, y=40)
acc = Scale(BR_frame, from_=10,to=100, orient=HORIZONTAL, width=10, length=300, bg='#ADEEE2',
font=('arial', 8, 'normal'))
acc.place(x=55, y=40)
# Keep track of the button state on/off
is_on_1 = True
on_1 = PhotoImage(file = "on.png")
off_1 = PhotoImage(file = "off.png")
on_button1 = Button(R_frame, image = on_1, bg='#CDDAD8', bd = 0, command = switch_tool)
on_button1.place(x=140, y=250)

m1_ccw_button["state"] = DISABLED
m1_cw_button["state"] = DISABLED
m2_ccw_button["state"] = DISABLED
m2_cw_button["state"] = DISABLED
m3_ccw_button["state"] = DISABLED
m3_cw_button["state"] = DISABLED
m4_ccw_button["state"] = DISABLED
m4_cw_button["state"] = DISABLED
neg_x_button["state"] = DISABLED
pos_x_button["state"] = DISABLED
neg_y_button["state"] = DISABLED
pos_y_button["state"] = DISABLED
neg_z_button["state"] = DISABLED
pos_z_button["state"] = DISABLED

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีผู้ใดนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

root.bind("<Key>", key)
root.resizable(width=False, height=False)
root.mainloop()

thread1_state = 0
thread2_state = 0
gpio_clean()

```

ส่วนโปรแกรมในการสื่อสารระหว่าง Raspberry Pi และ MCP23S17 มีดังนี้

```

import spidev
import time
import RPi.GPIO as GPIO
import numpy as np

mcp_cs = (24,24,26,26)
mcp_reset = 22
mcp_write = 0x40
mcp_read = 0x41

gray_code = np.array([127, 63, 62, 58, 56, 184, 152, 24, 8, 72, 73, 77, 79, 15, 47,
175, 191, 159, 31, 29, 28, 92, 76, 12, 4, 36, 164, 166, 167, 135,
151, 215, 223, 207, 143, 142, 14, 46, 38, 6, 2, 18, 82, 83, 211,
195, 203, 235, 239, 231, 199, 71, 7, 23, 19, 3, 1, 9, 41, 169,
233, 225, 229, 245, 247, 243, 227, 163, 131, 139, 137, 129, 128, 132, 148,
212, 244, 240, 242, 250, 251, 249, 241, 209, 193, 197, 196, 192, 64, 66,
74, 106, 122, 120, 121, 125, 253, 252, 248, 232, 224, 226, 98, 96, 32,
33, 37, 53, 61, 60, 188, 190, 254, 126, 124, 116, 112, 113, 49, 48,
16, 144, 146, 154, 158, 30, 94, 95])

def spi_setup():
    GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
    GPIO.setup(mcp_cs, GPIO.OUT)
    GPIO.setup(mcp_reset, GPIO.OUT)
    time.sleep(0.1)
    GPIO.output(mcp_cs,True)
    GPIO.output(mcp_reset,True)
    time.sleep(0.2)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

def to_mcp(cmd,addr,data,axis):
    global deg
    GPIO.output(mcp_cs[axis-1], False)
    var = spi.xfer([cmd,addr,data])
    if cmd == mcp_read:
        try:
            deg = np.where(gray_code == var[2])
            deg = deg[0]*2.8125
            # print(var[2], " ",deg)
        except:
            print("None")
    GPIO.output(mcp_cs[axis-1], True)

spi = spidev.SpiDev()
spi.open(0,0)
spi.no_cs = True
spi.max_speed_hz = 115200
spi_setup()

def get_mcp_m4():
    to_mcp(mcp_write,0x00,0xFF,3) # assign address 001 port a
    to_mcp(mcp_read,0x12,0,3) # address 001 port a
    m3_val = deg
    return m3_val

def get_mcp_m1():
    to_mcp(mcp_write,0x00,0xFF,1) # assign address 000 port a
    to_mcp(mcp_read,0x12,0,1) # address 000 port a
    m1_val = deg
    return m1_val

def get_mcp_m2():
    to_mcp(mcp_write,0x01,0xFF,3) # assign address 001 port b
    to_mcp(mcp_read,0x13,0,1) # address 001 port b
    m4_val = deg
    return m4_val

def get_mcp_m3():
    to_mcp(mcp_write,0x01,0xFF,1) # assign address 000 port b
    to_mcp(mcp_read,0x13,0,3) # address 000 port b
    m2_val = deg
    return m2_val

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ส่วนโปรแกรมคำนวณที่เขียนขึ้น มีดังนี้

```
import numpy as np
import var_ as var
import matplotlib.pyplot as plt
import collections
from functools import reduce
import time

l1 = var.l1
l2 = var.l2
d4 = var.d4

base_max = var.m1_max
base_min = var.m1_min
v = 40
u = 0
a = 20
min_move = 0.01

def line_to_zero(x1,x2,y1,y2):
    if x1 == x2:
        m = 0
        c = -x1
    else:
        m = (y2-y1)/(x2-x1)
        c = y2-m*x2
    distance = np.abs(c)/(np.sqrt(m*m+1))
    return distance
#----- XYZ min-max -----
def x_min_max(x,y,z):
    if y >= var.outside or y <= -var.outside:
        cal_x = [-np.sqrt(abs(var.outside*var.outside-y*y-z*z)),np.sqrt(abs(var.outside*var.outside-y*y-z*z))]
        # print(cal_x)
        x_min = cal_x[0]
        x_max = cal_x[1]
        # print("x min",x_min)
        # print("x max",x_max)
    else:
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

cal_x_large = [-np.sqrt(var.outside*var.outside-y*y-z*z),np.sqrt(var.outside*var.outside-y*y-
z*z)]

cal_x_small = [-np.sqrt(var.inside*var.inside-y*y),np.sqrt(var.inside*var.inside-y*y)]
# print(cal_x_large)
# print("small: ",cal_x_small)

if x >= 0:
    x_min = cal_x_small[1]
    x_max = cal_x_large[1]
    # print(y)
    # print(base_min)
    if y/np.tan(np.deg2rad(base_min)) > x_min: x_min = y/np.tan(np.deg2rad(base_min))
elif x < 0:
    x_min = cal_x_large[0]
    x_max = cal_x_small[0]
    if y/np.tan(np.deg2rad(base_min)) > x_min: x_min = y/np.tan(np.deg2rad(base_min))
# print("x min",x_min)
# print("x max",x_max)
return [x_min,x_max]

def y_min_max(x,y,z):
    if x >= var.inside or x <= -var.inside:
        cal_y = [-np.sqrt(abs(var.outside*var.outside-x*x-z*z)),np.sqrt(abs(var.outside*var.outside-x*x-
z*z))]
        y_min = cal_y[0]
        y_max = cal_y[1]
        # print("y min",y_min)
        # print("y max",y_max)
    else:
        cal_y_large = [-np.sqrt(var.outside*var.outside-x*x-z*z),np.sqrt(var.outside*var.outside-x*x-
z*z)]
        cal_y_small = [-np.sqrt(var.inside*var.inside-x*x),np.sqrt(var.inside*var.inside-x*x)]
        # print(cal_y_large)
        # print("small: ",cal_x_small)
        if y >= 0:
            y_min = cal_y_small[1]
            y_max = cal_y_large[1]
        elif y < 0:
            y_min = cal_y_large[0]
            y_max = cal_y_small[0]
        # print("con 2 y min",y_min)
        # print("con 2 y max",y_max)
    return [y_min,y_max]

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

def z_min_max(x,y,z):
    cal_z = [np.sqrt(var.outside*var.outside-x*y*y)]
    # print(cal_z)
    z_min = var.z_min
    z_max = max(cal_z[0],var.z_max)
    # print("z min",z_min)
    # print("z max",z_max)
    return [z_min,z_max]

#----- XYZ min-max -----

def low_state(front,data,back):
    b = np.concatenate((np.ones(data),np.zeros(back)))
    low = np.concatenate((np.zeros(front),b))
    return low

def count(x):
    return collections.Counter(x)

def generate_sign(delta,initial,step):
    # print("DELTA: ",delta)
    delta = np.rad2deg((np.round((delta-initial)/step))*step)
    delta_ = np.roll(delta,1)
    try:
        out_delta = delta[len(delta)-1]+np.rad2deg(initial)
        delta_[0] = 0
    except:
        out_delta = 0
    delta = np.sign(delta - delta_)
    return delta, out_delta

def generate_0_sig(array,t):
    pos = np.where(np.abs(array) == 1)[0]
    time_ = t[np.roll(pos,-1)]
    try:
        time_[len(time_)-1] = 2*t[len(t)-1] - t[len(t)-2]
    except:
        time_ = 0
    out_t = (t[pos]+time_)/2
    return out_t

```

```

def get_max(x):
    try:
        return np.max(x)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

class drive_func:
    def now(self):
        return time.time()
    def numerical_check(self,data):
        try:
            val = round(float(data),3)
            return val
        except ValueError:
            return "unchange"

    def insert_drive(self, m1_dis,m2_dis,m3_dis,m4_dis):
        m_sign = [1,1,1,1]
        if m1_dis > 0:
            m_sign[0] = 1
            # GPIO.output(var.m1_dir, False)
        else:
            m_sign[0] = -1
            # GPIO.output(var.m1_dir, True)
        if m2_dis > 0:
            m_sign[1] = 1
            print("m2_ccw")
        else:
            m_sign[1] = -1
            print("m2_cw")
        if m3_dis > 0:
            m_sign[2] = 1
            print("m3_ccw")
        else:
            m_sign[2] = -1
            print("m3_cw")
        if m4_dis > 0:
            m_sign[3] = 1
            print("m4_ccw")
        else:
            m_sign[3] = -1
            print("m4_cw")
        m_t = self.get_timing(m1_dis,m2_dis,m3_dis,m4_dis)
        for i in range(0,len(m_t)):
            if m_t[i][0] == 0.0:
                m_t[i] = []

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

except:
    return 0
def get_min(x):
    try:
        return np.min(x)
    except:
        return 0
def max_index(x):
    try:
        return np.argmax(x)
    except:
        return []
def cal_xyz(delta_base, delta_1, delta_2): #deg
    delta_base = np.deg2rad(delta_base)
    delta_1 = np.deg2rad(delta_1)
    delta_2 = np.deg2rad(delta_2)
    r = l1*np.sin(delta_1)+l2*np.cos(delta_2-((np.pi/2)-delta_1))
    z = l1*np.cos(delta_1)-l2*np.sin(delta_2-((np.pi/2)-delta_1))
    x = (r+d4)*np.cos(delta_base)
    y = (r+d4)*np.sin(delta_base)
    # print(x,y,z)
    return [x,y,z]
def cal(mode,grip,v,u,a,x1,y1,z1,x2,y2,z2): # Mode 0 = Angular, Mode 1 = Linear
    m1_dstep = np.deg2rad(var.m1_dstep)
    m2_dstep = np.deg2rad(var.m2_dstep)
    m3_dstep = np.deg2rad(var.m3_dstep)
    m4_dstep = np.deg2rad(var.m4_dstep)

    initial_r = np.sqrt(x1*x1+y1*y1)
    delta_base = np.arcsin(y1/initial_r)
    delta_base = delta_base + 2*((np.pi/2)-delta_base)-np.sign((np.sign(x1))+1)*2*((np.pi/2)-
delta_base))
    initial_r -= d4
    x1 = initial_r *np.cos(delta_base)
    y1 = initial_r *np.sin(delta_base)

    r = np.sqrt(x2*x2+y2*y2)
    delta_base = np.arcsin(y2/r)
    delta_base = delta_base + 2*((np.pi/2)-delta_base)-np.sign((np.sign(x2))+1)*2*((np.pi/2)-
delta_base))
    x2 = (r-d4)*np.cos(delta_base)
    y2 = (r-d4)*np.sin(delta_base)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

distance = np.sqrt(np.power((x2-x1),2)+np.power((y2-y1),2)+np.power((z2-z1),2))

distance_1 = (v*v-u*u)/(2*a)
if distance_1 < distance/2:
    move_1 = np.arange(min_move,distance_1+min_move/2,min_move)
    move1_max = get_max(move_1)

    distance_2 = distance - 2*move1_max
    move_2 =
np.arange(move1_max+min_move,move1_max+distance_2+min_move/2,min_move)
    move2_max = np.max(move_2)

    distance_3 = distance - move2_max
    move_3 = np.arange(move2_max+min_move,distance+min_move/2,min_move)

    t_1 = (np.sqrt(u*u+2*a*move_1)-u)/a
    t_2 = ((move_2-move1_max)/v)+np.max(t_1)
    move_3[np.argmax(move_3)] = distance
    t_3 = (np.sqrt(np.abs(v*v+2*(-a)*(move_3-move2_max)))-v)/(-a)+np.max(t_2)

    move = np.concatenate((np.concatenate((move_1,move_2)),move_3))
    t = np.concatenate((np.concatenate((t_1,t_2)),t_3))

elif distance_1 >= distance/2:
    move_1 = np.arange(min_move,(distance/2)+min_move/2,min_move)
    move1_max = get_max(move_1)

    move_2 = np.array(0)

    distance_3 = distance - move1_max
    move_3 = np.arange(move1_max+min_move,distance+min_move/2,min_move)

    t_1 = (np.sqrt(u*u+2*a*move_1)-u)/a
    u_3 = u + a*get_max(t_1)
    move_3[max_index(move_3)] = distance
    t_3 = (np.sqrt(np.abs(u_3*u_3+2*(-a)*(move_3-move1_max)))-u_3)/(-a)+get_max(t_1)

    move = np.concatenate((move_1,move_3))
    t = np.concatenate((t_1,t_3))
else:
    print("Error")

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

dx,dy,dz,dg = 0.0,0.0,0.0,0.0
len_move = len(move)
if len_move != 0:
    dz = ((z2-z1)/len_move)
    dy = ((y2-y1)/len_move)
    dx = ((x2-x1)/len_move)
    dg = np.abs(grip-delta_base)/len_move
if dz != 0.0:
    dz = np.arange(dz,dz*len_move+dz/2,dz) + z1
else:
    dz = np.repeat(0.0,len_move) + z1
if dx != 0.0:
    dx = np.arange(dx,dx*len_move+dx/2,dx) + x1
else:
    dx = np.repeat(0.0,len_move) + x1
if dy != 0.0:
    dy = (np.arange(dy,dy*len_move+dy/2,dy)) + y1
else:
    dy = np.repeat(0.0,len_move) + y1
dr = np.sqrt(dx*dx + dy*dy)
delta_total = np.arccos((dz)/np.sqrt(dz*dz+dr*dr))
delta_1 = delta_total - np.arccos(((l1*l1+dz*dz+dr*dr-l2*l2)/(2*l1*np.sqrt(dz*dz+dr*dr)))
delta_2 = np.pi - np.arccos(((l1*l1+l2*l2-dz*dz-dr*dr)/(2*l1*l2))
# print("dr: ",dr)
# print("dz: ",dz)
# print("delta_t: ",delta_total)
# print("delta_1: ",delta_1)

delta_base = np.arcsin(dy/dr)
delta_base = delta_base + 2*((np.pi/2)-delta_base)-np.sign((np.sign(dx))+1)*(2*((np.pi/2)-
delta_base))
d_out = [dr,delta_base,delta_1,delta_2]

grip = np.deg2rad(grip)
if len_move != 0:
    dg = (grip-delta_base[len(delta_base)-1]+delta_base[0])/len_move
if dg != 0.0:
    delta_grip = np.arange(dg,dg*len_move+dg/2,dg)
else:
    delta_grip = np.repeat(0.0, len_move)
# print("Grip: ",np.rad2deg(delta_grip[len(delta_grip)-1]))
# r_check = l1*np.sin(d_out[2])+l2*np.cos(d_out[3]-((np.pi/2)-d_out[2]))

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

initial_base = np.arcsin(y1/np.sqrt(x1*x1+y1*y1))
initial_base = (initial_base + 2*((np.pi/2)-initial_base)-np.sign((np.sign(x1))+1)*2*((np.pi/2)-
initial_base)))

initial_r = initial_r
initial_delta_total = np.arccos((z1)/np.sqrt(z1*z1+initial_r*initial_r))
initial_delta_1 = initial_delta_total - np.arccos(((l1*l1+z1*z1+initial_r*initial_r-
l2*l2)/(2*l1*np.sqrt(z1*z1+initial_r*initial_r)))
initial_delta_2 = np.pi - np.arccos(((l1*l1+l2*l2-z1*z1-initial_r*initial_r)/(2*l1*l2))

delta_grip, out_grip = generate_sign(delta_grip, 0, m4_dstep)
delta_base, out_base = generate_sign(delta_base, initial_base, m1_dstep)
delta_1, out_delta_1 = generate_sign(delta_1, initial_delta_1, m2_dstep)
delta_2, out_delta_2 = generate_sign(delta_2, initial_delta_2, m3_dstep)

zero_base = (np.where(delta_base == 0.0))[0]
zero_delta_1 = (np.where(delta_1 == 0.0))[0]
zero_delta_2 = (np.where(delta_2 == 0.0))[0]
zero_grip = (np.where(delta_grip == 0.0))[0]
zero_pos = reduce(np.intersect1d, (zero_base, zero_delta_1, zero_delta_2, zero_grip))

delta_base = np.delete(delta_base, zero_pos)
delta_1 = np.delete(delta_1, zero_pos)
delta_2 = np.delete(delta_2, zero_pos)
delta_grip = np.delete(delta_grip, zero_pos)
t = np.delete(t, zero_pos)

low_base_t = generate_0_sig(delta_base, t)
low_delta_1_t = generate_0_sig(delta_1, t)
low_delta_2_t = generate_0_sig(delta_2, t)
low_delta_grip_t = generate_0_sig(delta_grip, t)

zeros_add = np.zeros(len(low_base_t) + len(low_delta_1_t) + len(low_delta_2_t) +
len(low_delta_grip_t))
delta_base = np.concatenate((delta_base, zeros_add))
delta_1 = np.concatenate((delta_1, zeros_add))
delta_2 = np.concatenate((delta_2, zeros_add))
delta_grip = np.concatenate((delta_grip, zeros_add))

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในหน่วยงาน ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

len(low_delta_grip_t))
    low_delta_2 = low_state(len(t) + len(low_base_t) +
len(low_delta_1_t),len(low_delta_2_t),len(low_delta_grip_t))
    low_delta_grip = low_state(len(t) + len(low_base_t) + len(low_delta_1_t) +
len(low_delta_2_t),len(low_delta_grip_t),0)
    t =
np.concatenate((t,np.concatenate((low_base_t,np.concatenate((low_delta_1_t,np.concatenate((low
_delta_2_t,low_delta_grip_t))))))))

t_index = np.argsort(t)
t = [t[i] for i in t_index]
delta = [[delta_base[i],delta_1[i],delta_2[i],delta_grip[i]] for i in t_index]
low = [[low_base[i],low_delta_1[i],low_delta_2[i],low_delta_grip[i]] for i in t_index]

xyz = cal_xyz(out_base,out_delta_1,out_delta_2)
d_out = [[out_base,out_delta_1,out_delta_2,out_grip],xyz,delta,low,t]
# print("xyz: ",d_out[2])
return d_out

def cal_j(v_percent,a_percent,delta_base,delta_1,delta_2,delta_grip):

    motor_v = [var.m1_vmax,var.m2_vmax,var.m3_vmax,var.m4_vmax]
    motor_a = [var.m1_amax,var.m2_amax,var.m3_amax,var.m4_amax]
    motor_u = [var.m1_vmin,var.m2_vmin,var.m3_vmin,var.m4_vmin]
    delta = [delta_base, delta_1, delta_2, delta_grip]
    min_move = [var.m1_dstep,var.m2_dstep,var.m3_dstep,var.m4_dstep]
    time_table, move_table = [], [0,0,0,0]
    for i in range(4):
        v,u,a = motor_v[i]*v_percent/100, motor_u[i]*v_percent/100, motor_a[i]*a_percent/100
        distance_1 = (v*v-u*u)/(2*a)
        if distance_1 < np.abs(delta[i])/2:
            t = (2*(np.sqrt(u*u+2*a*distance_1)-u)/a) + ((np.abs(delta[i])-2*distance_1)/v)
        else:
            t_1 = ((np.sqrt(u*u+2*a*np.abs(delta[i])/2)-u)/a)
            u_3 = u + a*t_1
            t_3 = (np.sqrt(u_3*u_3+2*(a)*(np.abs(delta[i])))-u_3)/(-a)
            t = t_1 + t_3
        time_table.append(t)
    time_max = max(time_table)
    time_table = np.round(np.abs([delta[0]/min_move[0], delta[1]/min_move[1],
delta[2]/min_move[2], delta[3]/min_move[3]]))
    i = np.argmax(time_table)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม เว้นแต่จะได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

v,u,a = motor_v[i]*v_percent/100, motor_u[i]*v_percent/100, motor_a[i]*a_percent/100
distance_1 = (v*v-u*u)/(2*a)
delta_sign = np.sign(delta)
if distance_1 < np.abs(delta[i])/2:
    move_1 = np.arange(min_move[i],distance_1+min_move[i]/2,min_move[i])

    distance_2 = np.abs(delta[i]) - 2*max(move_1)
    move_2 =
np.arange(max(move_1)+min_move[i],max(move_1)+distance_2+min_move[i]/2,min_move[i])

    distance_3 = np.abs(delta[i]) - max(move_2)
    move_3 = np.arange(max(move_2)+min_move[i],np.abs(delta[i])+min_move[i]/2,min_move[i])
    t_1 = (np.sqrt(u*u+2*a*move_1)-u)/a
    t_2 = ((move_2-max(move_1))/v)+max(t_1)
    move_3[np.argmax(move_3)] = np.abs(delta[i])
    t_3 = (np.sqrt(np.abs(v*v+2*(-a)*(move_3-max(move_2))))-v)/(-a)+max(t_2)

    move = np.concatenate((np.concatenate((move_1,move_2)),move_3))
    t = np.concatenate((np.concatenate((t_1,t_2)),t_3))
else:
    move_1 = np.arange(min_move[i],(np.abs(delta[i])/2)+min_move[i]/2,min_move[i])

    move_2 = np.array(0)

    distance_3 = np.abs(delta[i]) - max(move_1)
    move_3 = np.arange(max(move_1)+min_move[i],np.abs(delta[i])+min_move[i]/2,min_move[i])

    t_1 = (np.sqrt(u*u+2*a*move_1)-u)/a
    u_3 = u + a*max(t_1)
    move_3[max_index(move_3)] = np.abs(delta[i])
    t_3 = (np.sqrt(np.abs(u_3*u_3+2*(-a)*(move_3-max(move_1))))-u_3)/(-a)+max(t_1)

    move = np.concatenate((move_1,move_3))
    t = np.concatenate((t_1,t_3))
move *= delta_sign[i]
t = t*time_max/max(t)
len_move = len(t)
for j in range(4):
    if j == i:
        move_table[j] = move
    else:
        min_move[j] = delta[j]/len_move

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

```

if min_move[j] != 0.0:
    move_table[j] =
np.arange(min_move[j],min_move[j]*len_move+min_move[j]/2,min_move[j])
else:
    move_table[j] = np.repeat(0.0,len_move)

delta_base, _ = generate_sign(move_table[0], 0, var.m1_dstep)
delta_1, _ = generate_sign(move_table[1], 0, var.m2_dstep)
delta_2, _ = generate_sign(move_table[2], 0, var.m3_dstep)
delta_grip, _ = generate_sign(move_table[3], 0, var.m4_dstep)

low_base_t = generate_0_sig(delta_base, t)
low_delta_1_t = generate_0_sig(delta_1, t)
low_delta_2_t = generate_0_sig(delta_2, t)
low_delta_grip_t = generate_0_sig(delta_grip, t)

zeros_add = np.zeros(len(low_base_t) + len(low_delta_1_t) + len(low_delta_2_t) +
len(low_delta_grip_t))
delta_base = np.concatenate((delta_base,zeros_add))
delta_1 = np.concatenate((delta_1,zeros_add))
delta_2 = np.concatenate((delta_2,zeros_add))
delta_grip = np.concatenate((delta_grip,zeros_add))

low_base = low_state(len(t),len(low_base_t),len(low_delta_1_t) + len(low_delta_2_t) +
len(low_delta_grip_t))
low_delta_1 = low_state(len(t) + len(low_base_t),len(low_delta_1_t),len(low_delta_2_t) +
len(low_delta_grip_t))
low_delta_2 = low_state(len(t) + len(low_base_t) +
len(low_delta_1_t),len(low_delta_2_t),len(low_delta_grip_t))
low_delta_grip = low_state(len(t) + len(low_base_t) + len(low_delta_1_t) +
len(low_delta_2_t),len(low_delta_grip_t),0)
t =
np.concatenate((t,np.concatenate((low_base_t,np.concatenate((low_delta_1_t,np.concatenate((low
_delta_2_t,low_delta_grip_t))))))))

t_index = np.argsort(t)
t = [t[i] for i in t_index]
delta = [[delta_base[i],delta_1[i],delta_2[i],delta_grip[i]] for i in t_index]
low = [[low_base[i],low_delta_1[i],low_delta_2[i],low_delta_grip[i]] for i in t_index]
d_out = [[0,0,0,0],[0,0,0],delta,low,t]
return d_out

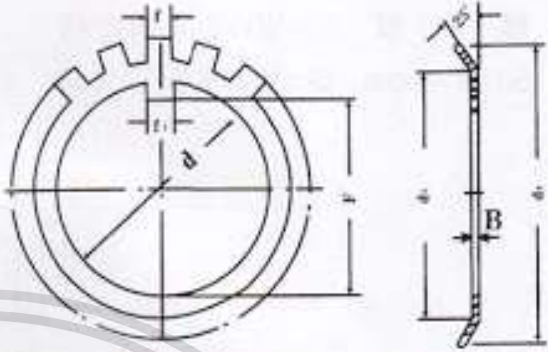
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้ใช้ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Datasheet

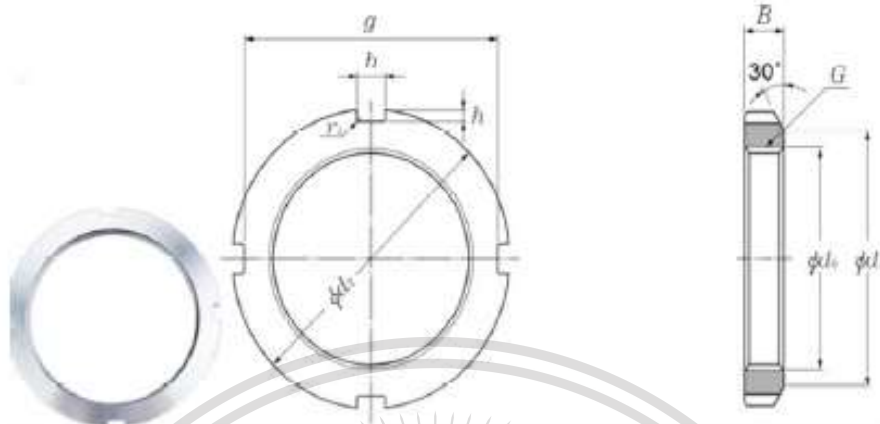
锁紧垫圈 LOCK WASHER																	
内 径 d=10~280mm																	
Inside diamet d=10~280mm																	
																	
型号 Item NO	基本尺寸 Dimensions mm							重量 N (100/Kg)	型号 Item NO	基本尺寸 Dimensions mm							重量 W (100/Kg)
d	d	d	F	B	L	L1			d	d	d	F	B	L	L1		
MB0	10	18.5	21	8.5	1	3	0.131		MB24	120	135	152	115	2	12	14	7.00
MB1	12	17	25	10.5	1	3	0.130		MB24	120	138	164	115	2	12	14	10.50
MB2	15	21	28	13.5	1	4	0.26		MB25	125	148	170	120	2	12	14	11.80
MB3	17	24	32	15.5	1	4	0.32		MB26	130	145	161	125	2	12	14	8.00
MB4	20	26	35	18.5	1	4	0.35		MB26	130	140	175	125	2	12	14	11.80
MB5	25	32	40	23	1.25	5	0.66		MB27	135	160	185	130	2	14	14	14.40
MB6	30	38	48	27.5	1.25	5	0.79		MB28	140	165	172	135	2	14	16	9.00
MB7	35	44	57	32.5	1.25	5	1.05		MB28	140	160	180	135	2	14	16	14.40
MB8	40	50	62	37.5	1.25	5	1.24		MB29	145	170	208	140	2	14	16	16.80
MB9	45	56	69	42.5	1.25	5	1.45		MB30	150	175	200	145	2	14	16	10.00
MB10	50	61	74	47.5	1.25	5	1.60		MB30	150	175	208	145	2	14	16	15.50
MB11	55	67	81	52.5	1.5	5	1.85		MB31	155	182	212	147.5	2(5)	16	16	20.90
MB12	60	73	86	57.5	1.5	5	2.02		MB32	160	188	209	154	2.5	16	18	14.00
MB13	65	79	90	62.5	1.5	5	2.40		MB32	160	182	211	154	2.5	16	18	22.20
MB14	70	85	98	66.5	1.5	5	3.34		MB33	165	193	222	157.5	2.5	16	18	24.10
MB15	75	90	104	71.5	1.5	5	3.56		MB34	170	198	211	164	2.5	16	18	15.0
MB16	80	95	112	76.5	1.8	5	4.65		MB34	170	193	232	164	2.5	16	18	24.80
MB17	85	102	119	81.5	1.8	5	5.21		MB35	180	200	222	174	2.5	18	20	16.00
MB18	90	108	126	86.5	1.8	10	6.10		MB36	180	203	242	174	2.5	18	20	25.80
MB19	95	113	133	91.5	1.8	10	6.70		MB36	180	210	252	184	2.5	18	20	17.80
MB20	100	120	142	96.5	1.8	10	7.63		MB38	190	218	252	184	2.5	18	20	27.80
MB21	105	126	148	100.5	1.8	12	8.26		MB40	200	223	246	194	2.5	18	20	22.00
MB22	110	133	154	105.5	1.8	12	9.40		MB40	200	226	262	194	2.5	18	20	29.30
MB23	115	137	159	110.5	2	12	10.30		MB44	250	250	292	213	3	20	24	35.00
									MB48	240	270	312	233	3	20	24	45.00
									MB52	260	300	342	253	3	24	28	60.00
									MB56	280	320	362	273	3	24	28	82.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Lock nut

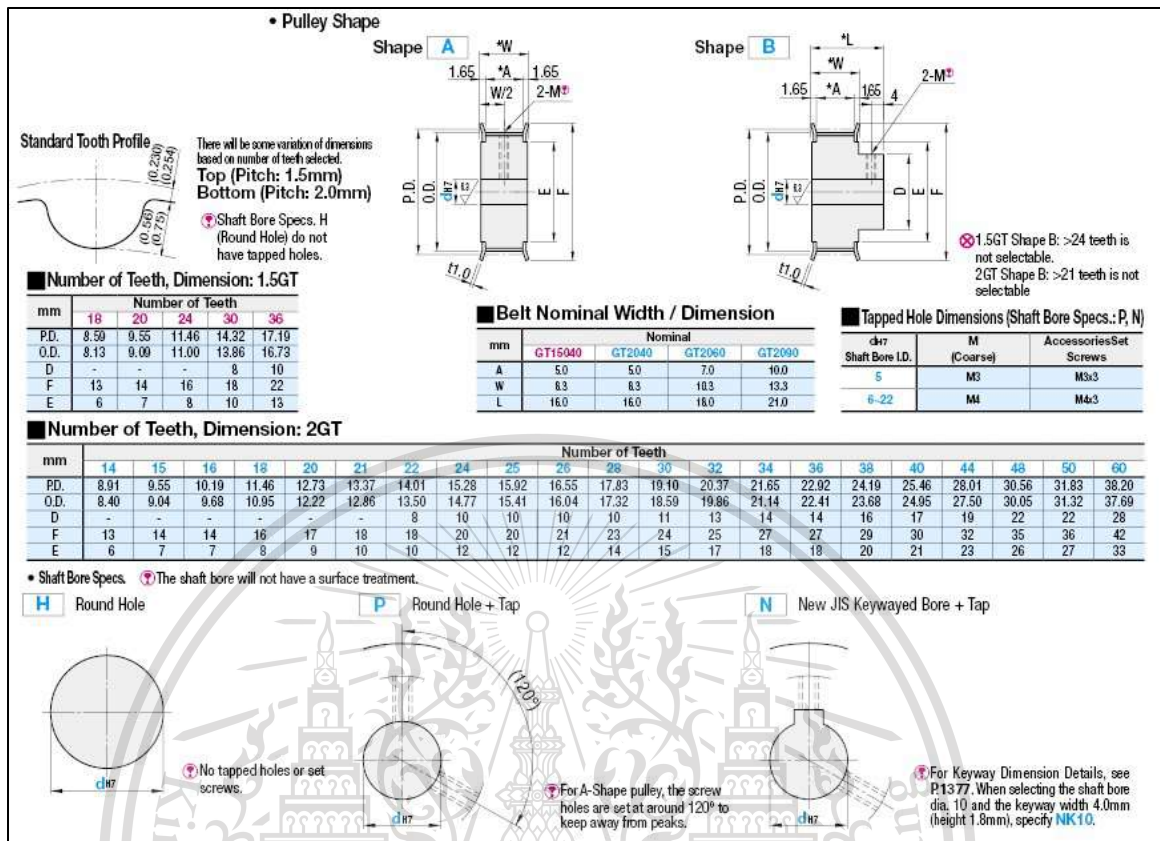


Lock nut	Dimensions (mm)									Weight (kg)	Load (kg)
	G(I)	d2	d1	g	b	h	d5	B	r1		
KM00	M10×0.75	18	13.5	14	3	2	10.5	4	0.4	0.005	MB
KM01	M12×1	22	17	18	3	2	12.5	4	0.4	0.007	MB
KM02	M15×1	25	21	21	4	2	15.5	5	0.4	0.01	MB
KM03	M17×1	28	24	24	4	2	17.5	5	0.4	0.013	MB
KM04	M20×1	32	26	28	4	2	20.5	6	0.4	0.019	MB
KM05	M25×1.5	38	32	34	5	2	25.8	7	0.4	0.025	MB
KM06	M30×1.5	45	38	41	5	2	30.8	7	0.4	0.043	MB
KM07	M35×1.5	52	44	48	5	2	35.8	8	0.4	0.053	MB
KM08	M40×1.5	58	50	53	6	2.5	40.8	9	0.5	0.085	MB
KM09	M45×1.5	65	56	60	6	2.5	45.8	10	0.5	0.119	MB
KM10	M50×1.5	70	61	65	6	2.5	50.8	11	0.5	0.148	MB
KM11	M55×2	75	67	69	7	3	56	11	0.5	0.158	MB
KM12	M60×2	80	73	74	7	3	61	11	0.5	0.174	MB
KM13	M65×2	85	79	79	7	3	66	12	0.5	0.203	MB
KM14	M70×2	92	85	85	8	3.5	71	12	0.5	0.242	MB
KM15	M75×2	98	90	91	8	3.5	76	13	0.5	0.287	MB
KM16	M80×2	105	95	98	8	3.5	81	15	0.6	0.397	MB
KM17	M85×2	110	102	103	8	3.5	86	16	0.6	0.451	MB
KM18	M90×2	120	108	112	10	4	91	16	0.6	0.556	MB
KM19	M95×2	125	113	117	10	4	96	17	0.6	0.658	MB
KM20	M100×2	130	120	122	10	4	101	18	0.6	0.698	MB
KM21	M105×2	140	126	130	12	5	106	18	0.7	0.845	MB
KM22	M110×2	145	133	136	12	5	111	19	0.7	0.965	MB
KM23	M115×2	150	137	140	12	5	116	19	0.7	1.01	MB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

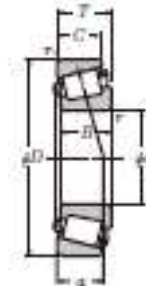
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

● Tapered Roller Bearings

NTN

Metric series



15 ~ 30mm

d	D	T	B	C	F _{0.6}	F _{0.8}	Basic load ratings				Limiting speeds		Bearing numbers
							dyn ¹⁾	static	dyn ¹⁾	static	grease	oil	
			mm				kN	kN	kN	kN	min ¹	min ¹	
15	42	14.25	13	11	1	1	23.2	20.8	2 370	2 120	9 900	13 000	4T-30302
	40	13.25	12	11	1	1	20.5	20.3	2 000	2 070	9 900	13 000	4T-30209
17	40	17.25	16	14	1	1	27.3	26.3	2 790	2 860	9 900	13 000	4T-32209
	40	17.25	16	14	1	1	26.2	26.2	2 670	2 670	9 900	13 000	4T-32209R ²⁾
	47	15.25	14	12	1	1	23.0	26.3	2 640	2 660	8 000	12 000	4T-30309
20	42	15	15	12	0.6	0.6	24.9	27.9	2 540	2 640	9 500	13 000	4T-32004X
	47	15.25	14	12	1	1	26.2	28.7	2 870	2 890	8 800	12 000	4T-30204
	47	19.25	18	15	1	1	36.5	39.5	3 700	4 000	8 800	12 000	4T-32204
	52	16.25	16	13	1.5	1.5	35.5	34.3	3 600	3 450	8 000	11 000	4T-30304A
	52	16.25	16	12	1.5	1.5	31.0	31.0	3 150	3 150	7 600	10 000	4T-30304CA
25	52	22.25	21	18	1.5	1.5	46.5	46.5	4 750	4 650	8 000	11 000	4T-32304
	44	15	15	11.5	0.6	0.6	27.0	31.5	2 750	3 250	8 900	12 000	4T-320/22X
	47	15	15	11.5	0.6	0.6	27.8	33.5	2 800	3 450	7 900	11 000	4T-32005X
	47	17	14	12	0.6	0.6	32.5	40.5	3 300	4 150	8 000	11 000	4T-33005
	52	16.25	15	13	1	1	31.5	34.0	3 200	3 450	7 300	9 800	4T-30205
	52	19.25	18	16	1	1	45.0	47.0	4 500	4 800	7 300	9 800	4T-32205
	52	19.25	18	16	1	1	38.0	43.0	3 650	4 400	7 300	9 800	4T-32205R ²⁾
	52	19.25	18	15	1	1	36.0	46.5	3 600	4 750	7 100	9 400	4T-32205C
	52	19.25	18	15	1	1	34.5	42.0	3 500	4 250	7 100	9 400	4T-32205CR ²⁾
	52	22	22	18	1	1	47.5	57.5	4 850	5 850	7 300	9 800	4T-33205
28	52	18.25	17	15	1.5	1.5	48.5	47.5	4 850	4 850	6 700	8 900	4T-30305
	62	18.25	17	14	1.5	1.5	41.5	41.5	4 250	4 250	6 400	8 500	4T-30305C
	62	18.25	17	13	1.5	1.5	40.5	43.5	4 150	4 450	5 900	7 800	4T-30305D
	62	25.25	24	20	1.5	1.5	61.5	64.5	6 250	6 600	6 700	8 900	4T-32305
	52	16	16	12	1	1	33.0	40.5	3 400	4 150	7 300	9 700	4T-320/28X
	58	24	24	19	1	1	58.0	69.5	5 950	7 100	6 700	8 900	4T-332/28
30	55	17	17	13	1	1	37.5	46.0	3 800	4 700	6 900	9 200	4T-32006X
	55	20	20	16	1	1	42.5	54.0	4 300	5 500	6 900	9 200	4T-33006
	62	17.25	16	14	1	1	43.5	48.0	4 450	4 900	6 300	8 400	4T-30206
	62	21.25	20	17	1	1	54.5	64.0	5 600	6 550	6 300	8 400	4T-32206
	62	21.25	20	17	1	1	50.0	60.0	5 100	6 100	6 100	8 100	4T-32206C
	62	25	25	19.5	1	1	65.0	77.0	6 600	7 850	6 300	8 400	4T-33206
	72	20.75	19	16	1.5	1.5	60.0	61.0	6 100	6 200	5 700	7 600	4T-30306

1) Minimal allowable dimension for chamfer dimension r or r₁.

2) This bearing does not incorporate the submini dimensions.

B-128

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



Features

- Absolute encoder / absolute code output
- Digital output
- Sturdy construction
- Bushing mount
- Available with PC board mounting bracket (optional)
- *RoHS compliant

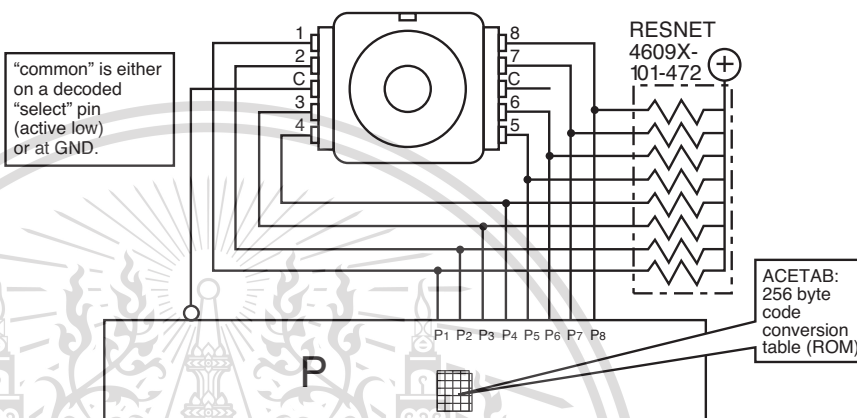
EAW - Absolute Contacting Encoder (ACE™)

General Information

Until now, the choice of an absolute encoder meant an expensive, and larger-sized product. Through the use of combinatorial mathematics, the absolute code pattern of the Bourns® Absolute Contacting Encoder (ACE™) is placed on a single track for a very economical, energy-efficient and compact product. Bourns® ACE™ provides an absolute digital output that will also retain its last position in the event of a power failure.

An intelligent alternative to incremental encoders and potentiometers, the Bourns® ACE™ is ideally suited for many industrial, automotive, medical and consumer product applications.

Recommended Control Diagram for ACE-128



Electrical Characteristics

Output.....	8-bit code with 128 absolute states
Closed Circuit Resistance	5 ohms maximum
Open Circuit Resistance	100 K ohms minimum
Contact Rating	10 milliamp @ 10 VDC or 0.1 watt maximum
Insulation Resistance (500 VDC)	1,000 megohms minimum
Dielectric Withstanding Voltage (MIL-STD-202 Method 301)	1,000 VAC minimum
Sea Level.....	Continuous
Electrical Travel	2.7 milliseconds maximum*
Contact Bounce (60 RPM).....	120 maximum
RPM (Operating)	

Environmental Characteristics

Operating Temperature Range	-40 °C to +85 °C (-40 °F to +185 °F)
Storage Temperature Range	-40 °C to +85 °C (-40 °F to +185 °F)
Humidity.....	MIL-STD-202, Method 103B, Condition B
Vibration	15 G
Contact Bounce	0.1 millisecond maximum
Shock.....	50 G
Contact Bounce	0.1 millisecond maximum
Rotational Life.....	50,000 shaft revolutions minimum
IP Rating.....	IP 40

Mechanical Characteristics

Mechanical Angle	360 ° Continuous
Running Torque	0.5 to 1.5 N-cm (0.75 to 2.50 oz-in.)
Mounting Torque	79 N-cm (7 lb.-in.) maximum
Shaft Side Load (Static).....	4.5 kg (10 lbs.) minimum
Weight	Approximately 14 gms. (0.50 oz.)
Terminals	Printed circuit board terminals
Soldering Condition	
Manual Soldering.....	96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu solid wire or no-clean rosin cored wire
Wave Soldering	370 °C (700 °F) max. for 3 seconds
Wash processes	96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu solder with no-clean flux
Marking.....	260 °C (500 °F) max. for 5 seconds
Hardware.....	Not recommended
Packaging.....	Manufacturer's name and trademark, part number, and date code.
	One lockwasher and one mounting nut are shipped with each encoder, except where noted in the part number.
	45 pcs./tray

*High probability of missing quadrature codes with maximum bounce.

*RoHS Directive 2002/95/EC Jan. 27, 2003 including annex and RoHS Recast 2011/65/EU June 8, 2011.

Specifications are subject to change without notice.

The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time.

Users should verify actual device performance in their specific applications.

EAW - Absolute Contacting Encoder (ACE™)

BOURNS®

Pin Output Code For ACE-128

Bit/Pin correlation: b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1 b0 = p8 p7 p6 p5 p4 p3 p2 p1
A binary "1" denotes an "open" switch and a binary "0" denotes a "closed" switch.
Positions 0-127 are seen by a clockwise rotation of the shaft.

Position	p8	p7	p6	p5	p4	p3	p2	p1	Decimal Output
0	0	1	1	1	1	1	1	1	127
1	0	0	1	1	1	1	1	1	63
2	0	0	1	1	1	1	1	0	62
3	0	0	1	1	1	0	1	0	58
4	0	0	1	1	1	0	0	0	56
5	1	0	1	1	1	0	0	0	184
6	1	0	0	1	1	0	0	0	152
7	0	0	0	1	1	0	0	0	24
8	0	0	0	0	1	0	0	0	8
9	0	1	0	0	1	0	0	0	72
10	0	1	0	0	1	0	0	1	73
11	0	1	0	0	1	1	0	1	77
12	0	1	0	0	1	1	1	1	79
13	0	0	0	0	1	1	1	1	15
14	0	0	1	0	1	1	1	1	47
15	1	0	1	0	1	1	1	1	175
16	1	0	1	1	1	1	1	1	191
17	1	0	0	1	1	1	1	1	159
18	0	0	0	1	1	1	1	1	31
19	0	0	0	1	1	1	0	1	29
20	0	0	0	1	1	1	0	0	28
21	0	1	0	1	1	1	0	0	92
22	0	1	0	0	1	1	0	0	76
23	0	0	0	0	1	1	0	0	12
24	0	0	0	0	0	1	0	0	4
25	0	0	1	0	0	1	0	0	36
26	1	0	1	0	0	1	0	0	164
27	1	0	1	0	0	1	1	0	166
28	1	0	1	0	0	1	1	1	167
29	1	0	0	0	0	1	1	1	135
30	1	0	0	1	0	1	1	1	151
31	1	1	0	1	0	1	1	1	215
32	1	1	0	1	1	1	1	1	223
33	1	1	0	0	1	1	1	1	207
34	1	0	0	0	1	1	1	1	143
35	1	0	0	0	1	1	1	0	142
36	0	0	0	0	1	1	1	0	14
37	0	0	1	0	1	1	1	0	46
38	0	0	1	0	0	1	1	0	38
39	0	0	0	0	0	1	1	0	6
40	0	0	0	0	0	0	1	0	2
41	0	0	0	1	0	0	1	0	18
42	0	1	0	1	0	0	1	0	82
43	0	1	0	1	0	0	1	1	83
44	1	1	0	1	0	0	1	1	211
45	1	1	0	0	0	0	1	1	195
46	1	1	0	0	1	0	1	1	203
47	1	1	1	0	1	0	1	1	235
48	1	1	1	0	1	1	1	1	239
49	1	1	1	0	0	1	1	1	231
50	1	1	0	0	0	1	1	1	199
51	0	1	0	0	0	1	1	1	71
52	0	0	0	0	0	1	1	1	7
53	0	0	0	1	0	1	1	1	23
54	0	0	0	1	0	0	1	1	19
55	0	0	0	0	0	0	1	1	3
56	0	0	0	0	0	0	0	1	1
57	0	0	0	0	1	0	0	1	9
58	0	0	1	0	1	0	0	1	41
59	1	1	1	0	1	0	0	1	169
60	1	1	1	0	1	0	0	1	233
61	1	1	1	0	0	0	0	1	225
62	1	1	1	0	0	1	0	1	229
63	1	1	1	1	0	1	0	1	245

Position	p8	p7	p6	p5	p4	p3	p2	p1	Decimal Output
64	1	1	1	1	0	1	1	1	247
65	1	1	1	1	0	0	1	1	243
66	1	1	1	0	0	0	1	1	227
67	1	0	1	0	0	0	1	1	163
68	1	0	0	0	0	0	1	1	131
69	1	0	0	0	1	0	1	1	139
70	1	0	0	0	1	0	0	1	137
71	1	0	0	0	0	0	0	1	129
72	1	0	0	0	0	0	0	0	128
73	1	0	0	0	0	1	0	0	132
74	1	0	0	1	0	1	0	0	148
75	1	1	0	1	0	1	0	0	212
76	1	1	1	1	0	1	0	0	244
77	1	1	1	1	0	0	0	0	240
78	1	1	1	1	0	0	1	0	242
79	1	1	1	1	1	0	1	0	250
80	1	1	1	1	1	0	1	1	251
81	1	1	1	1	1	0	0	1	249
82	1	1	1	1	0	0	0	1	241
83	1	1	0	1	0	0	0	1	209
84	1	1	0	0	0	0	0	1	193
85	1	1	0	0	0	1	0	1	197
86	1	1	0	0	0	1	0	0	196
87	1	1	0	0	0	0	0	0	192
88	0	1	0	0	0	0	0	0	64
89	0	1	0	0	0	0	1	0	66
90	0	1	0	0	1	0	1	0	74
91	0	1	1	0	1	0	1	0	106
92	0	1	1	1	1	0	1	0	122
93	0	1	1	1	1	0	0	0	120
94	0	1	1	1	1	0	0	1	121
95	0	1	1	1	1	1	0	1	125
96	1	1	1	1	1	1	0	1	253
97	1	1	1	1	1	1	0	0	252
98	1	1	1	1	1	0	0	0	248
99	1	1	1	0	1	0	0	0	232
100	1	1	1	0	0	0	0	0	224
101	1	1	1	0	0	0	1	0	226
102	0	1	1	0	0	0	1	0	98
103	0	1	1	0	0	0	0	0	96
104	0	0	1	0	0	0	0	0	32
105	0	0	1	0	0	0	0	1	33
106	0	0	1	0	0	1	0	1	37
107	0	0	1	1	0	1	0	1	53
108	0	0	1	1	1	1	0	1	61
109	0	0	1	1	1	1	0	0	60
110	1	0	1	1	1	1	0	0	188
111	1	0	1	1	1	1	1	0	190
112	1	1	1	1	1	1	1	0	254
113	0	1	1	1	1	1	1	0	126
114	0	1	1	1	1	1	0	0	124
115	0	1	1	1	0	1	0	0	116
116	0	1	1	1	0	0	0	0	112
117	0	1	1	1	0	0	0	1	113
118	0	0	1	1	0	0	0	1	49
119	0	0	1	1	0	0	0	0	48
120	0	0	0	1	0	0	0	0	16
121	1	0	0	1	0	0	0	0	144
122	1	0	0	1	0	0	1	0	146
123	1	0	0	1	1	0	1	0	154
124	1	0	0	1	1	1	1	0	158
125	0	0	0	1	1	1	1	0	30
126	0	0	0	1	1	1	1	0	94
127	0	1	0	1	1	1	1	1	95

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Specifications are subject to change without notice.

The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time.

Forbidden to modify the content, and cite Bourns. Users should verify actual device performance in their specific applications.

EAW - Absolute Contacting Encoder (ACE™)

BOURNS®

How to Order

PART NUMBERING SYSTEM

E	A	W	0	J	-	B	2	4	-	A	E	0	1	2	8	L
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Code	Rotational Life
A	50,000 Revolutions

BUSHING CONFIGURATION	
Code	Description
W	9 mm x 1/4 " Length. Threaded M9x0.75
L	9 mm x 3/8 " Length. Threaded M9x0.75. (Use B shaft only.)

DETENT CONFIGURATION	
Code	Description
0	Non-Detented

ANTI-ROTATION LUG POSITION	
Code	Description
J	9:00 Position
D	None

SHAFT STYLE (See Outline Drawing for Details)	
Code	Description
B	Plain with Inserted Slot (1/4 " Dia.)
C	Single Flatted (1/4 " Dia.)
R	Plain with Inserted Slot (6 mm Dia.)

RoHS IDENTIFIER	
Code	Description
L	Compliant

PERFORMANCE CODE		
Code	Detents	States/Rev.
E0128	0	128

HOUSING TERMINAL CONFIGURATION (X indicates "Equipped With")					
Features	Code				
	A	B	C	H	K
Rear Mount Terminals	X	X	X		
Forward Facing Terminals				X	X
PCB Bracket		X	X		
Hardware Included	X		X	X	

SHAFT LENGTH (FMS)		
Code	Description	Available Shaft Styles
24	3/4 " (19.05 mm) Length	B, C
	Metric	
19	19 mm Length	R

The sample part number demonstrates the identification code for Bourns contacting encoders.

The part number shown is a commonly used model, typically available from stock.

*Consult factory concerning special inquiries.

REV. 10/14

Specifications are subject to change without notice.

The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time. Users should verify actual device performance in their specific applications.

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

16-Bit I/O Expander with Serial Interface

Features

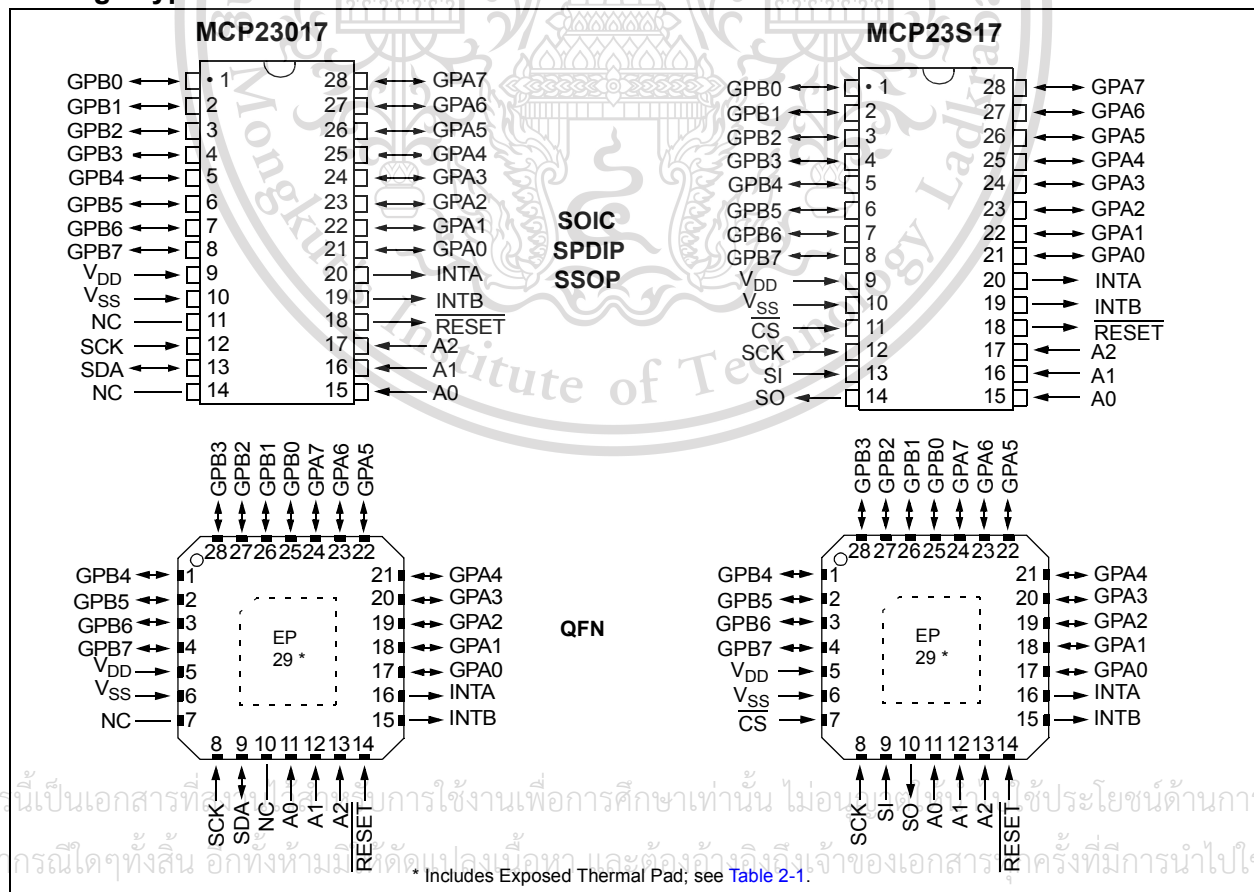
- 16-Bit Remote Bidirectional I/O Port:
 - I/O pins default to input
- High-Speed I²C Interface (**MCP23017**):
 - 100 kHz
 - 400 kHz
 - 1.7 MHz
- High-Speed SPI Interface (**MCP23S17**):
 - 10 MHz (maximum)
- Three Hardware Address Pins to Allow Up to Eight Devices On the Bus
- Configurable Interrupt Output Pins:
 - Configurable as active-high, active-low or open-drain
- INTA and INTB Can Be Configured to Operate Independently or Together

- Configurable Interrupt Source:
 - Interrupt-on-change from configured register defaults or pin changes
- Polarity Inversion Register to Configure the Polarity of the Input Port Data
- External Reset Input
- Low Standby Current: 1 μ A (max.)
- Operating Voltage:
 - 1.8V to 5.5V @ -40°C to +85°C
 - 2.7V to 5.5V @ -40°C to +85°C
 - 4.5V to 5.5V @ -40°C to +125°C

Packages

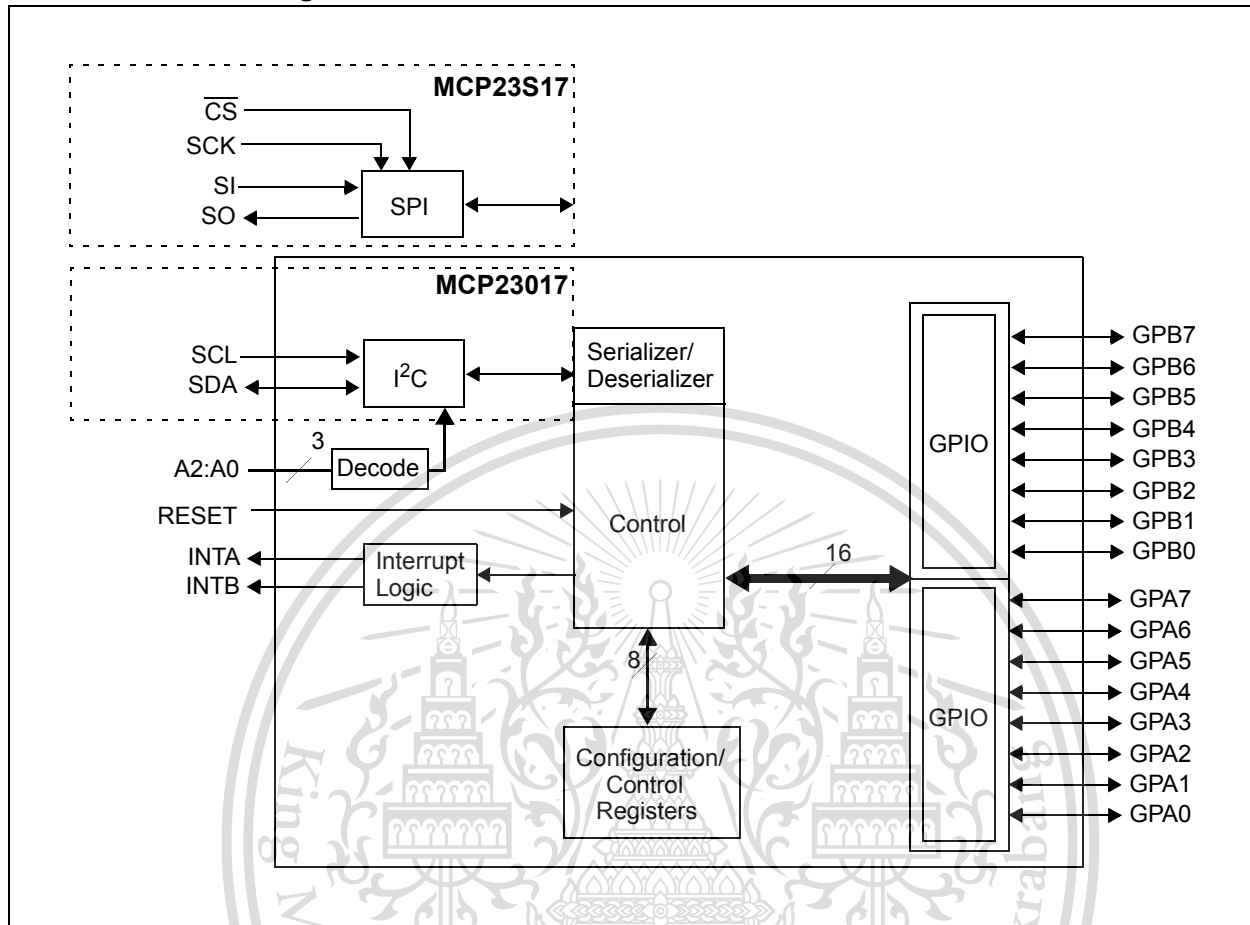
- 28-pin QFN, 6 x 6 mm Body
- 28-pin SOIC, Wide, 7.50 mm Body
- 28-pin SPDIP, 300 mil Body
- 28-pin SSOP, 5.30 mm Body

Package Types



MCP23017/MCP23S17

Functional Block Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use

1.0 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Absolute Maximum Ratings †

Ambient temperature under bias	-40°C to +125°C
Storage temperature	-65°C to +150°C
Voltage on V_{DD} with respect to V_{SS}	-0.3V to +5.5V
Voltage on all other pins with respect to V_{SS} (except V_{DD})	-0.6V to ($V_{DD} + 0.6V$)
Total power dissipation	700 mW
Maximum current out of V_{SS} pin	150 mA
Maximum current into V_{DD} pin	125 mA
Input clamp current, I_{IK} ($V_I < 0$ or $V_I > V_{DD}$)	± 20 mA
Output clamp current, I_{OK} ($V_O < 0$ or $V_O > V_{DD}$)	± 20 mA
Maximum output current sunk by any output pin	25 mA
Maximum output current sourced by any output pin	25 mA
ESD protection on all pins (HBM:MM)	4 kV:400V

† **Notice:** Stresses above those listed under “Maximum Ratings” may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at those or any other conditions above those indicated in the operational listings of this specification is not implied. Exposure to maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use

MCP23017/MCP23S17

1.1 DC Characteristics

TABLE 1-1: DC CHARACTERISTICS

Electrical Specifications: Unless otherwise noted, $1.8\text{V} \leq V_{\text{DD}} \leq 5.5\text{V}$ at $-40^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{A}} \leq +125^{\circ}\text{C}$							
Param. No.	Characteristic	Sym.	Min.	Typ. ⁽¹⁾	Max.	Units	Conditions
D001	Supply Voltage	V_{DD}	1.8	—	5.5	V	
D002	V_{DD} Start Voltage to ensure Power-on Reset	V_{POR}	—	V_{SS}	—	V	
D003	V_{DD} Rise Rate to ensure Power-on Reset	SV_{DD}	0.05	—	—	V/ms	Design guidance only. Not tested.
D004	Supply Current	I_{DD}	—	—	1	mA	SCL/SCK = 1 MHz
D005	Standby current	I_{DSS8}	—	—	1	μA	$-40^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{A}} \leq +85^{\circ}\text{C}$
			—	—	3	μA	$4.5\text{V} \leq V_{\text{DD}} \leq 5.5\text{V}$ $+85^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{A}} \leq +125^{\circ}\text{C}$ (Note 1)
Input Low Voltage							
D030	A0, A1, A2 (TTL buffer)	V_{IL}	V_{SS}	—	$0.15 V_{\text{DD}}$	V	
D031	$\overline{\text{CS}}$, GPIO, SCL/SCK, SDA, $\overline{\text{RESET}}$ (Schmitt Trigger)	V_{IL}	V_{SS}	—	$0.2 V_{\text{DD}}$	V	
Input High Voltage							
D040	A0, A1, A2 (TTL buffer)	V_{IH}	$0.25 V_{\text{DD}} + 0.8$	—	V_{DD}	V	
D041	$\overline{\text{CS}}$, GPIO, SCL/SCK, SDA, $\overline{\text{RESET}}$ (Schmitt Trigger)	V_{IH}	$0.8 V_{\text{DD}}$	—	V_{DD}	V	For entire V_{DD} range
Input Leakage Current							
D060	I/O port pins	I_{IL}	—	—	± 1	μA	$V_{\text{SS}} \leq V_{\text{PIN}} \leq V_{\text{DD}}$
Output Leakage Current							
D065	I/O port pins	I_{LO}	—	—	± 1	μA	$V_{\text{SS}} \leq V_{\text{PIN}} \leq V_{\text{DD}}$
D070	GPIO weak pull-up current	I_{PU}	40	75	115	μA	$V_{\text{DD}} = 5\text{V}$ GP pins = V_{SS}
Output Low-Voltage							
D080	GPIO	V_{OL}	—	—	0.6	V	$I_{\text{OL}} = 8.0\text{ mA}$ $V_{\text{DD}} = 4.5\text{V}$
	INT	V_{OL}	—	—	0.6	V	$I_{\text{OL}} = 1.6\text{ mA}$ $V_{\text{DD}} = 4.5\text{V}$
	SO, SDA	V_{OL}	—	—	0.6	V	$I_{\text{OL}} = 3.0\text{ mA}$ $V_{\text{DD}} = 1.8\text{V}$
	SDA	V_{OL}	—	—	0.8	V	$I_{\text{OL}} = 3.0\text{ mA}$ $V_{\text{DD}} = 4.5\text{V}$
Output High-Voltage							
D090	GPIO, INT, SO	V_{OH}	$V_{\text{DD}} - 0.7$	—	—	V	$I_{\text{OH}} = -3.0\text{ mA}$ $V_{\text{DD}} = 4.5\text{V}$
			$V_{\text{DD}} - 0.7$	—	—		$I_{\text{OH}} = -400\text{ }\mu\text{A}$ $V_{\text{DD}} = 1.8\text{V}$
Capacitive Loading Specs on Output Pins							
D101	GPIO, SO, INT	C_{IO}	—	—	50	pF	
D102	SDA	C_{B}	—	—	400	pF	

Note 1: This parameter is characterized, not 100% tested.

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

1.2 AC Characteristics

FIGURE 1-1: LOAD CONDITIONS FOR DEVICE TIMING SPECIFICATIONS

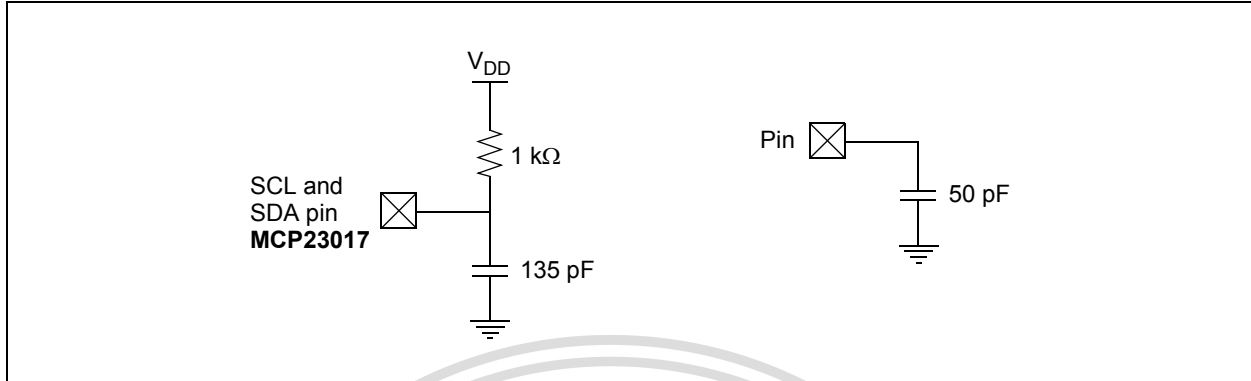


FIGURE 1-2: RESET AND DEVICE RESET TIMER TIMING

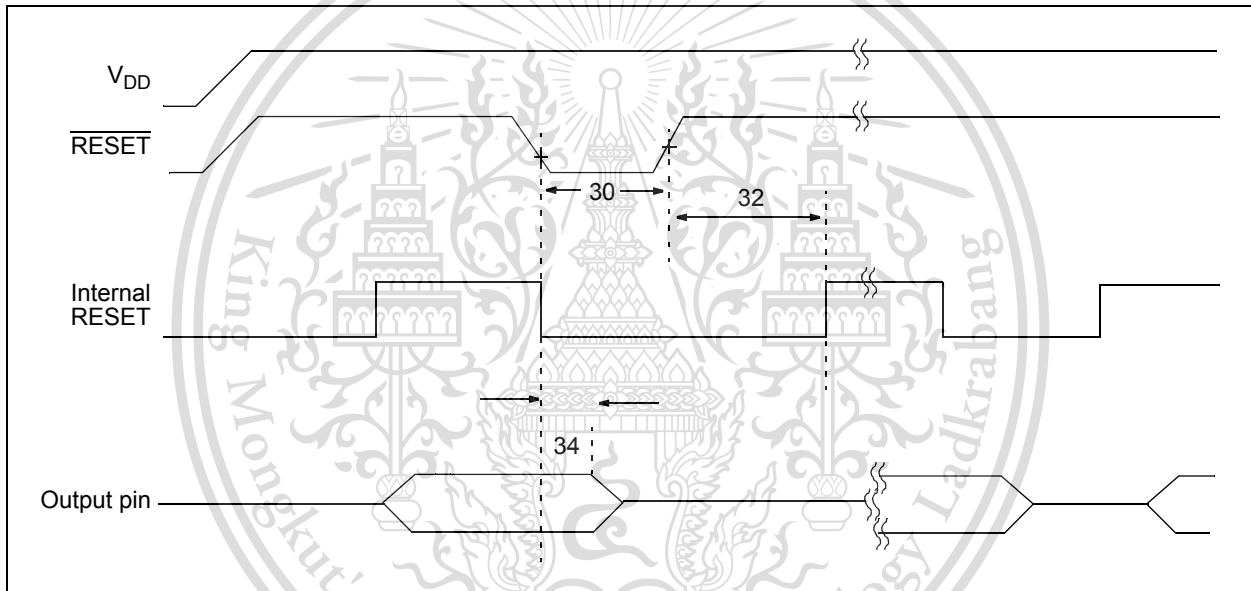


TABLE 1-2: DEVICE RESET SPECIFICATIONS

AC Characteristics: Unless otherwise noted, $1.8V \leq V_{DD} \leq 5.5V$ at $-40^{\circ}C \leq T_A \leq +125^{\circ}C$							
Param. No.	Characteristic	Sym.	Min.	Typ. ⁽¹⁾	Max.	Units	Conditions
30	RESET Pulse Width (Low)	T_{RSTL}	1	—	—	μs	
32	Device Active After Reset high	T_{HLD}	—	0	—	ns	$V_{DD} = 5.0V$
34	Output High-Impedance From RESET Low	T_{IOZ}	—	—	1	μs	

Note 1: This parameter is characterized, not 100% tested.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use

MCP23017/MCP23S17

FIGURE 1-5: SPI INPUT TIMING

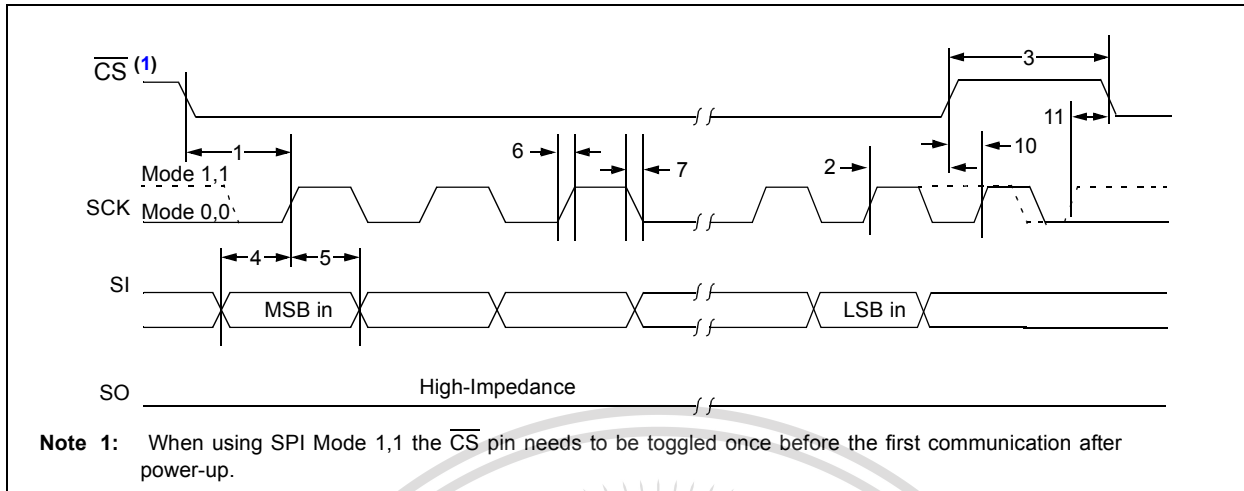


FIGURE 1-6: SPI OUTPUT TIMING

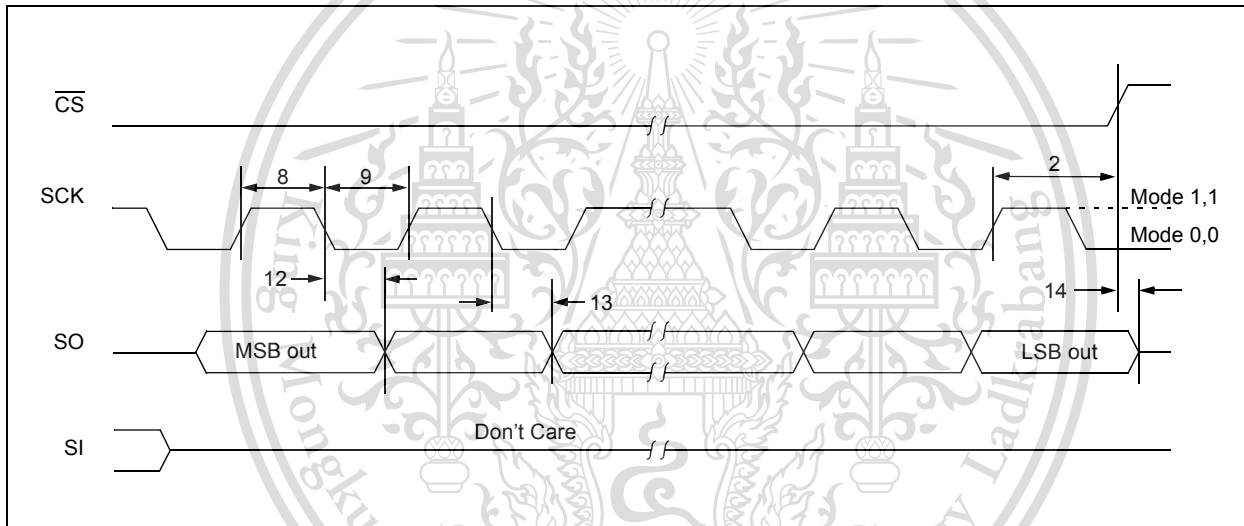


TABLE 1-4: SPI INTERFACE REQUIREMENTS

SPI Interface AC Characteristics: Unless otherwise noted, $1.8\text{V} \leq V_{\text{DD}} \leq 5.5\text{V}$ at $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$							
Param. No.	Characteristic	Sym.	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
—	Clock Frequency	F_{CLK}	—	—	5	MHz	1.8V – 5.5V
			—	—	10	MHz	2.7V – 5.5V
			—	—	10	MHz	4.5V – 5.5V
1	$\overline{\text{CS}}$ Setup Time	T_{CSS}	50	—	—	ns	
2	$\overline{\text{CS}}$ Hold Time	T_{CSH}	100	—	—	ns	1.8V – 5.5V
			50	—	—	ns	2.7V – 5.5V
3	$\overline{\text{CS}}$ Disable Time	T_{CSD}	100	—	—	ns	1.8V – 5.5V
			50	—	—	ns	2.7V – 5.5V
4	Data Setup Time	T_{SU}	20	—	—	ns	1.8V – 5.5V
			10	—	—	ns	2.7V – 5.5V

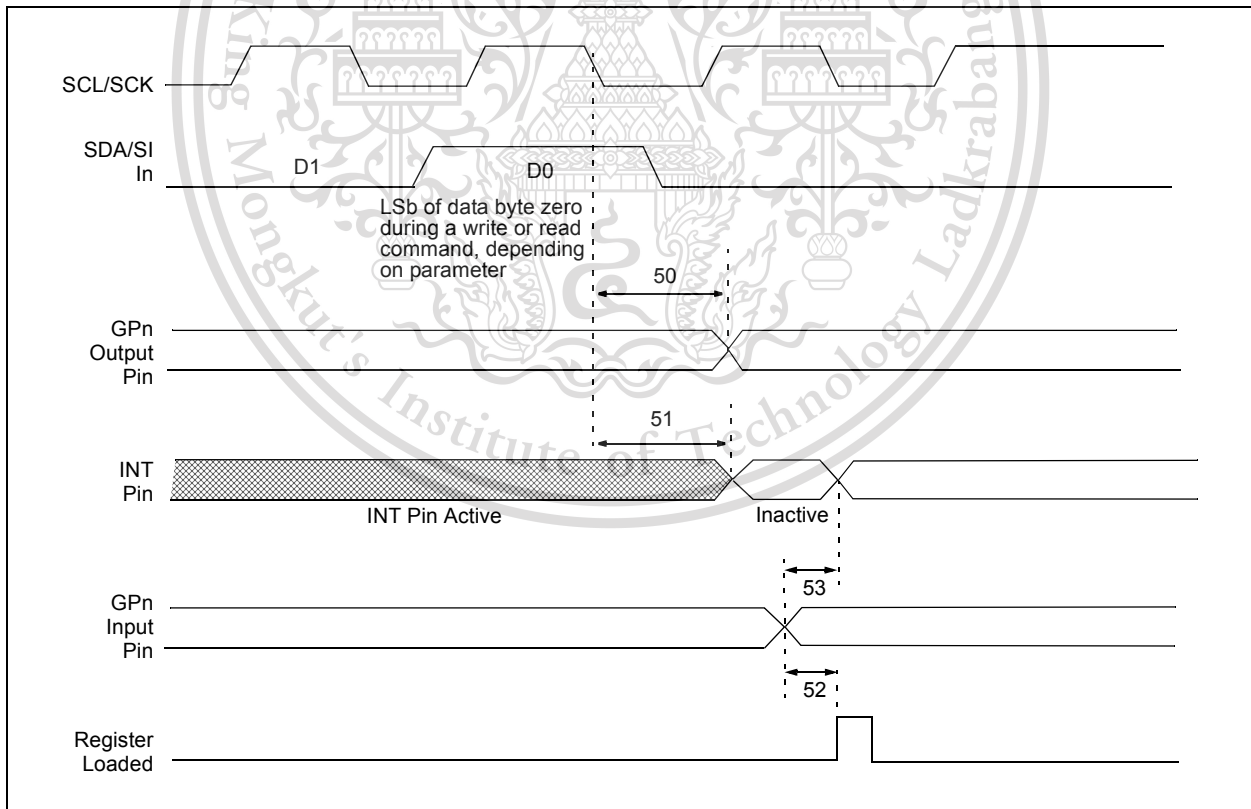
Note 1: This parameter is characterized, not 100% tested.

TABLE 1-4: SPI INTERFACE REQUIREMENTS (CONTINUED)

SPI Interface AC Characteristics: Unless otherwise noted, $1.8V \leq V_{DD} \leq 5.5V$ at $-40^{\circ}C \leq T_A \leq +125^{\circ}C$							
Param. No.	Characteristic	Sym.	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
5	Data Hold Time	T_{HD}	20	—	—	ns	1.8V – 5.5V
			10	—	—	ns	2.7V – 5.5V
6	CLK Rise Time	T_R	—	—	2	μs	Note 1
7	CLK Fall Time	T_F	—	—	2	μs	Note 1
8	Clock High Time	T_{HI}	90	—	—	ns	1.8V – 5.5V
			45	—	—	ns	2.7V – 5.5V
9	Clock Low Time	T_{LO}	90	—	—	ns	1.8V – 5.5V
			45	—	—	ns	2.7V – 5.5V
10	Clock Delay Time	T_{CLD}	50	—	—	ns	
11	Clock Enable Time	T_{CLE}	50	—	—	ns	
12	Output Valid from Clock Low	T_V	—	—	90	ns	1.8V – 5.5V
			—	—	45	ns	2.7V – 5.5V
13	Output Hold Time	T_{HO}	0	—	—	ns	
14	Output Disable Time	T_{DIS}	—	—	100	ns	

Note 1: This parameter is characterized, not 100% tested.

FIGURE 1-7: GPIO AND INT TIMING



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use

MCP23017/MCP23S17

TABLE 1-5: GP AND INT PINS REQUIREMENTS

GP and INT Pins AC Characteristics: Unless otherwise noted, $1.8V \leq V_{DD} \leq 5.5V$ at $-40^{\circ}C \leq T_A \leq +125^{\circ}C$							
Param. No.	Characteristic	Sym.	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
50	Serial Data to Output Valid	T_{GPOV}	—	—	500	ns	
51	Interrupt Pin Disable Time	T_{INTD}	—	—	600	ns	
52	GP Input Change to Register Valid	T_{GPIV}	—	—	450	ns	
53	IOC Event to INT Active	T_{GPINT}	—	—	600	ns	
	Glitch Filter on GP Pins	T_{GLITCH}	—	—	150	ns	Note 1

Note 1: This parameter is characterized, not 100% tested.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use

MCP23017/MCP23S17

2.0 PIN DESCRIPTIONS

The descriptions of the pins are listed in [Table 2-1](#).

TABLE 2-1: PINOUT DESCRIPTION

Pin Name	QFN	SOIC SPDIP SSOP	Pin Type	Function
GPB0	25	1	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPB1	26	2	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPB2	27	3	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPB3	28	4	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPB4	1	5	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPB5	2	6	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPB6	3	7	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPB7	4	8	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
V _{DD}	5	9	P	Power
V _{SS}	6	10	P	Ground
NC/ $\overline{CS}$	7	11	I	NC (MCP23017)/Chip Select (MCP23S17)
SCK	8	12	I	Serial clock input
SDA/SI	9	13	I/O	Serial data I/O (MCP23017)/Serial data input (MCP23S17)
NC/SO	10	14	O	NC (MCP23017)/Serial data out (MCP23S17)
A0	11	15	I	Hardware address pin. Must be externally biased.
A1	12	16	I	Hardware address pin. Must be externally biased.
A2	13	17	I	Hardware address pin. Must be externally biased.
$\overline{RESET}$	14	18	I	Hardware reset. Must be externally biased.
INTB	15	19	O	Interrupt output for PORTB. Can be configured as active-high, active-low or open-drain.
INTA	16	20	O	Interrupt output for PORTA. Can be configured as active-high, active-low or open-drain.
GPA0	17	21	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPA1	18	22	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPA2	19	23	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPA3	20	24	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPA4	21	25	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPA5	22	26	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPA6	23	27	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
GPA7	24	28	I/O	Bidirectional I/O pin. Can be enabled for interrupt-on-change and/or internal weak pull-up resistor.
EP	29	—	—	Exposed Thermal Pad. Either connect to V _{SS} , or leave unconnected.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use

MCP23017/MCP23S17

3.0 DEVICE OVERVIEW

The MCP23017/MCP23S17 (MCP23X17) device family provides 16-bit, general purpose parallel I/O expansion for I²C bus or SPI applications. The two devices differ only in the serial interface:

- MCP23017 – I²C interface
- MCP23S17 – SPI interface

The MCP23X17 consists of multiple 8-bit configuration registers for input, output and polarity selection. The system master can enable the I/Os as either inputs or outputs by writing the I/O configuration bits (IODIRA/B). The data for each input or output is kept in the corresponding input or output register. The polarity of the Input Port register can be inverted with the Polarity Inversion register. All registers can be read by the system master.

The 16-bit I/O port functionally consists of two 8-bit ports (PORTA and PORTB). The MCP23X17 can be configured to operate in the 8-bit or 16-bit modes via IOCON.BANK.

There are two interrupt pins, INTA and INTB, that can be associated with their respective ports, or can be logically OR'ed together so that both pins will activate if either port causes an interrupt.

The interrupt output can be configured to activate under two conditions (mutually exclusive):

1. When any input state differs from its corresponding Input Port register state. This is used to indicate to the system master that an input state has changed.
2. When an input state differs from a preconfigured register value (DEFVAL register).

The Interrupt Capture register captures port values at the time of the interrupt, thereby saving the condition that caused the interrupt.

The Power-on Reset (POR) sets the registers to their default values and initializes the device state machine.

The hardware address pins are used to determine the device address.

3.1 Power-on Reset (POR)

The on-chip POR circuit holds the device in reset until V_{DD} has reached a high enough voltage to deactivate the POR circuit (i.e., release the device from reset). The maximum V_{DD} rise time is specified in [Section 1.0 "Electrical Characteristics"](#).

When the device exits the POR condition (releases reset), device operating parameters (i.e., voltage, temperature, serial bus frequency, etc.) must be met to ensure proper operation.

3.2 Serial Interface

This block handles the functionality of the I²C (**MCP23017**) or SPI (**MCP23S17**) interface protocol. The MCP23X17 contains 22 individual registers (11 register pairs) that can be addressed through the Serial Interface block, as shown in [Table 3-1](#).

TABLE 3-1: REGISTER ADDRESSES

Address IOCON.BANK = 1	Address IOCON.BANK = 0	Access to:
00h	00h	IODIRA
10h	01h	IODIRB
01h	02h	IPOLA
11h	03h	IPOLB
02h	04h	GPINTENA
12h	05h	GPINTENB
03h	06h	DEFVALA
13h	07h	DEFVALB
04h	08h	INTCONA
14h	09h	INTCONB
05h	0Ah	IOCON
15h	0Bh	IOCON
06h	0Ch	GPPUA
16h	0Dh	GPPUB
07h	0Eh	INTFA
17h	0Fh	INTFB
08h	10h	INTCAPA
18h	11h	INTCAPB
09h	12h	GPIOA
19h	13h	GPIOB
0Ah	14h	OLATA
1Ah	15h	OLATB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use

3.2.1 BYTE MODE AND SEQUENTIAL MODE

The MCP23X17 family has the ability to operate in Byte mode or Sequential mode (IOCON.SEQOP).

Byte mode disables automatic Address Pointer incrementing. When operating in Byte mode, the MCP23X17 family does not increment its internal address counter after each byte during the data transfer. This gives the ability to continually access the same address by providing extra clocks (without additional control bytes). This is useful for polling the GPIO register for data changes or for continually writing to the output latches.

A special mode (**Byte mode with IOCON.BANK = 0**) causes the address pointer to toggle between associated A/B register pairs. For example, if the BANK bit is cleared and the Address Pointer is initially set to address 12h (GPIOA) or 13h (GPIOB), the pointer will toggle between GPIOA and GPIOB. Note that the Address Pointer can initially point to either address in the register pair.

Sequential mode enables automatic address pointer incrementing. When operating in Sequential mode, the MCP23X17 family increments its address counter after each byte during the data transfer. The Address Pointer automatically rolls over to address 00h after accessing the last register.

These two modes are not to be confused with single writes/reads and continuous writes/reads that are serial protocol sequences. For example, the device may be configured for Byte mode and the master may perform a continuous read. In this case, the MCP23X17 would not increment the Address Pointer and would repeatedly drive data from the same location.

3.2.2 I²C INTERFACE

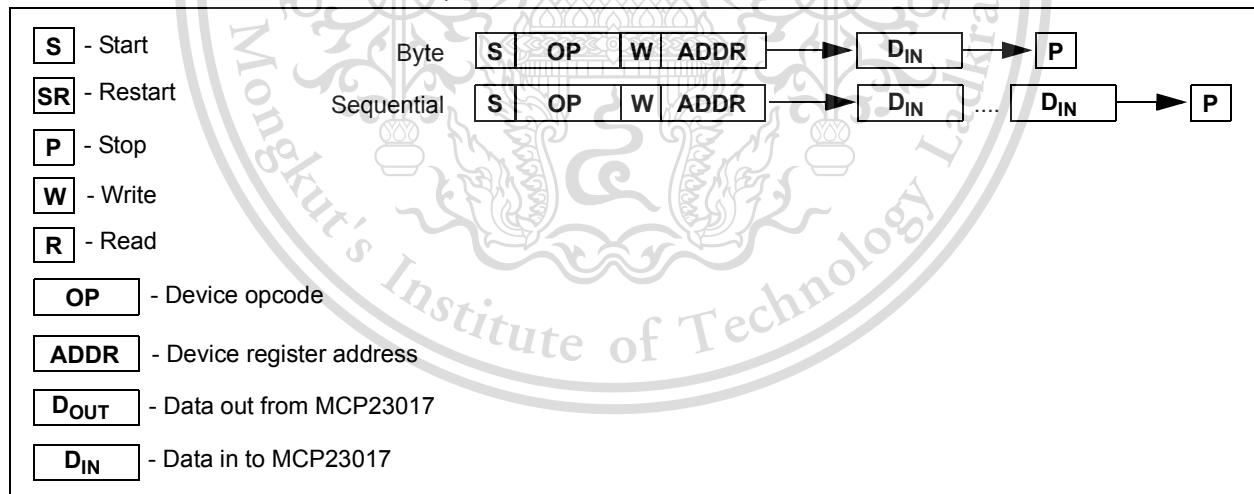
3.2.2.1 I²C Write Operation

The I²C write operation includes the control byte and register address sequence, as shown in [Figure 3-1](#). This sequence is followed by eight bits of data from the master and an Acknowledge (ACK) from the MCP23017. The operation is ended with a Stop (P) or Restart (SR) condition being generated by the master.

Data is written to the MCP23017 after every byte transfer. If a Stop or Restart condition is generated during a data transfer, the data will not be written to the MCP23017.

Both “byte writes” and “sequential writes” are supported by the MCP23017. If Sequential mode is enabled (IOCON, SEQOP = 0) (default), the MCP23017 increments its address counter after each ACK during the data transfer.

FIGURE 3-1: BYTE AND SEQUENTIAL WRITE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

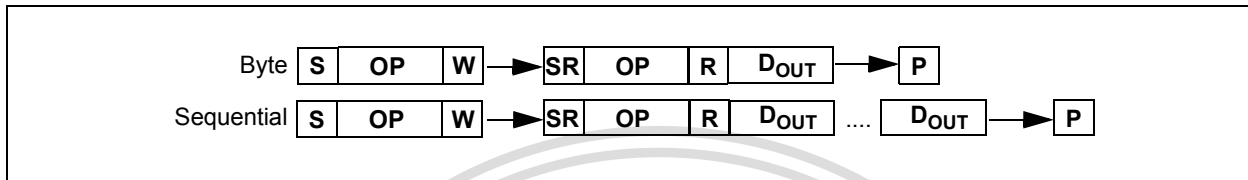
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use

MCP23017/MCP23S17

3.2.2.2 I²C Read Operation

I²C Read operations include the control byte sequence, as shown in [Figure 3-2](#). This sequence is followed by another control byte (including the Start condition and ACK) with the R/W bit set (R/W = 1). The MCP23017 then transmits the data contained in the addressed register. The sequence is ended with the master generating a Stop or Restart condition.

FIGURE 3-2: BYTE AND SEQUENTIAL READ



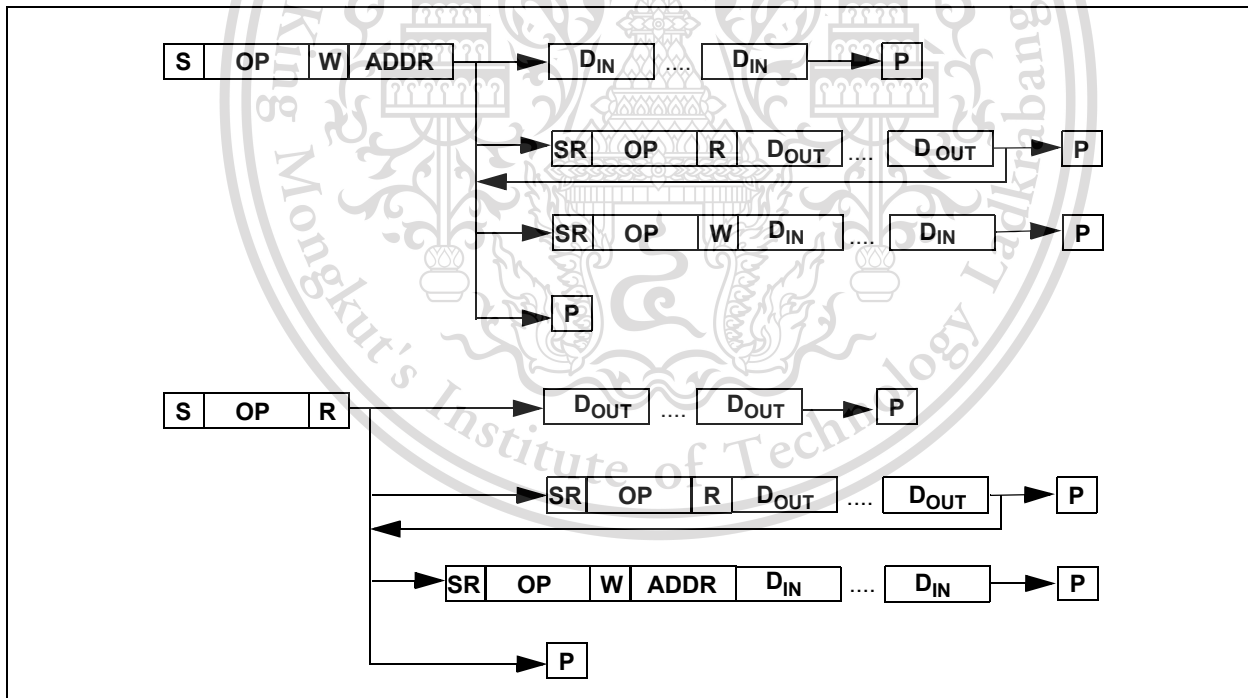
3.2.2.3 I²C Sequential Write/Read

For sequential operations (Write or Read), instead of transmitting a Stop or Restart condition after the data transfer, the master clocks the next byte pointed to by the address pointer (see [Section 3.2.1 "Byte Mode and Sequential Mode"](#) for details regarding sequential operation control).

The sequence ends with the master sending a Stop or Restart condition.

The MCP23017 Address Pointer will roll over to address zero after reaching the last register address. Refer to [Figure 3-3](#).

FIGURE 3-3: MCP23017 I²C DEVICE PROTOCOL



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use

3.2.3 SPI INTERFACE

3.2.3.1 SPI Write Operation

The SPI write operation is started by lowering $\overline{CS}$. The Write command (slave address with R/W bit cleared) is then clocked into the device. The opcode is followed by an address and at least one data byte.

3.2.3.2 SPI Read Operation

The SPI read operation is started by lowering $\overline{CS}$. The SPI read command (slave address with R/W bit set) is then clocked into the device. The opcode is followed by an address, with at least one data byte being clocked out of the device.

3.2.3.3 SPI Sequential Write/Read

For sequential operations, instead of deselecting the device by raising $\overline{CS}$, the master clocks the next byte pointed to by the Address Pointer. (see [Section 3.2.1 “Byte Mode and Sequential Mode”](#) for details regarding sequential operation control).

The sequence ends by the raising of $\overline{CS}$.

The MCP23S17 Address Pointer will roll over to address zero after reaching the last register address.

3.3 Hardware Address Decoder

The hardware address pins are used to determine the device address. To address a device, the corresponding address bits in the control byte must match the pin state. The pins must be biased externally.

3.3.1 ADDRESSING I²C DEVICES (MCP23017)

The MCP23017 is a slave I²C interface device that supports 7-bit slave addressing, with the read/write bit filling out the control byte. The slave address contains

four fixed bits and three user-defined hardware address bits (pins A2, A1 and A0). [Figure 3-4](#) shows the control byte format.

3.3.2 ADDRESSING SPI DEVICES (MCP23S17)

The MCP23S17 is a slave SPI device. The slave address contains four fixed bits and three user-defined hardware address bits (if enabled via IOCON.HAEN) (pins A2, A1 and A0) with the read/write bit filling out the control byte. [Figure 3-5](#) shows the control byte format. The address pins should be externally biased even if disabled (IOCON.HAEN = 0).

FIGURE 3-4: I²C CONTROL BYTE FORMAT

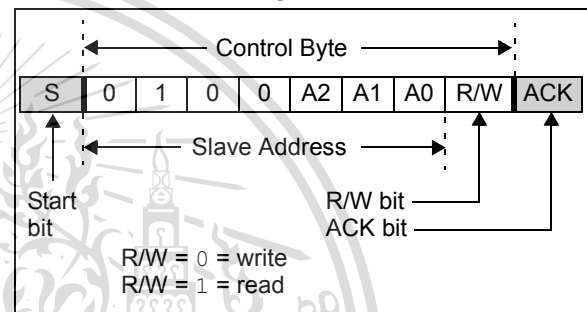


FIGURE 3-5: SPI CONTROL BYTE FORMAT

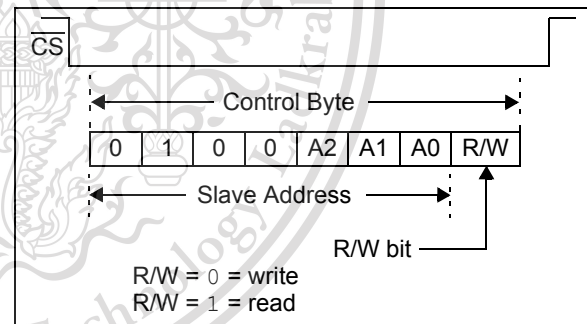
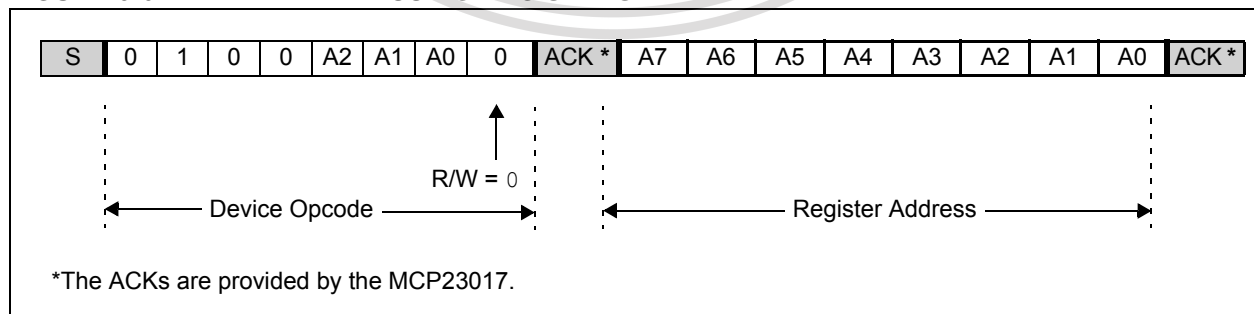


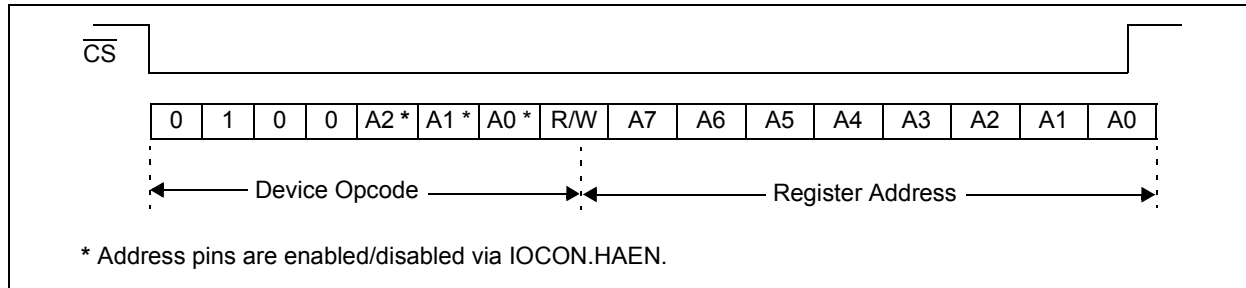
FIGURE 3-6: I²C ADDRESSING REGISTERS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MCP23017/MCP23S17

FIGURE 3-7: SPI ADDRESSING REGISTERS



3.4 GPIO Port

The GPIO module is a general purpose, 16-bit wide, bidirectional port that is functionally split into two 8-bit wide ports.

The GPIO module contains the data ports (GPIO_n), internal pull-up resistors and the output latches (OLAT_n).

Reading the GPIO_n register reads the value on the port. Reading the OLAT_n register only reads the latches, not the actual value on the port.

Writing to the GPIO_n register actually causes a write to the latches (OLAT_n). Writing to the OLAT_n register forces the associated output drivers to drive to the level in OLAT_n. Pins configured as inputs turn off the associated output driver and put it in high-impedance.

TABLE 3-2: SUMMARY OF REGISTERS ASSOCIATED WITH THE GPIO PORTS (BANK = 1)

Register Name	Address (hex)	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0	POR/RST value
IODIRA	00	IO7	IO6	IO5	IO4	IO3	IO2	IO1	IO0	1111 1111
IPOLA	01	IP7	IP6	IP5	IP4	IP3	IP2	IP1	IP0	0000 0000
GPINTENA	02	GPINT7	GPINT6	GPINT5	GPINT4	GPINT3	GPINT2	GPINT1	GPINT0	0000 0000
GPPUA	06	PU7	PU6	PU5	PU4	PU3	PU2	PU1	PU0	0000 0000
GPIOA	09	GP7	GP6	GP5	GP4	GP3	GP2	GP1	GP0	0000 0000
OLATA	0A	OL7	OL6	OL5	OL4	OL3	OL2	OL1	OL0	0000 0000
IODIRB	10	IO7	IO6	IO5	IO4	IO3	IO2	IO1	IO0	1111 1111
IPOLB	11	IP7	IP6	IP5	IP4	IP3	IP2	IP1	IP0	0000 0000
GPINTENB	12	GPINT7	GPINT6	GPINT5	GPINT4	GPINT3	GPINT2	GPINT1	GPINT0	0000 0000
GPPUB	16	PU7	PU6	PU5	PU4	PU3	PU2	PU1	PU0	0000 0000
GPIOB	19	GP7	GP6	GP5	GP4	GP3	GP2	GP1	GP0	0000 0000
OLATB	1A	OL7	OL6	OL5	OL4	OL3	OL2	OL1	OL0	0000 0000

TABLE 3-3: SUMMARY OF REGISTERS ASSOCIATED WITH THE GPIO PORTS (BANK = 0)

Register Name	Address (hex)	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0	POR/RST value
IODIRA	00	IO7	IO6	IO5	IO4	IO3	IO2	IO1	IO0	1111 1111
IODIRB	01	IO7	IO6	IO5	IO4	IO3	IO2	IO1	IO0	1111 1111
IPOLA	02	IP7	IP6	IP5	IP4	IP3	IP2	IP1	IP0	0000 0000
IPOLB	03	IP7	IP6	IP5	IP4	IP3	IP2	IP1	IP0	0000 0000
GPINTENA	04	GPINT7	GPINT6	GPINT5	GPINT4	GPINT3	GPINT2	GPINT1	GPINT0	0000 0000
GPINTENB	05	GPINT7	GPINT6	GPINT5	GPINT4	GPINT3	GPINT2	GPINT1	GPINT0	0000 0000
GPPUA	0C	PU7	PU6	PU5	PU4	PU3	PU2	PU1	PU0	0000 0000
GPPUB	0D	PU7	PU6	PU5	PU4	PU3	PU2	PU1	PU0	0000 0000
GPIOA	12	GP7	GP6	GP5	GP4	GP3	GP2	GP1	GP0	0000 0000
GPIOB	13	GP7	GP6	GP5	GP4	GP3	GP2	GP1	GP0	0000 0000
OLATA	14	OL7	OL6	OL5	OL4	OL3	OL2	OL1	OL0	0000 0000
OLATB	15	OL7	OL6	OL5	OL4	OL3	OL2	OL1	OL0	0000 0000

3.5 Configuration and Control Registers

There are 21 registers associated with the MCP23X17, as shown in Tables 3-4 and 3-5. The two tables show the register mapping with the two BANK bit values. Ten registers are associated with PORTA and ten are

associated with PORTB. One register (IOCON) is shared between the two ports. The PORTA registers are identical to the PORTB registers, therefore, they will be referred to without differentiating between the port designation (i.e., they will not have the “A” or “B” designator assigned) in the register tables.

TABLE 3-4: CONTROL REGISTER SUMMARY (IOCON.BANK = 1)

Register Name	Address (hex)	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0	POR/RST value
IODIRA	00	IO7	IO6	IO5	IO4	IO3	IO2	IO1	IO0	1111 1111
IPOLA	01	IP7	IP6	IP5	IP4	IP3	IP2	IP1	IP0	0000 0000
GPINTENA	02	GPINT7	GPINT6	GPINT5	GPINT4	GPINT3	GPINT2	GPINT1	GPINT0	0000 0000
DEFVALA	03	DEF7	DEF6	DEF5	DEF4	DEF3	DEF2	DEF1	DEF0	0000 0000
INTCONA	04	IOC7	IOC6	IOC5	IOC4	IOC3	IOC2	IOC1	IOC0	0000 0000
IOCON	05	BANK	MIRROR	SEQOP	DISSLW	HAEN	ODR	INTPOL	—	0000 0000
GPPUA	06	PU7	PU6	PU5	PU4	PU3	PU2	PU1	PU0	0000 0000
INTFA	07	INT7	INT6	INT5	INT4	INT3	INT2	INT1	INT0	0000 0000
INTCAPA	08	ICP7	ICP6	ICP5	ICP4	ICP3	ICP2	ICP1	ICP0	0000 0000
GPIOA	09	GP7	GP6	GP5	GP4	GP3	GP2	GP1	GP0	0000 0000
OLATA	0A	OL7	OL6	OL5	OL4	OL3	OL2	OL1	OL0	0000 0000
IODIRB	10	IO7	IO6	IO5	IO4	IO3	IO2	IO1	IO0	1111 1111
IPOLB	11	IP7	IP6	IP5	IP4	IP3	IP2	IP1	IP0	0000 0000
GPINTENB	12	GPINT7	GPINT6	GPINT5	GPINT4	GPINT3	GPINT2	GPINT1	GPINT0	0000 0000
DEFVALB	13	DEF7	DEF6	DEF5	DEF4	DEF3	DEF2	DEF1	DEF0	0000 0000
INTCONB	14	IOC7	IOC6	IOC5	IOC4	IOC3	IOC2	IOC1	IOC0	0000 0000
IOCON	15	BANK	MIRROR	SEQOP	DISSLW	HAEN	ODR	INTPOL	—	0000 0000
GPPUB	16	PU7	PU6	PU5	PU4	PU3	PU2	PU1	PU0	0000 0000
INTFB	17	INT7	INT6	INT5	INT4	INT3	INT2	INT1	INT0	0000 0000
INTCAPB	18	ICP7	ICP6	ICP5	ICP4	ICP3	ICP2	ICP1	ICP0	0000 0000
GPIOB	19	GP7	GP6	GP5	GP4	GP3	GP2	GP1	GP0	0000 0000
OLATB	1A	OL7	OL6	OL5	OL4	OL3	OL2	OL1	OL0	0000 0000

TABLE 3-5: CONTROL REGISTER SUMMARY (IOCON.BANK = 0)

Register Name	Address (hex)	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0	POR/RST value
IODIRA	00	IO7	IO6	IO5	IO4	IO3	IO2	IO1	IO0	1111 1111
IODIRB	01	IO7	IO6	IO5	IO4	IO3	IO2	IO1	IO0	1111 1111
IPOLA	02	IP7	IP6	IP5	IP4	IP3	IP2	IP1	IP0	0000 0000
IPOLB	03	IP7	IP6	IP5	IP4	IP3	IP2	IP1	IP0	0000 0000
GPINTENA	04	GPINT7	GPINT6	GPINT5	GPINT4	GPINT3	GPINT2	GPINT1	GPINT0	0000 0000
GPINTENB	05	GPINT7	GPINT6	GPINT5	GPINT4	GPINT3	GPINT2	GPINT1	GPINT0	0000 0000
DEFVALA	06	DEF7	DEF6	DEF5	DEF4	DEF3	DEF2	DEF1	DEF0	0000 0000
DEFVALB	07	DEF7	DEF6	DEF5	DEF4	DEF3	DEF2	DEF1	DEF0	0000 0000
INTCONA	08	IOC7	IOC6	IOC5	IOC4	IOC3	IOC2	IOC1	IOC0	0000 0000
INTCONB	09	IOC7	IOC6	IOC5	IOC4	IOC3	IOC2	IOC1	IOC0	0000 0000
IOCON	0A	BANK	MIRROR	SEQOP	DISSLW	HAEN	ODR	INTPOL	—	0000 0000
IOCON	0B	BANK	MIRROR	SEQOP	DISSLW	HAEN	ODR	INTPOL	—	0000 0000
GPPUA	0C	PU7	PU6	PU5	PU4	PU3	PU2	PU1	PU0	0000 0000
GPPUB	0D	PU7	PU6	PU5	PU4	PU3	PU2	PU1	PU0	0000 0000

MCP23017/MCP23S17

TABLE 3-5: CONTROL REGISTER SUMMARY (IOCON.BANK = 0) (CONTINUED)

Register Name	Address (hex)	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0	POR/RST value
INTFA	0E	INT7	INT6	INT5	INT4	INT3	INT2	INT1	INT0	0000 0000
INTFB	0F	INT7	INT6	INT5	INT4	INT3	INT2	INT1	INT0	0000 0000
INTCAPA	10	ICP7	ICP6	ICP5	ICP4	ICP3	ICP2	ICP1	ICP0	0000 0000
INTCAPB	11	ICP7	ICP6	ICP5	ICP4	ICP3	ICP2	ICP1	ICP0	0000 0000
GPIOA	12	GP7	GP6	GP5	GP4	GP3	GP2	GP1	GP0	0000 0000
GPIOB	13	GP7	GP6	GP5	GP4	GP3	GP2	GP1	GP0	0000 0000
OLATA	14	OL7	OL6	OL5	OL4	OL3	OL2	OL1	OL0	0000 0000
OLATB	15	OL7	OL6	OL5	OL4	OL3	OL2	OL1	OL0	0000 0000

3.5.1 I/O DIRECTION REGISTER

Controls the direction of the data I/O.

When a bit is set, the corresponding pin becomes an input. When a bit is clear, the corresponding pin becomes an output.

REGISTER 3-1: IODIR: I/O DIRECTION REGISTER (ADDR 0x00)

R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1
IO7	IO6	IO5	IO4	IO3	IO2	IO1	IO0
bit 7							bit 0

Legend:

R = Readable bit
-n = Value at POR

W = Writable bit
'1' = Bit is set

U = Unimplemented bit, read as '0'
'0' = Bit is cleared

x = Bit is unknown

bit 7-0 **IO<7:0>**: Controls the direction of data I/O <7:0>
1 = Pin is configured as an input.
0 = Pin is configured as an output.

3.5.2 INPUT POLARITY REGISTER

This register allows the user to configure the polarity on the corresponding GPIO port bits.

If a bit is set, the corresponding GPIO register bit will reflect the inverted value on the pin.

REGISTER 3-2: IPOL: INPUT POLARITY PORT REGISTER (ADDR 0x01)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
IP7	IP6	IP5	IP4	IP3	IP2	IP1	IP0
bit 7							bit 0

Legend:

R = Readable bit
-n = Value at POR

W = Writable bit
'1' = Bit is set

U = Unimplemented bit, read as '0'
'0' = Bit is cleared

x = Bit is unknown

bit 7-0 **IP<7:0>**: Controls the polarity inversion of the input pins <7:0>
1 = GPIO register bit reflects the opposite logic state of the input pin.
0 = GPIO register bit reflects the same logic state of the input pin.

3.5.3 INTERRUPT-ON-CHANGE CONTROL REGISTER

The GPINTEN register controls the interrupt-on-change feature for each pin.

If a bit is set, the corresponding pin is enabled for interrupt-on-change. The DEFVAL and INTCON registers must also be configured if any pins are enabled for interrupt-on-change.

REGISTER 3-3: GPINTEN: INTERRUPT-ON-CHANGE PINS (ADDR 0x02) (Note 1)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
GPINT7	GPINT6	GPINT5	GPINT4	GPINT3	GPINT2	GPINT1	GPINT0
bit 7							bit 0

Legend:

R = Readable bit
-n = Value at POR

W = Writable bit
'1' = Bit is set

U = Unimplemented bit, read as '0'
'0' = Bit is cleared
x = Bit is unknown

bit 7-0 **GPINT<7:0>**: General purpose I/O interrupt-on-change bits <7:0>
1 = Enables GPIO input pin for interrupt-on-change event.
0 = Disables GPIO input pin for interrupt-on-change event.

Note 1: Refer to INTCON.

3.5.4 DEFAULT COMPARE REGISTER FOR INTERRUPT-ON-CHANGE

The default comparison value is configured in the DEFVAL register. If enabled (via GPINTEN and INTCON) to compare against the DEFVAL register, an opposite value on the associated pin will cause an interrupt to occur.

REGISTER 3-4: DEFVAL: DEFAULT VALUE REGISTER (ADDR 0x03)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
DEF7	DEF6	DEF5	DEF4	DEF3	DEF2	DEF1	DEF0
bit 7							bit 0

Legend:

R = Readable bit
-n = Value at POR

W = Writable bit
'1' = Bit is set

U = Unimplemented bit, read as '0'
'0' = Bit is cleared
x = Bit is unknown

bit 7-0 **DEF<7:0>**: Sets the compare value for pins configured for interrupt-on-change from defaults <7:0> (Note 1)
If the associated pin level is the opposite from the register bit, an interrupt occurs. (Note 2)

Note 1: Refer to INTCON.

2: Refer to INTCON and GPINTEN.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

MCP23017/MCP23S17

3.5.5 INTERRUPT CONTROL REGISTER

The INTCON register controls how the associated pin value is compared for the interrupt-on-change feature. If a bit is set, the corresponding I/O pin is compared against the associated bit in the DEFVAL register. If a bit value is clear, the corresponding I/O pin is compared against the previous value.

REGISTER 3-5: INTCON: INTERRUPT-ON-CHANGE CONTROL REGISTER (ADDR 0x04) (Note 1)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
IOC7	IOC6	IOC5	IOC4	IOC3	IOC2	IOC1	IOC0
bit 7							bit 0

Legend:

R = Readable bit

W = Writable bit

U = Unimplemented bit, read as '0'

-n = Value at POR

'1' = Bit is set

'0' = Bit is cleared

x = Bit is unknown

bit 7-0 **IOC<7:0>**: Controls how the associated pin value is compared for interrupt-on-change <7:0>

1 = Pin value is compared against the associated bit in the DEFVAL register.

0 = Pin value is compared against the previous pin value.

Note 1: Refer to INTCON and GPINTEN.

3.5.6 CONFIGURATION REGISTER

The IOCON register contains several bits for configuring the device:

The BANK bit changes how the registers are mapped (see [Tables 3-4](#) and [3-5](#) for more details).

- If BANK = 1, the registers associated with each port are segregated. Registers associated with PORTA are mapped from address 00h - 0Ah and registers associated with PORTB are mapped from 10h - 1Ah.
- If BANK = 0, the A/B registers are paired. For example, IODIRA is mapped to address 00h and IODIRB is mapped to the next address (address 01h). The mapping for all registers is from 00h - 15h.

It is important to take care when changing the BANK bit as the address mapping changes after the byte is clocked into the device. The address pointer may point to an invalid location after the bit is modified.

For example, if the device is configured to automatically increment its internal Address Pointer, the following scenario would occur:

- BANK = 0
- Write 80h to address 0Ah (IOCON) to set the BANK bit
- Once the write completes, the internal address now points to 0Bh which is an invalid address when the BANK bit is set.

For this reason, when changing the BANK bit, it is advised to only perform byte writes to this register.

The **MIRROR** bit controls how the INTA and INTB pins function with respect to each other.

- When MIRROR = 1, the INTn pins are functionally OR'ed so that an interrupt on either port will cause both pins to activate.
- When MIRROR = 0, the INT pins are separated. Interrupt conditions on a port will cause its respective INT pin to activate.

The Sequential Operation (**SEQOP**) controls the incrementing function of the Address Pointer. If the address pointer is disabled, the Address Pointer does not automatically increment after each byte is clocked during a serial transfer. This feature is useful when it is desired to continuously poll (read) or modify (write) a register.

The Slew Rate (**DISSLW**) bit controls the slew rate function on the SDA pin. If enabled, the SDA slew rate will be controlled when driving from a high to low.

The Hardware Address Enable (**HAEN**) bit enables/disables hardware addressing on the MCP23S17 only. The address pins (A2, A1 and A0) must be externally biased, regardless of the HAEN bit value.

If enabled (HAEN = 1), the device's hardware address matches the address pins.

If disabled (HAEN = 0), the device's hardware address is A2 = A1 = A0 = 0.

MCP23017/MCP23S17

The Open-Drain (**ODR**) control bit enables/disables the INT pin for open-drain configuration. Setting this bit overrides the INTPOL bit.

The Interrupt Polarity (**INTPOL**) sets the polarity of the INT pin. This bit is functional only when the ODR bit is cleared, configuring the INT pin as active push-pull.

REGISTER 3-6: IOCON: I/O EXPANDER CONFIGURATION REGISTER (ADDR 0x05)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	U-0
BANK	MIRROR	SEQOP	DISSLW	HAEN	ODR	INTPOL	—
bit 7							bit 0

Legend:

R = Readable bit

W = Writable bit

U = Unimplemented bit, read as '0'

-n = Value at POR

'1' = Bit is set

'0' = Bit is cleared

x = Bit is unknown

- bit 7 **BANK:** Controls how the registers are addressed
1 = The registers associated with each port are separated into different banks.
0 = The registers are in the same bank (addresses are sequential).
- bit 6 **MIRROR:** INT Pins Mirror bit
1 = The INT pins are internally connected
0 = The INT pins are not connected. INTA is associated with PORTA and INTB is associated with PORTB
- bit 5 **SEQOP:** Sequential Operation mode bit
1 = Sequential operation disabled, address pointer does not increment.
0 = Sequential operation enabled, address pointer increments.
- bit 4 **DISSLW:** Slew Rate control bit for SDA output
1 = Slew rate disabled
0 = Slew rate enabled
- bit 3 **HAEN:** Hardware Address Enable bit (**MCP23S17** only) (**Note 1**)
1 = Enables the MCP23S17 address pins.
0 = Disables the MCP23S17 address pins.
- bit 2 **ODR:** Configures the INT pin as an open-drain output
1 = Open-drain output (overrides the INTPOL bit.)
0 = Active driver output (INTPOL bit sets the polarity.)
- bit 1 **INTPOL:** This bit sets the polarity of the INT output pin
1 = Active-high
0 = Active-low
- bit 0 **Unimplemented:** Read as '0'

Note 1: Address pins are always enabled on the MCP23017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use

MCP23017/MCP23S17

3.5.7 PULL-UP RESISTOR CONFIGURATION REGISTER

The GPPU register controls the pull-up resistors for the port pins. If a bit is set and the corresponding pin is configured as an input, the corresponding port pin is internally pulled up with a 100 kΩ resistor.

REGISTER 3-7: GPPU: GPIO PULL-UP RESISTOR REGISTER (ADDR 0x06)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
PU7	PU6	PU5	PU4	PU3	PU2	PU1	PU0
bit 7							bit 0

Legend:

R = Readable bit W = Writable bit U = Unimplemented bit, read as '0'
-n = Value at POR '1' = Bit is set '0' = Bit is cleared x = Bit is unknown

bit 7-0 **PU<7:0>** Controls the weak pull-up resistors on each pin (when configured as an input)
1 = Pull-up enabled
0 = Pull-up disabled

3.5.8 INTERRUPT FLAG REGISTER

The INTF register reflects the interrupt condition on the port pins of any pin that is enabled for interrupts via the GPINTEN register. A set bit indicates that the associated pin caused the interrupt.

This register is read-only. Writes to this register will be ignored.

REGISTER 3-8: INTF: INTERRUPT FLAG REGISTER (ADDR 0x07)

R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0
INT7	INT6	INT5	INT4	INT3	INT2	INT1	INT0
bit 7							bit 0

Legend:

R = Readable bit W = Writable bit U = Unimplemented bit, read as '0'
-n = Value at POR '1' = Bit is set '0' = Bit is cleared x = Bit is unknown

bit 7-0 **INT<7:0>**: Reflects the interrupt condition on the port. It reflects the change only if interrupts are enabled per GPINTEN<7:0>.
1 = Pin caused interrupt.
0 = Interrupt not pending

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use

3.5.9 INTERRUPT CAPTURED REGISTER

The INTCAP register captures the GPIO port value at the time the interrupt occurred. The register is read-only and is updated only when an interrupt occurs. The register remains unchanged until the interrupt is cleared via a read of INTCAP or GPIO.

REGISTER 3-9: INTCAP: INTERRUPT CAPTURED VALUE FOR PORT REGISTER (ADDR 0x08)

R-x	R-x	R-x	R-x	R-x	R-x	R-x	R-x
ICP7	ICP6	ICP5	ICP4	ICP3	ICP2	ICP1	ICP0
bit 7							bit 0

Legend:

R = Readable bit W = Writable bit U = Unimplemented bit, read as '0'
 -n = Value at POR '1' = Bit is set '0' = Bit is cleared x = Bit is unknown

bit 7-0 **ICP<7:0>**: Reflects the logic level on the port pins at the time of interrupt due to pin change <7:0>
 1 = Logic-high
 0 = Logic-low

3.5.10 PORT REGISTER

The GPIO register reflects the value on the port. Reading from this register reads the port. Writing to this register modifies the Output Latch (OLAT) register.

REGISTER 3-10: GPIO: GENERAL PURPOSE I/O PORT REGISTER (ADDR 0x09)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
GP7	GP6	GP5	GP4	GP3	GP2	GP1	GP0
bit 7							bit 0

Legend:

R = Readable bit W = Writable bit U = Unimplemented bit, read as '0'
 -n = Value at POR '1' = Bit is set '0' = Bit is cleared x = Bit is unknown

bit 7-0 **GP<7:0>**: Reflects the logic level on the pins <7:0>
 1 = Logic-high
 0 = Logic-low

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use

MCP23017/MCP23S17

3.5.11 OUTPUT LATCH REGISTER (OLAT)

The OLAT register provides access to the output latches. A read from this register results in a read of the OLAT and not the port itself. A write to this register modifies the output latches that modifies the pins configured as outputs.

REGISTER 3-11: OLAT: OUTPUT LATCH REGISTER 0 (ADDR 0x0A)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
OL7	OL6	OL5	OL4	OL3	OL2	OL1	OL0
bit 7							bit 0

Legend:

R = Readable bit

W = Writable bit

U = Unimplemented bit, read as '0'

-n = Value at POR

'1' = Bit is set

'0' = Bit is cleared

x = Bit is unknown

bit 7-0

OL<7:0>: Reflects the logic level on the output latch <7:0>

1 = Logic-high

0 = Logic-low

3.6 Interrupt Logic

If enabled, the MCP23X17 activates the INTn interrupt output when one of the port pins changes state or when a pin does not match the preconfigured default. Each pin is individually configurable as follows:

- Enable/disable interrupt via GPINTEN
- Can interrupt on either pin change or change from default as configured in DEFVAL

Both conditions are referred to as Interrupt-on-Change (IOC).

The interrupt control module uses the following registers/bits:

- IOCON.MIRROR – controls if the two interrupt pins mirror each other
- GPINTEN – Interrupt enable register
- INTCON – controls the source for the IOC
- DEFVAL – contains the register default for IOC operation

3.6.1 INTA AND INTB

There are two interrupt pins: INTA and INTB. By default, INTA is associated with GPAn pins (PORTA) and INTB is associated with GPBn pins (PORTB). Each port has an independent signal which is cleared if its associated GPIO or INTCAP register is read.

3.6.1.1 Mirroring the INT pins

Additionally, the INTn pins can be configured to mirror each other so that any interrupt will cause both pins to go active. This is controlled via IOCON.MIRROR.

If IOCON.MIRROR = 0, the internal signals are routed independently to the INTA and INTB pads.

If IOCON.MIRROR = 1, the internal signals are OR'ed together and routed to the INTn pads. In this case, the interrupt will only be cleared if the associated GPIO or INTCAP is read (see Table 3-6).

TABLE 3-6: INTERRUPT OPERATION (IOCON.MIRROR = 1)

Interrupt Condition	Read PORTn ⁽¹⁾	Interrupt Result
GPIOA	PORTA	Clear
	PORTB	Unchanged
GPIOB	PORTA	Unchanged
	PORTB	Clear
GPIOA and GPIOB	PORTA	Unchanged
	PORTB	Unchanged
	Both PORTA and PORTB	Clear

Note 1: PORTn = GPIO_n or INTCAP_n

3.6.2 IOC FROM PIN CHANGE

If enabled, the MCP23X17 generates an interrupt if a mismatch condition exists between the current port value and the previous port value. Only IOC-enabled pins will be compared. Refer to Registers 3-3 and 3-5.

3.6.3 IOC FROM REGISTER DEFAULT

If enabled, the MCP23X17 generates an interrupt if a mismatch occurs between the DEFVAL register and the port. Only IOC enabled pins are compared. Refer to Registers 3-3, 3-4 and 3-5.

3.6.4 INTERRUPT OPERATION

The INTn interrupt output can be configured as active-low, active-high or open-drain via the IOCON register.

Only those pins that are configured as an input (IODIR register) with Interrupt-On-Change (IOC) enabled (IOINTEN register) can cause an interrupt. Pins defined as an output have no effect on the interrupt output pin.

Input change activity on a port input pin that is enabled for IOC generates an internal device interrupt and the device captures the value of the port and copies it into INTCAP. The interrupt remains active until the INTCAP or GPIO register is read. Writing to these registers does not affect the interrupt. The interrupt condition is cleared after the LSB of the data is clocked out during a read command of GPIO or INTCAP.

The first interrupt event causes the port contents to be copied into the INTCAP register. Subsequent interrupt conditions on the port will not cause an interrupt to occur as long as the interrupt is not cleared by a read of INTCAP or GPIO.

Note: The value in INTCAP can be lost if GPIO is read before INTCAP while another IOC is pending. After reading GPIO, the interrupt will clear and then set due to the pending IOC, causing the INTCAP register to update.

3.6.5 INTERRUPT CONDITIONS

There are two possible configurations that cause interrupts (configured via INTCON):

1. Pins configured for **interrupt-on-pin change** will cause an interrupt to occur if a pin changes to the opposite state. The default state is reset after an interrupt occurs and after clearing the interrupt condition (i.e., after reading GPIO or INTCAP). For example, an interrupt occurs by an input changing from '1' to '0'. The new initial state for the pin is a logic '0' after the interrupt is cleared.
2. Pins configured for **interrupt-on-change from register value** will cause an interrupt to occur if the corresponding input pin differs from the register bit. The interrupt condition will remain as long as the condition exists, regardless if the INTCAP or GPIO is read.

See [Figures 3-8](#) and [3-9](#) for more information on interrupt operations.

FIGURE 3-8: INTERRUPT-ON-PIN CHANGE

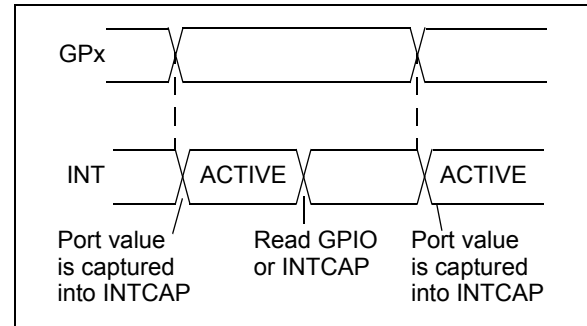
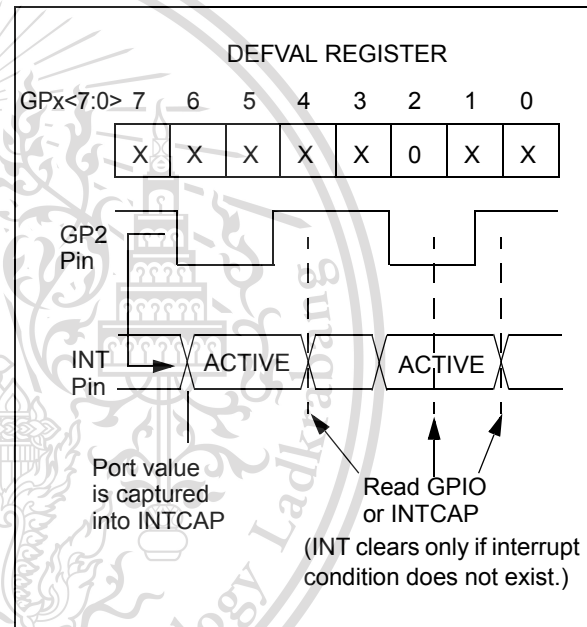
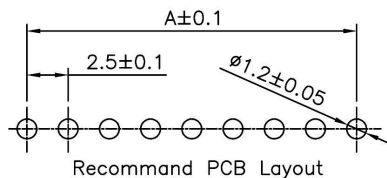
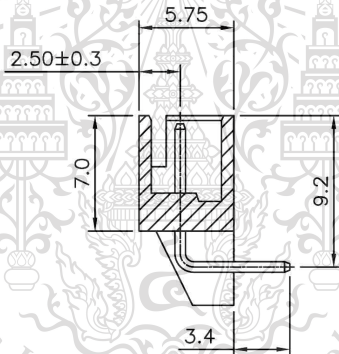
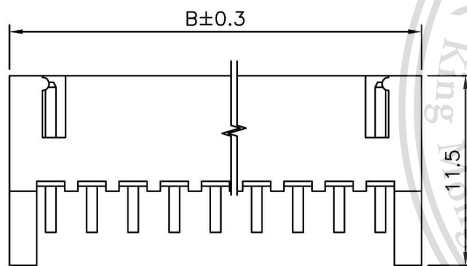
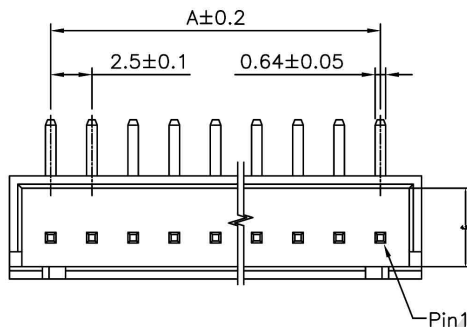


FIGURE 3-9: INTERRUPT-ON-CHANGE FROM REGISTER DEFAULT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use



RoHS COMPLIANT

REV	ECN NO.	DESCRIPTION	DATE
A		RELEASE	OCT. 22'03
B		ADD. RoHS	OCT. 28'08
C		MODIFY P/N	DEC. 09'10

SPECIFICATIONS

- Voltage Rating : 250V AC/DC
- Current Rating : 3A AC/DC
- Withstanding Voltage : 1,000V AC/minute
- Insulation Resistance : 1,000M Ω min
- Temperature Range : - 25°C to + 85°C
- Contact resistance : 20m Ω max

WAFER

- Poles : 2 - 20
- Material : Contact : Brass, Tin Plated
Base : Nylon 66 UL94V-0
- Q' ty : 1,000 pcs./Bag

Poles	Dimensions(mm)		Poles	Dimensions(mm)	
	A	B		A	B
2	2.50	7.50	12	27.50	32.50
3	5.00	10.00	13	30.00	35.00
4	7.50	12.50	14	32.50	37.50
5	10.00	15.00	15	35.00	40.00
6	12.50	17.50	16	37.50	42.50
7	15.00	20.00	17	40.00	45.00
8	17.50	22.50	18	42.50	47.50
9	20.00	25.00	19	45.00	50.00
10	22.50	27.50	20	47.50	52.50
11	25.00	30.00			

TOLERANCE UNLESS OTHERWISE SPECIFIED

LINEAR	ANGLE
.X ± 0.30	.X° ±
.XX ± 0.20	.XX° ±
.XXX ±	.XXX° ±

APPD	
CHKD	
DRAW	Z.

PROJECTION



UNITS

MM

SCALE

SIZE

A4



GOLD-TEK ELECTRIC CO., LTD.

TITLE
2.5mm Wafer
Conn.

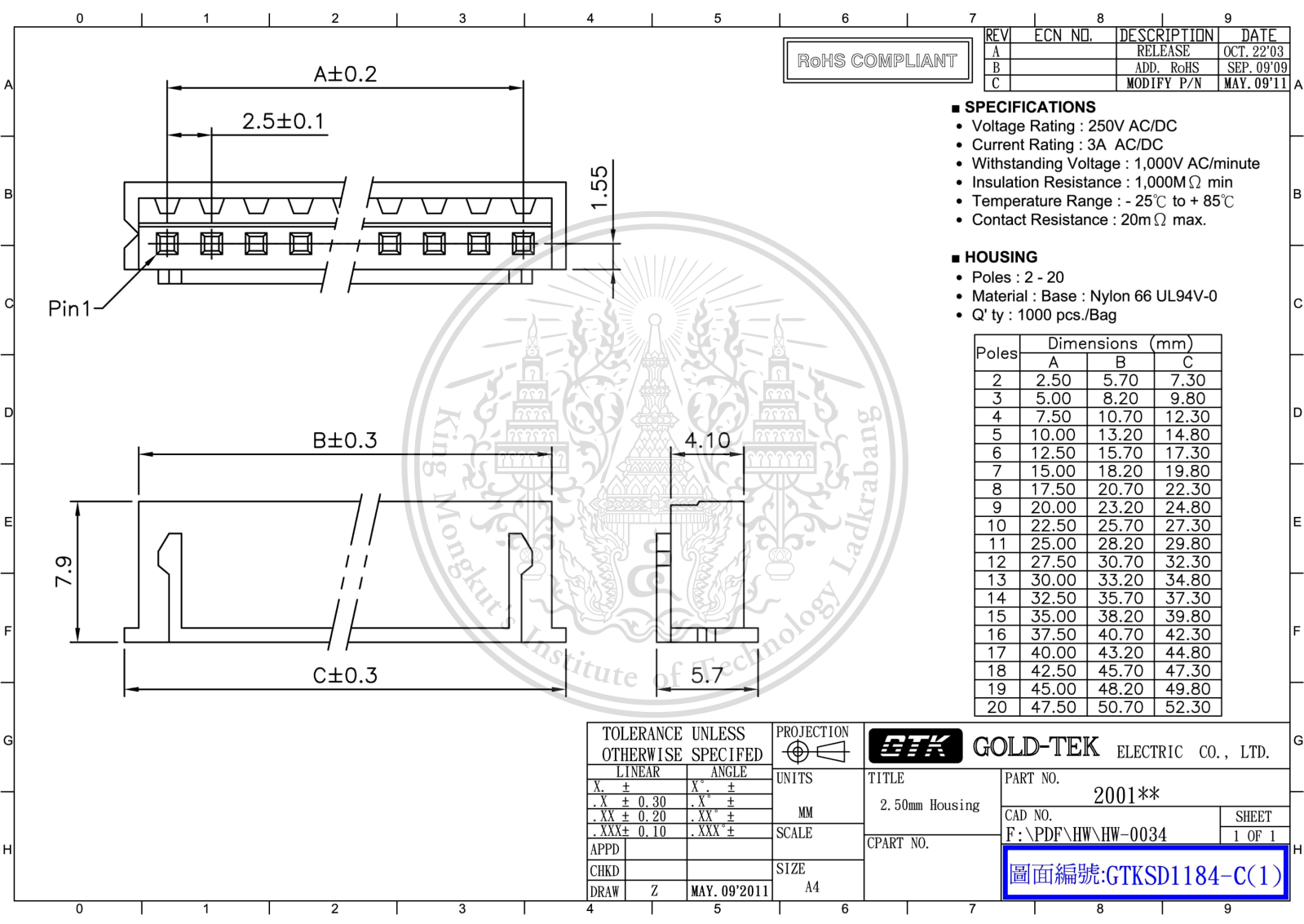
CPART NO.

PART NO.
1001**RT

CAD NO. I056
F:\PDF\HW\HW-A0154

SHEET
1 OF 1

圖面編號:GTKSD1183-C(1)



RoHS COMPLIANT

REV	ECN NO.	DESCRIPTION	DATE
A		RELEASE	OCT. 22'03
B		ADD. RoHS	SEP. 09'09
C		MODIFY P/N	MAY. 09'11

- SPECIFICATIONS
- Voltage Rating : 250V AC/DC
 - Current Rating : 3A AC/DC
 - Withstanding Voltage : 1,000V AC/minute
 - Insulation Resistance : 1,000MΩ min
 - Temperature Range : - 25°C to + 85°C
 - Contact Resistance : 20mΩ max.

- HOUSING
- Poles : 2 - 20
 - Material : Base : Nylon 66 UL94V-0
 - Q' ty : 1000 pcs./Bag

Poles	Dimensions (mm)		
	A	B	C
2	2.50	5.70	7.30
3	5.00	8.20	9.80
4	7.50	10.70	12.30
5	10.00	13.20	14.80
6	12.50	15.70	17.30
7	15.00	18.20	19.80
8	17.50	20.70	22.30
9	20.00	23.20	24.80
10	22.50	25.70	27.30
11	25.00	28.20	29.80
12	27.50	30.70	32.30
13	30.00	33.20	34.80
14	32.50	35.70	37.30
15	35.00	38.20	39.80
16	37.50	40.70	42.30
17	40.00	43.20	44.80
18	42.50	45.70	47.30
19	45.00	48.20	49.80
20	47.50	50.70	52.30

TOLERANCE UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	
LINEAR	ANGLE
.X ± 0.30	.X° ±
.XX ± 0.20	.XX' ±
.XXX ± 0.10	.XXX" ±
APPD	
CHKD	
DRAW	Z
MAY. 09'2011	

PROJECTION
UNITS
MM
SCALE
SIZE
A4

GOLD-TEK ELECTRIC CO., LTD.

TITLE 2.5mm Housing		PART NO. 2001**	
CPART NO.		CAD NO. F:\PDF\HW\HW-0034	SHEET 1 OF 1

圖面編號:GTKSD1184-C(1)



November 2014

1N4001 - 1N4007

General-Purpose Rectifiers

Features

- Low Forward Voltage Drop
- High Surge Current Capability



DO-41

COLOR BAND DENOTES CATHODE

Ordering Information

Part Number	Top Mark	Package	Packing Method
1N4001	1N4001	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4002	1N4002	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4003	1N4003	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4004	1N4004	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4005	1N4005	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4006	1N4006	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4007	1N4007	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel

Absolute Maximum Ratings

Stresses exceeding the absolute maximum ratings may damage the device. The device may not function or be operable above the recommended operating conditions and stressing the parts to these levels is not recommended. In addition, extended exposure to stresses above the recommended operating conditions may affect device reliability. The absolute maximum ratings are stress ratings only. Values are at $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Value							Unit
		1N 4001	1N 4002	1N 4003	1N 4004	1N 4005	1N 4006	1N 4007	
V_{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current .375 " Lead Length at $T_A = 75^\circ\text{C}$	1.0							A
I_{FSM}	Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3 ms Single Half-Sine-Wave	30							A
I^2t	Rating for Fusing ($t < 8.3$ ms)	3.7							A^2sec
T_{STG}	Storage Temperature Range	-55 to +175							$^\circ\text{C}$
T_J	Operating Junction Temperature	-55 to +175							$^\circ\text{C}$

Thermal Characteristics

Values are at $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Value	Unit
P_D	Power Dissipation	3.0	W
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	50	$^\circ\text{C/W}$

Electrical Characteristics

Values are at $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Conditions	Value	Unit
V_F	Forward Voltage	$I_F = 1.0\text{ A}$	1.1	V
I_{rr}	Maximum Full Load Reverse Current, Full Cycle	$T_A = 75^\circ\text{C}$	30	μA
I_R	Reverse Current at Rated V_R	$T_A = 25^\circ\text{C}$	5.0	μA
		$T_A = 100^\circ\text{C}$	50	
C_T	Total Capacitance	$V_R = 4.0\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}$	15	pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Characteristics

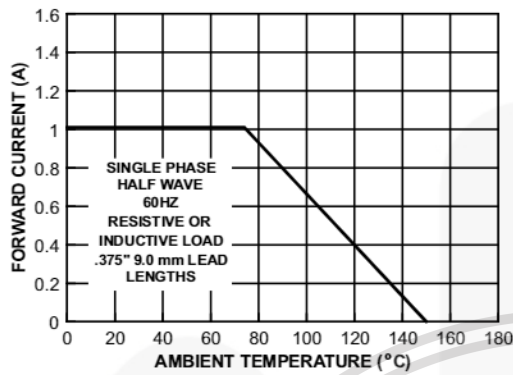


Figure 1. Forward Current Derating Curve

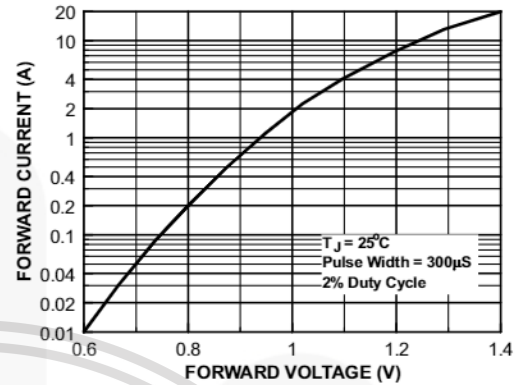


Figure 2. Forward Characteristics

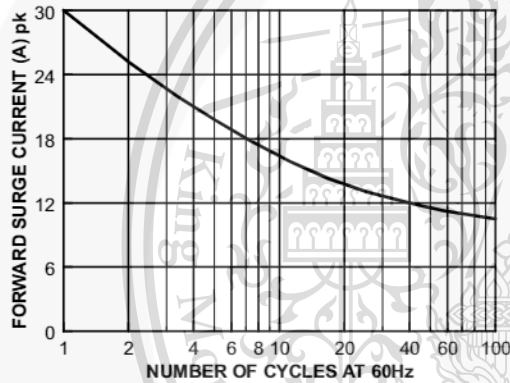


Figure 3. Non-Repetitive Surge Current

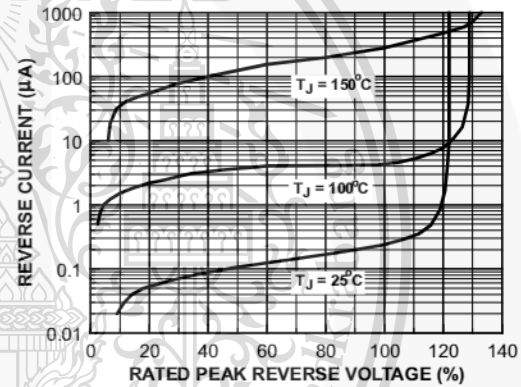
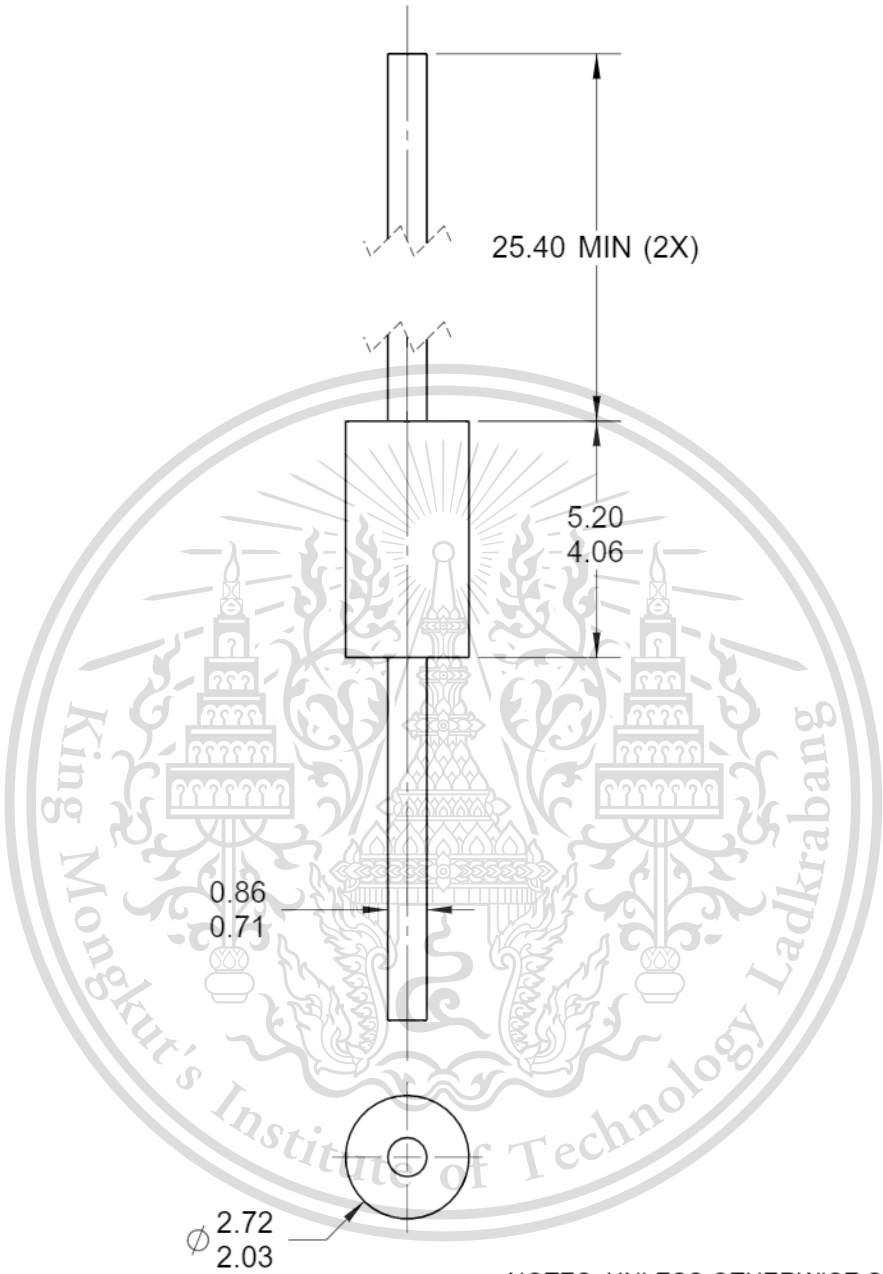


Figure 4. Reverse Characteristics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REVISIONS

NBR	DESCRIPTION	DATE	BY/APP'D
1	RELEASED TO DCC	29JUL08	HYANG/ SUZHOU
2	CHANGE 5.20 TO 5.21. CHANGE NOTE "B" ADDED PLASTCI BODY. REMOVE "GLASS" ON TITLE.	19SEP08	HYANG/ SUZHOU



NOTES: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED

- A) PACKAGE STANDARD REFERENCE: JEDEC DO-204 VARIATION AL.
- B) PACKAGE BODY CAN BE PLASTIC OR HERMETICALLY SEALED GLASS .
- D) ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
- E) DRAWING FILE NAME: DO41AREV2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

APPROVALS		DATE		
DRAWN:	BOBOY MALDO	19SEP08		
CHECKED:	HENRY YANG		AXIAL LEADED, JEDEC DO204, VARIATION AL	
APPROVED:	BY HUANG			
APPROVED:	HOWARD ALLEN			
PROJECTION		SCALE	SIZE	DRAWING NUMBER
		1:1	N/A	MKT-DO41A
		FORMERLY: N/A		REV 2
				SHEET: 1 OF 1



TRADEMARKS

The following includes registered and unregistered trademarks and service marks, owned by Fairchild Semiconductor and/or its global subsidiaries, and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

AccuPower™
AttitudeEngine™
Awinda®
AX-CAP®*
BitSiC™
Build it Now™
CorePLUS™
CorePOWER™
CROSSVOLT™
CTL™
Current Transfer Logic™
DEUXPEED®
Dual Cool™
EcoSPARK®
EfficientMax™
ESBC™
F[®]
Fairchild®
Fairchild Semiconductor®
FACT Quiet Series™
FACT®
FastvCore™
FETBench™
FPS™

F-PFS™
FRFET®
Global Power Resource™
GreenBridge™
Green FPS™
Green FPS™ e-Series™
Gmax™
GTO™
IntelliMAX™
ISOPLANAR™
Making Small Speakers Sound Louder and Better™
MegaBuck™
MICROCOUPLER™
MicroFET™
MicroPak™
MicroPak2™
MillerDrive™
MotionMax™
MotionGrid®
MTI®
MTx®
MVN®
mWSaver®
OptoHiT™
OPTOLOGIC®

OPTOPLANAR®
Power Supply WebDesigner™
PowerTrench®
PowerXS™
Programmable Active Droop™
QFET®
QS™
Quiet Series™
RapidConfigure™
Saving our world, 1mW/W/kW at a time™
SignalWise™
SmartMax™
SMART START™
Solutions for Your Success™
SPM®
STEALTH™
SuperFET®
SuperSOT™-3
SuperSOT™-6
SuperSOT™-8
SupreMOS®
SyncFET™
Sync-Lock™

SYSTEM GENERAL®
TinyBoost®
TinyBuck®
TinyCalc™
TinyLogic®
TINYOPTO™
TinyPower™
TinyPWM™
TinyWire™
TranSiC™
TriFault Detect™
TRUECURRENT®*
μSerDes™
SerDes®
UHC®
Ultra FRFET™
UniFET™
VCX™
VisualMax™
VoltagePlus™
XS™
Xsens™
仙童®

* Trademarks of System General Corporation, used under license by Fairchild Semiconductor.

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION, OR DESIGN. TO OBTAIN THE LATEST, MOST UP-TO-DATE DATASHEET AND PRODUCT INFORMATION, VISIT OUR WEBSITE AT [HTTP://WWW.FAIRCHILDSEMI.COM](http://www.fairchildsemi.com). FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS. THESE SPECIFICATIONS DO NOT EXPAND THE TERMS OF FAIRCHILD'S WORLDWIDE TERMS AND CONDITIONS, SPECIFICALLY THE WARRANTY THEREIN, WHICH COVERS THESE PRODUCTS.

AUTHORIZED USE

Unless otherwise specified in this data sheet, this product is a standard commercial product and is not intended for use in applications that require extraordinary levels of quality and reliability. This product may not be used in the following applications, unless specifically approved in writing by a Fairchild officer: (1) automotive or other transportation, (2) military/aerospace, (3) any safety critical application – including life critical medical equipment – where the failure of the Fairchild product reasonably would be expected to result in personal injury, death or property damage. Customer's use of this product is subject to agreement of this Authorized Use policy. In the event of an unauthorized use of Fairchild's product, Fairchild accepts no liability in the event of product failure. In other respects, this product shall be subject to Fairchild's Worldwide Terms and Conditions of Sale, unless a separate agreement has been signed by both Parties.

ANTI-COUNTERFEITING POLICY

Fairchild Semiconductor Corporation's Anti-Counterfeiting Policy. Fairchild's Anti-Counterfeiting Policy is also stated on our external website, www.fairchildsemi.com, under Terms of Use

Counterfeiting of semiconductor parts is a growing problem in the industry. All manufacturers of semiconductor products are experiencing counterfeiting of their parts. Customers who inadvertently purchase counterfeit parts experience many problems such as loss of brand reputation, substandard performance, failed applications, and increased cost of production and manufacturing delays. Fairchild is taking strong measures to protect ourselves and our customers from the proliferation of counterfeit parts. Fairchild strongly encourages customers to purchase Fairchild parts either directly from Fairchild or from Authorized Fairchild Distributors who are listed by country on our web page cited above. Products customers buy either from Fairchild directly or from Authorized Fairchild Distributors are genuine parts, have full traceability, meet Fairchild's quality standards for handling and storage and provide access to Fairchild's full range of up-to-date technical and product information. Fairchild and our Authorized Distributors will stand behind all warranties and will appropriately address any warranty issues that may arise. Fairchild will not provide any warranty coverage or other assistance for parts bought from Unauthorized Sources. Fairchild is committed to combat this global problem and encourage our customers to do their part in stopping this practice by buying direct or from authorized distributors.

PRODUCT STATUS DEFINITIONS

Definition of Terms

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative / In Design	Datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	Datasheet contains preliminary data; supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice to improve design.
No Identification Needed	Full Production	Datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice to improve the design.
Obsolete	Not In Production	Datasheet contains specifications on a product that is discontinued by Fairchild Semiconductor. The datasheet is for reference information only.

Rev. 177



2N3904

SMALL SIGNAL NPN TRANSISTOR

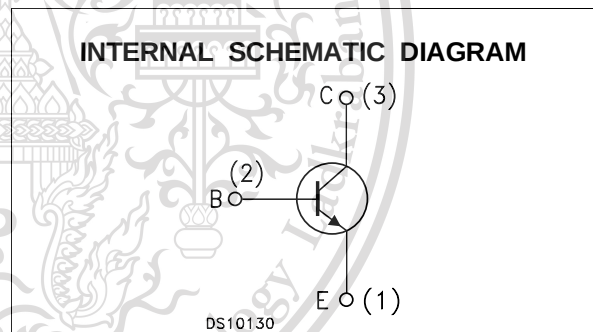
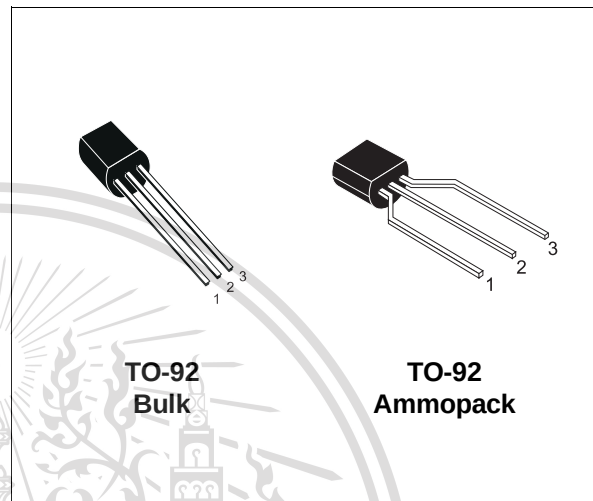
PRELIMINARY DATA

Ordering Code	Marking	Package / Shipment
2N3904	2N3904	TO-92 / Bulk
2N3904-AP	2N3904	TO-92 / Ammopack

- SILICON EPITAXIAL PLANAR NPN TRANSISTOR
- TO-92 PACKAGE SUITABLE FOR THROUGH-HOLE PCB ASSEMBLY
- THE PNP COMPLEMENTARY TYPE IS 2N3906

APPLICATIONS

- WELL SUITABLE FOR TV AND HOME APPLIANCE EQUIPMENT
- SMALL LOAD SWITCH TRANSISTOR WITH HIGH GAIN AND LOW SATURATION VOLTAGE



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{CBO}	Collector-Base Voltage ($I_E = 0$)	60	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage ($I_B = 0$)	40	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage ($I_C = 0$)	6	V
I_C	Collector Current	200	mA
P_{tot}	Total Dissipation at $T_C = 25^\circ C$	625	mW
T_{stg}	Storage Temperature	-65 to 150	$^\circ C$
T_j	Max. Operating Junction Temperature	150	$^\circ C$

February 2003

1/5

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

THERMAL DATA

R _{thj-amb} •	Thermal Resistance Junction-Ambient	Max	200	°C/W
R _{thj-case} •	Thermal Resistance Junction-Case	Max	83.3	°C/W

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_{case} = 25 °C unless otherwise specified)

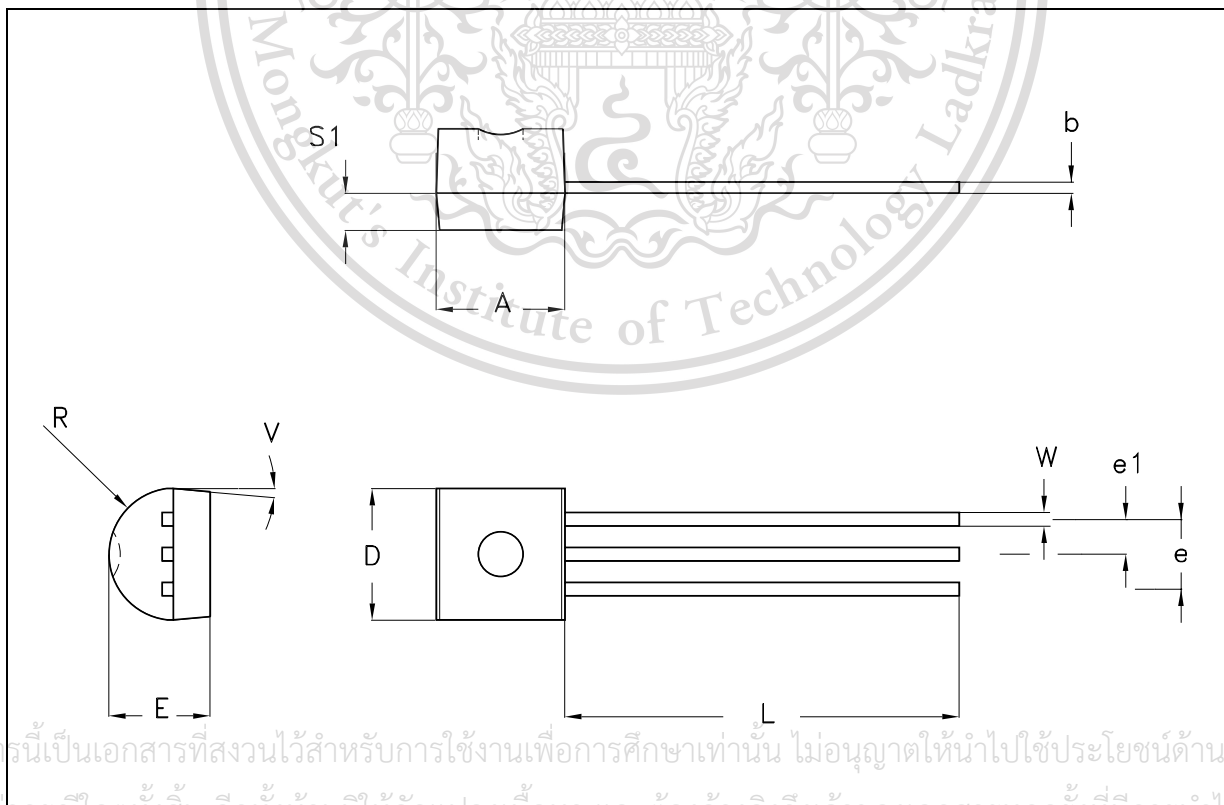
Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
I _{CEX}	Collector Cut-off Current (V _{BE} = -3 V)	V _{CE} = 30 V			50	nA
I _{BEX}	Base Cut-off Current (V _{BE} = -3 V)	V _{CE} = 30 V			50	nA
V _{(BR)CEO} *	Collector-Emitter Breakdown Voltage (I _B = 0)	I _C = 1 mA	40			V
V _{(BR)CBO}	Collector-Base Breakdown Voltage (I _E = 0)	I _C = 10 μA	60			V
V _{(BR)EBO}	Emitter-Base Breakdown Voltage (I _C = 0)	I _E = 10 μA	6			V
V _{CE(sat)} *	Collector-Emitter Saturation Voltage	I _C = 10 mA I _C = 50 mA	I _B = 1 mA I _B = 5 mA		0.2 0.2	V V
V _{BE(sat)} *	Base-Emitter Saturation Voltage	I _C = 10 mA I _C = 50 mA	I _B = 1 mA I _B = 5 mA	0.65	0.85 0.95	V V
h _{FE} *	DC Current Gain	I _C = 0.1 mA I _C = 1 mA I _C = 10 mA I _C = 50 mA I _C = 100 mA	V _{CE} = 1 V V _{CE} = 1 V V _{CE} = 1 V V _{CE} = 1 V V _{CE} = 1 V	60 80 100 60 30	300	
f _T	Transition Frequency	I _C = 10 mA V _{CE} = 20 V f = 100 MHz	250	270		MHz
C _{CBO}	Collector-Base Capacitance	I _E = 0 V _{CB} = 10 V f = 1 MHz		4		pF
C _{EBO}	Emitter-Base Capacitance	I _C = 0 V _{EB} = 0.5 V f = 1 MHz		18		pF
NF	Noise Figure	V _{CE} = 5 V I _C = 0.1 mA f = 10 Hz to 15.7 KHz R _G = 1 KΩ		5		dB
t _d	Delay Time	I _C = 10 mA I _B = 1 mA			35	ns
t _r	Rise Time	V _{CC} = 30 V			35	ns
t _s	Storage Time	I _C = 10 mA I _{B1} = -I _{B2} = 1 mA			200	ns
t _f	Fall Time	V _{CC} = 30 V			50	ns

* Pulsed: Pulse duration = 300 μs, duty cycle ≤ 2 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TO-92 MECHANICAL DATA

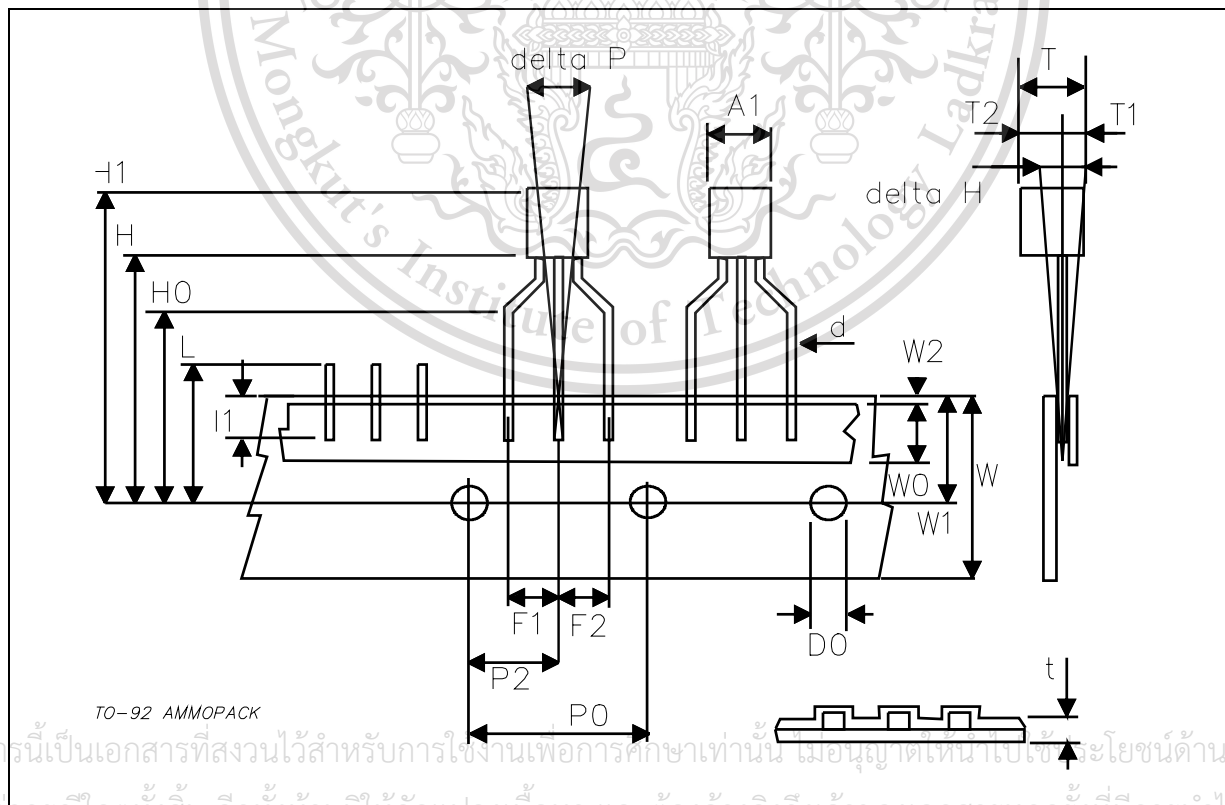
DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.32		4.95	0.170		0.195
b	0.36		0.51	0.014		0.020
D	4.45		4.95	0.175		0.194
E	3.30		3.94	0.130		0.155
e	2.41		2.67	0.095		0.105
e1	1.14		1.40	0.045		0.055
L	12.70		15.49	0.500		0.609
R	2.16		2.41	0.085		0.094
S1	1.14		1.52	0.045		0.059
W	0.41		0.56	0.016		0.022
V	4 degree		6 degree	4 degree		6 degree



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TO-92 AMMOPACK SHIPMENT (Suffix"-AP") MECHANICAL DATA

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A1			4.80			0.189
T			3.80			0.150
T1			1.60			0.063
T2			2.30			0.091
d			0.48			0.019
P0	12.50	12.70	12.90	0.492	0.500	0.508
P2	5.65	6.35	7.05	0.222	0.250	0.278
F1,F2	2.44	2.54	2.94	0.096	0.100	0.116
delta H	-2.00		2.00	-0.079		0.079
W	17.50	18.00	19.00	0.689	0.709	0.748
W0	5.70	6.00	6.30	0.224	0.236	0.248
W1	8.50	9.00	9.25	0.335	0.354	0.364
W2			0.50			0.020
H	18.50		20.50	0.728		0.807
H0	15.50	16.00	16.50	0.610	0.630	0.650
H1			25.00			0.984
D0	3.80	4.00	4.20	0.150	0.157	0.165
t			0.90			0.035
L			11.00			0.433
I1	3.00			0.118		
delta P	-1.00		1.00	-0.039		0.039



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้
 4/5 This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specification mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

The ST logo is a trademark of STMicroelectronics

© 2003 STMicroelectronics – Printed in Italy – All Rights Reserved

STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - Canada - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Israel - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco -
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ STMicroelectronics Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - United States: นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

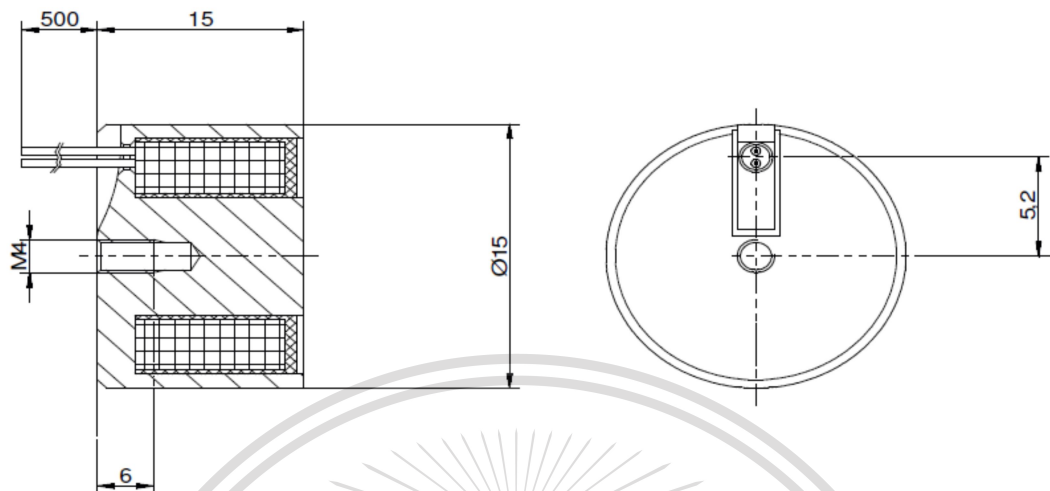
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ <http://www.st.com>



This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

5/5

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



Round electromagnet Ø15

Weight	14g	
Power	1.4W	
Holding force	20N	
Duty cycles	100%	
Voltage	Item 4130005	12VDC
	Item 4140005	24VDC

Options to customized design

- Different voltages / duty cycles
- Magnetic stainless steel housing
- Stainless steel protection plate
- Tailor made cable and connectors
- Special desin

Product data sheet	
Approved	Dec 2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Magma Magnetic Technologies

Kibbutz Gesher, Jordan Valley 15157 Fax:972-4-6753626

Th www.magamagnets.com for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

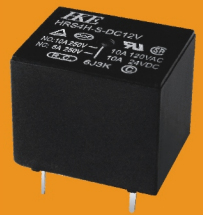
HRS4 Relay


No.1063016


E164730


CQC02001001299


50062840



1.COIL DATA

1-1.Nominal Voltage	3,5,6,9,12,24,48VDC
1-2.Coil Resistance	Refer to Coil Data Chart
1-3.Operate Voltage	Refer to Coil Data Chart
1-4.Release Voltage	Refer to Coil Data Chart
1-5.Nominal Power	360mW、450mW

2.CONTACT DATA

2-1.Contact Form	A-1 Form A,C-1 Form C
2-2.Contact Material	Ag Alloy
2-3.Contact Rating	1A:15A125VAC/24VDC, 10A 250VAC 1C:10A 120VC/24VDC,10A/ 6A 250VAC
2-4.Max.Switching Voltage	TV-5 250VAC/24VDC
2-5.Max.Switching Current	15A
2-6.Max.Switching Power	1,800VA,360W
2-7.Min.Switching Load	5VDC,100mA
2-8.Contact Resistance	Max 100mΩ (6VDC 1A)
2-9.Life	
Electrical	100,000次
Mechanical	10,000,000 次

3.GENERAL DATA

3-1.Insulation Resistance	Min.1000M Ω 500VDC
3-2.Dielectric Strength	750VAC,1 Min between open contacts 1,500VAC,1 min between coil and contacts
3-4.Operate Time	Max.10ms
3-5.Release Time	Max.5ms
3-6.Operate Temperature	-30 ~ +85℃
3-7.Shock Resistance	
Endurance	1,000m/s ²
Misoperation	100m/s ²
3-8.Vibration Resistance	
Endurance	10~ 55Hz,1.5mm double amplitude
Misoperation	10 ~ 55Hz,1.5mm double amplitude

3-9.Humidity 35% ~ 95%RH,+40℃

3-10.Weight Approximately 10g

3-11.Safety UL NO.E164730

TUV NO.50062840

CSA NO.1063016

CQC NO.02001001299

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content of this document when use.

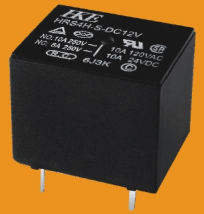
HRS4 Relay

No.1063016

E164730

CQC02001001299

50062840



4.ORDER CODE

HRS4 H - S - DC5V - A

CONTACT FORM

A- 1 Form A

C- 1 Form C

COIL VOLTAGE

DC3V,DC5V,DC6V,DC9V,DC12V,DC24V,DC48V

ENCLOSURE

S - Plastic Sealed Type

COIL POWER

H-High Sensitivity 360mW

NIL-Standard 450mW

RELAY MODEL

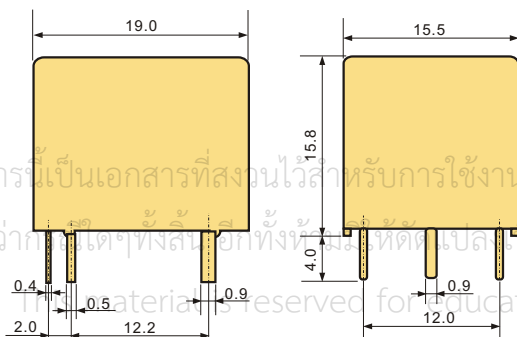
5.COIL DATA CHART

20°C

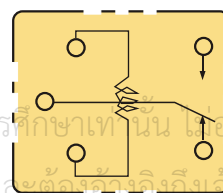
Model	Nominal Voltage VDC	Coil Resistance Ω $\pm 10\%$	Operate Voltage $\leq$ VDC	Release Voltage $\geq$ VDC	Coil Power mW
HRS4-(S)-DC3V	3	20	2.10	0.30	450
HRS4-(S)-DC5V	5	55	3.50	0.50	
HRS4-(S)-DC6V	6	80	4.20	0.60	
HRS4-(S)-DC9V	9	180	6.30	0.90	
HRS4-(S)-DC12V	12	320	8.40	1.20	
HRS4-(S)-DC24V	24	1280	16.8	2.40	
HRS4-(S)-DC48V	48	5120	33.6	4.80	360
HRS4H-(S)-DC3V	3	25	2.10	0.30	
HRS4H-(S)-DC5V	5	70	3.50	0.50	
HRS4H-(S)-DC6V	6	100	4.20	0.60	
HRS4H-(S)-DC9V	9	225	6.30	0.90	
HRS4H-(S)-DC12V	12	400	8.40	1.20	
HRS4H-(S)-DC24V	24	1600	16.8	2.40	
HRS4H-(S)-DC48V	48	6400	33.6	4.80	

6.DIMENSIONS (mm)

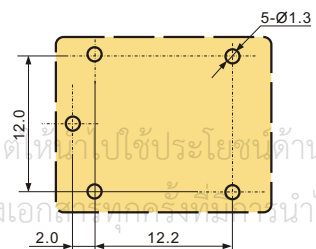
Dimensions



Wiring Diagrams

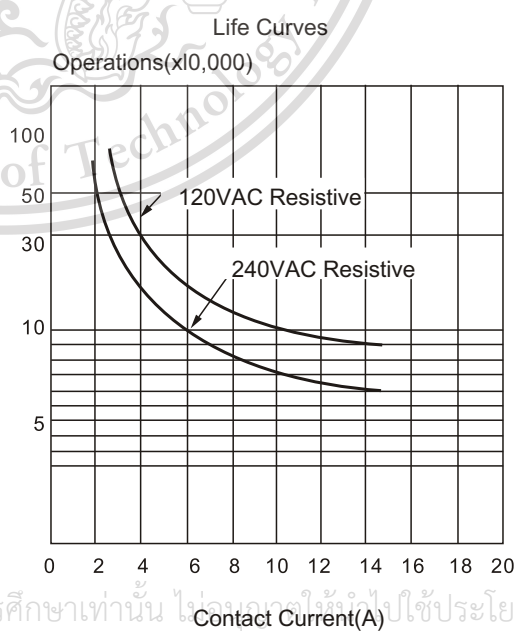
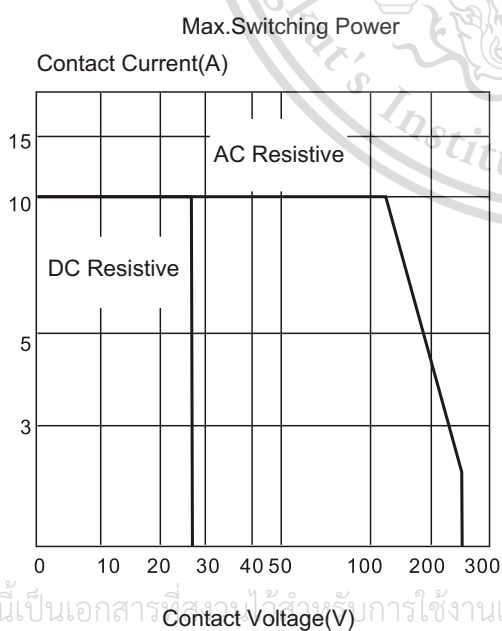
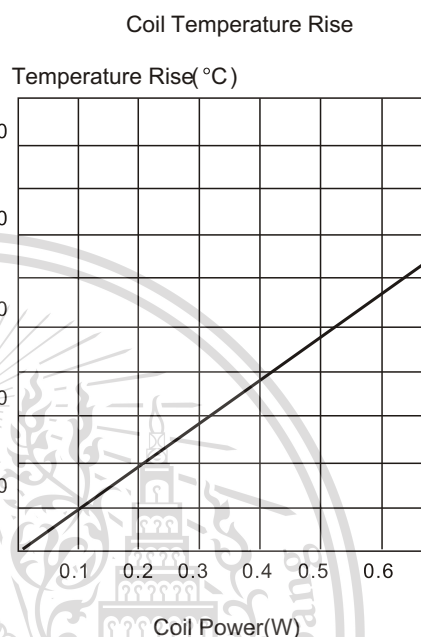
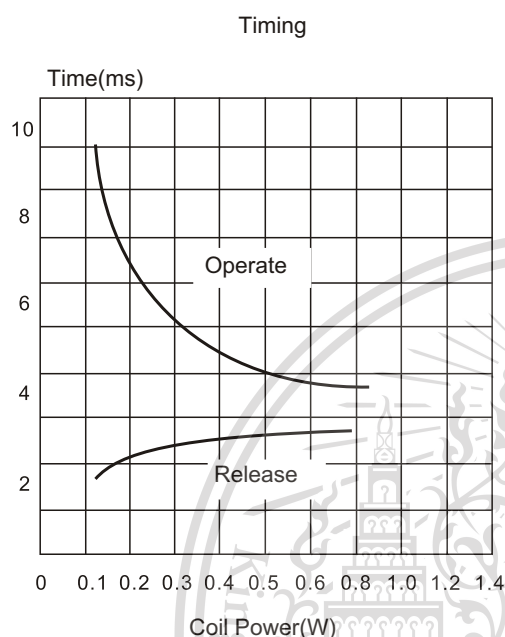


Mounting Hole Layout



Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

7.HRS4 CHARACTERISTIC CHART DATA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สามารถใช้ส่วนหนึ่งการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

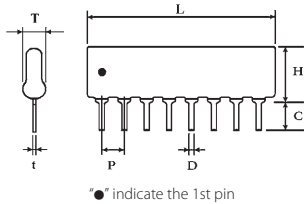
Feature

- Miniature, high density packaging
- High reliability R_{02} paste

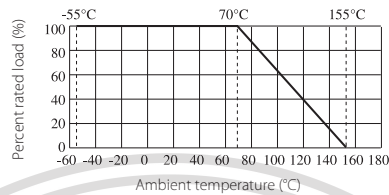
Application

- Control circuit V.C.R.
- Air-conditioner
- Computer, color TV

Dimension (mm)

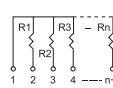
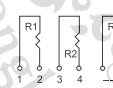
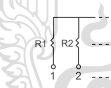
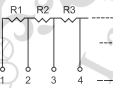
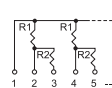
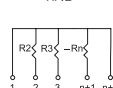
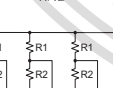
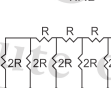
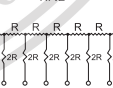
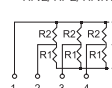


Derating Curve



Type	Dimension of L(Max.)											H max	C +0.5 -0.3	T max	t±0.05	P±0.2	D±0.1
	4pin	5pin	6pin	7pin	8pin	9pin	10 pin	11 pin	12 pin	13 pin	14 pin						
RNL	10.2	12.7	15.3	17.8	20.4	22.9	25.4	28.0	30.5	33.1	35.6	5.08	3.3	2.5	0.25	2.54	0.5
RPL	10.2	12.7	15.3	17.8	20.4	22.9	25.4	28.0	30.5	33.1	35.6	5.08	3.3	2.5	0.25	2.54	0.5
RNM	10.2	12.7	15.3	17.8	20.4	22.9	25.4	28.0	30.5	33.1	35.6	6.35	3.3	2.5	0.25	2.54	0.5
RPH	10.2	12.7	15.3	17.8	20.4	22.9	25.4	28.0	30.5	33.1	35.6	8.89	3.3	2.5	0.25	2.54	0.5

Circuit Structure

A RNL/RPL/RNM/RPH  $R1=R2=...Rn$	B RNL/RPL/RNM/RPH  $R1=R2=...Rn$	C RNL  $R1=R2=Rn$	D RNL  $R1=R2=...Rn$ $R1 \neq R2 \neq ... Rn$	E RNL  $R1=R2$ or $R1 \neq R2$
G RNL  $R1=R2=...Rn$	H RNL 	L RNL 	P RNL 	R RNL/RPL/RNM/RPH  $R1=R2$ or $R1 \neq R2$

* Special circuit is available case by case.

Package Power Ratings

Type	4PIN	5PIN	6PIN	7PIN	8PIN	9PIN	10PIN	11PIN	12PIN	13PIN	14PIN
RPL	0.5W	0.63W	0.75W	0.88W	1.0W	1.13W	1.25W	1.38W	1.5W	1.63W	1.75W
RNM	0.6W	0.75W	0.9W	1.05W	1.20W	1.35W	1.50W	1.65W	1.80W	1.95W	2.10W
RPH	0.8W	1.0W	1.2W	1.4W	1.6W	1.8W	2.0W	2.2W	2.4W	2.6W	2.8W

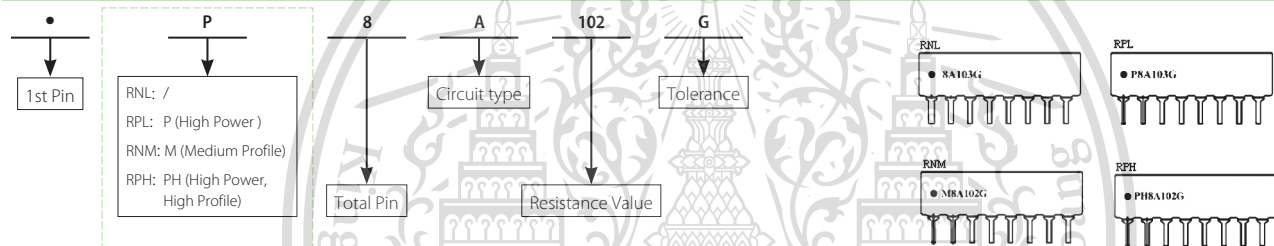
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

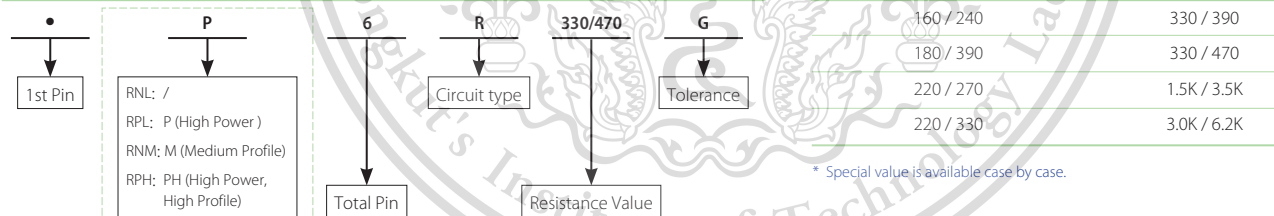
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Type	Power Rating 70°C	Max. Working Voltage	Max. Overload Voltage	Dielectric Withstanding Voltage	Resistance Range	Tolerance	Operating Temperature
RNL	B type: 0.2W Others: 0.125W	100V	150V	200V	R Type: 100Ω~10K Others: 10Ω~1MΩ	±2% ±5%	-55°C~+155°C
	A:0.2W				10Ω~1MΩ		
RPL	B:0.3W R:0.2W	100V	150V	200V	10Ω~1MΩ 100Ω~10KΩ	±2% ±5%	-55°C~+155°C
	A:0.25W				10Ω~1MΩ		
RNM	B:0.4W R:0.25W	100V	150V	200V	10Ω~1MΩ 100Ω~10KΩ	±2% ±5%	-55°C~+155°C
	A:0.3W				10Ω~1MΩ		
RPH	B:0.5W R:0.3W	100V	150V	200V	10Ω~1MΩ 100Ω~10KΩ	±2% ±5%	-55°C~+155°C

Marking (Single Value)



Marking(Dual Value):



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

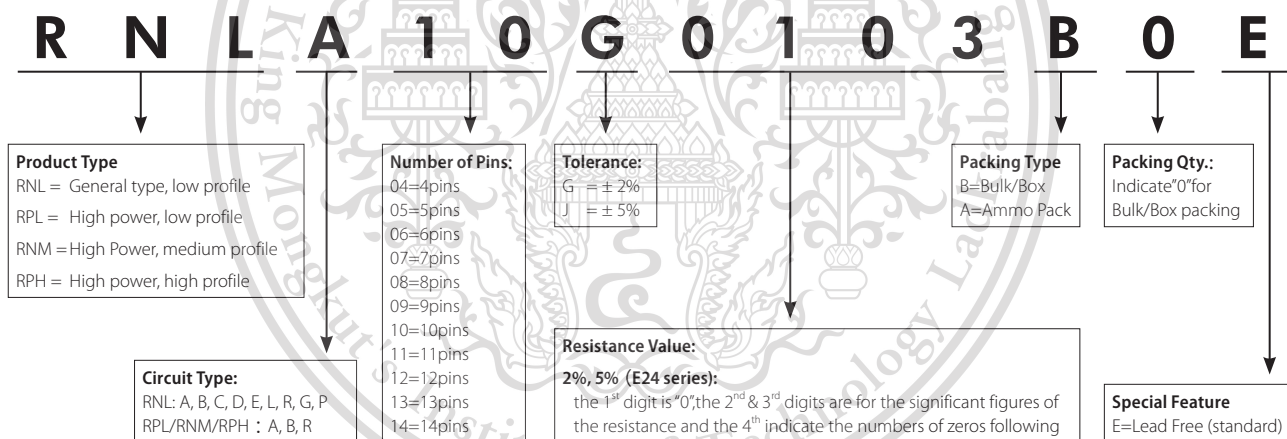
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Performance Specification

Test Item	Evaluation Criteria			
Temperature	RNL	RPL	RNM	RPH
	50Ω~1MΩ: ±200PPM/°C <50Ω&>1MΩ: ±250PPM/°C	50Ω~1MΩ: ±100PPM/°C <50Ω&>1MΩ: ±250PPM/°C		
Short-time overload	ΔR/R≤±(0.5%+0.1Ω)		ΔR/R≤±(0.25%+0.1Ω)	
Insulation resistance	≥10,000MΩ			
Dielectric withstanding voltage	No Evidence of flashover,arcing or insulation breakdown			
Terminal strength	ΔR/R≤±(0.5%+0.1Ω)		ΔR/R≤±(0.25%+0.1Ω)	
Soldering heat	ΔR/R≤±(0.5%+0.1Ω)			
Solderability	Coverage must be over 95%.			
Thermal shock	ΔR/R≤±(0.5%+0.1Ω)		ΔR/R≤±(0.25%+0.1Ω)	
Rapid change of temperature	ΔR/R≤±(0.5%+0.1Ω)			
Load life in humidity	ΔR/R≤±(3%+0.1Ω)		ΔR/R≤±(0.5%+0.1Ω)	
Load life	ΔR/R≤±(3%+0.1Ω)		ΔR/R≤±(1%+0.1Ω)	

Ordering Procedure (Example: RNL A type 10 PIN 2% 10KΩ B/B)



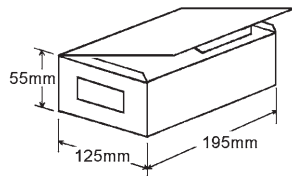
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Remark: For more details, please check page 135, Part No. System

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

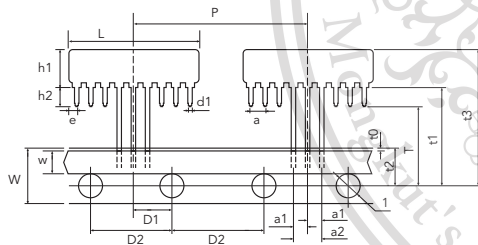
Standard Packing of Resistor Network



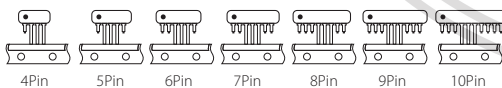
Type	Pins	Weight of 1,000pcs (g)	Qty.per Bag	Qty.per Box	Qty.per Carton
RNL RPL	4	210	200	1,000	30,000
RNM		240	100		
RPH		330			
RNL RPL	5	250	200	1,000	30,000
RNM		300	100		
RPH		410			
RNL RPL	6	320	200	1,000	30,000
RNM		360	100		
RPH		490			
RNL RPL	7	360	200	1,000	30,000
RNM		420	100		
RPH		570			
RNL RPL	8	430	200	1,000	30,000
RNM		480	100		
RPH		660	50		

Type	Pins	Weight of 1,000pcs (g)	Qty.per Bag	Qty.per Box	Qty.per Carton
RNL RPL	9	450	200	1,000	30,000
RNM		540	50	500	15,000
RPH		760			
RNL RPL	10	530	200	1,000	30,000
RNM		610	50	500	15,000
RPH		870			
RNL RPL	11	600	100	500	15,000
RNM		670	50		
RPH		950			
RNL RPL	12	650	100	500	15,000
RNM		730	50		
RPH		1030			
RNL RPL	13	710	100	500	15,000
RNM		790	50		
RPH		1130			
RNL RPL	14	770	100	500	15,000
RNM		850	50		
RPH		1210			

Ammo Pack of Resistor Network



* ... n=Pin Count



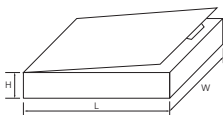
Dimension (mm)

Dimension (mm)	Dimension (mm)
H1	Max 5.08
L	Max 2.54*n
a	2.54±0.25
d1	0.5±0.1
P	25.4±1.0
W	18±0.5
w	5.0min
P1	6.35±0.7
P2	12.7±0.3
B	Max 2.49
T	16±0.5

Dimension (mm)

Dimension (mm)	Dimension (mm)
t0	2.0Max
t1	18.99±0.5
t2	9.0±0.5
t3	24.46Max
t4	1.5max
I	φ4.0±0.3
h2	3.0±0.5
a1	2.54±0.25
a2	5.08±0.3
d3	2.0Max
/	/

Packing quantity



The inner box sizes:

4~9pin: 320(L) × 207(W) × 40(H)mm

10pin: 315(L) × 295(W) × 40(H)mm

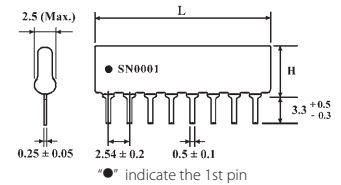
Pins	Qty.per Box	Qty.per Carton
4~10	1,000	12,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

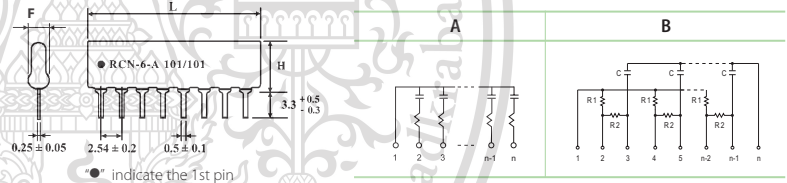
Special Network-SIP Series



Type	SN0001	SN0002	SN0003	SN0004
Circuit Structure	R1=500Ω ±5% R2=40K ±5% (TO: R3: ±1%) R3=10K ±5% R4=100-75K ±5% R6=R7=100K ±5% (R8 TO R7: ±1%)	R1=33KΩ ±5% R2=22KΩ ±5%	R3=9K1 R1=120K R14=24K R4=30K R11=11K R9=14K R15=1K5 R5=R6=7K5 R10=R11=R12=20K R13=2K R7=52K5	R1=520Ω R2=700Ω R3=121Ω R4=249Ω R5=1K33 R6=619K R7=174Ω R8=75Ω
Dimension of L(max)	10PINS:25.4mm	10PINS:25.4mm	10PINS:43.2mm	9PINS:22.9mm
H(max)	5.08mm	5.08mm	6.35mm	5.08mm
Power Rating at 70°C	0.2W	0.2W	0.125W	0.125W
Max Working Voltage	100V	100V	100V	100V
Max Overload Voltage	150V	150V	200V	150V
Operating Temperature	-55~+155 °C	-55~+155 °C	-55~+155 °C	-55~+155 °C

* Special circuit is available case by case.

Resistor/Capacitor Network - SIP Series

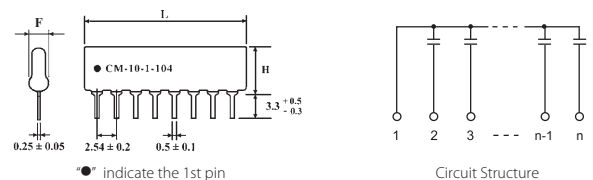


Electrical Characteristics- Capacitor

Capacitance Dielectric	Capacitance Range	Capacitance Tolerance	Capacitance Voltage	Type	H (mm)	F (mm)	Dimension (mm)	
NPO	39pF~270pF	±10%	50V	RCH	7.62 Max.	3.81 Max.	L	
X7R	>270pF~0.1μF	±20%		RCN	8.89 Max.	3.81 Max.	4 PIN: 10.2mm	10 PIN: 25.4mm
							5 PIN: 12.7mm	11 PIN: 28.0mm
							6 PIN: 15.3mm	12 PIN: 30.5mm
							7 PIN: 17.8mm	13 PIN: 33.1mm
							8 PIN: 20.4mm	14 PIN: 35.6mm
							9 PIN: 22.9mm	

* Special circuit is available case by case.

Capacitor Network-SIP Series



Electrical Characteristics- Capacitor

Capacitance Dielectric	Capacitance Range	Capacitance Tolerance	Capacitance Voltage	Type	H (mm)	F (mm)	Dimension (mm)	
NPO	39pF~270pF	±10%	50V	CNM	6.35 Max.	3.81 Max.	L	
X7R	>270pF~0.1μF	±20%		CNH	7.62 Max.	3.81 Max.	4 PIN: 10.2mm	10 PIN: 25.4mm
							5 PIN: 12.7mm	11 PIN: 28.0mm
							6 PIN: 15.3mm	12 PIN: 30.5mm
							7 PIN: 17.8mm	13 PIN: 33.1mm
							8 PIN: 20.4mm	14 PIN: 35.6mm
							9 PIN: 22.9mm	

* Special circuit is available case by case.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----

The standard Part No. includes 14 digits with the following explanation:

1. 1st~4th digits:
 - a) This is to indicate the SMD Resistor size. Example: 1206, TC05 or HV03;
 - b) For Resistor Network & Coated type, the 1st~3rd digits are to indicate the product type and the 4th digit is the special feature. Example: RNLA = Resistor Network Circuit A type; CFRF = Carbon Film Fixed Resistors Non-Flame type; MORI = Metal Oxide Film Fixed Resistor Non-Inductive type.
 - c) For Cement Fixed Resistors, these 4 digits are to indicate the product type but if the product type has only 3 digits, the 4th digit will be "0". Example: PRW0=PRW type; PRWC=PRWC type.
2. 5th~6th digits:
 - a) This is to indicate the wattage or power rating. To distinguish the sizes and the numbers, the following codes are used, and please refer to the following chart for details: W = Normal Size; S = Small Size; U = Ultra Small Size; "1"~"G" to denotes "1"~"16" as Hexadecimal:

1/16W ~ 1/2W (<1W)

Wattage	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	1/10	1/11	1/12	1/13	1/14	1/15	1/16
Normal Size	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	WA	WB	WC	WD	WE	WF	WG
Small Size	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	SA	SB	SC	SD	SE	SF	SG
Ultra Small Size	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	UA	UB	UC	UD	UE	UF	UG

1W ~ 16W (≥1W)

Wattage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Normal Size	1W	2W	3W	4W	5W	6W	7W	8W	9W	AW	BW	CW	DW	EW	FW	GW
Small Size	1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8S	9S	AS	BS	CS	DS	ES	FS	GS
Ultra Small Size	1U	2U	3U	4U	5U	6U	7U	8U	9U	AU	BU	CU	DU	EU	FU	GU

- b) For power rating less than 1W, the 5th digit will be the letters W, S or U to represent the size required & the 6th digit will be a number or a letter code. Example: WA = 1/10W; U2 = 1/2W-SS
- c) For power rating of 1W to 16W, the 5th digit will be a number or a letter code and the 6th digit will be the letters of W, S or U. Example: AW = 10W; 3S = 3W-S.
- d) For power rating between 20W to 99W, the 5th & 6th digits will show the whole numbers of the power rating itself. Example: 20 = 20W; 75 = 75W.
- e) For power rating of 100W & over, the 5th & 6th digits will be indicated with "00" and the actual wattage being indicated at the last 3 digits (12th~14th) of the Part No.
- f) For special power ratings, the following codes are to be used:
 - 1). WH = 1/32W (10P8 Chip Network)
 - 2). 07 = 3/4WS (Chip 2010 size)
 - 3). 04 = 0.4W-SS (0.4 watt Ultra Small size)
 - 4). 06 = 0.6W-S (0.6 watt Small size)
 - 5). 2A = 2.5W 6). 6A = 6.5W 7). WK = 2/3W
 - 8). 1A = 1.5W 9). 1.25W = 1Q
- g) For Resistor Network, since the power rating is fixed as 1/8W for A circuit & 1/5W for B circuit, the 5th & 6th digit is to be used to denote the number of pins required. Example: 09 = 9pins; 12 = 12pins.
- h) For Jumper Wires the 5th & 6th digits will be indicated with "00".
- i) For Thin Film Chip Resistors, these 2 digits will be used to indicated the requested Temperature coefficient:
 - 1). 05 = 5PPM 2). 10 = 10PPM 3). 15 = 15PPM 4). 25 = 25PPM 5). 50 = 50PPM

3. The 7th digit is to denote the Resistance Tolerance. The following letter code is to be used for indicating the standard Resistance Tolerance. As for Metal Film Fixed Resistor products, it is also to denote the standard PPM as follows:

B = ±0.1% (15PPM)	G = ±2% (100PPM)	W = ±0.05%
C = ±0.25% (25PPM)	J = ±5% (200PPM)	L = ±0.01%
D = ±0.5% (50PPM)	K = ±10%	
F = ±1% (50PPM)		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.
Remark: if it is not one of the above standard "tolerance-TCR", the requirement should be clearly stated when placing order.
Example: ±1% (25PPM), the 7th digit still shows "F" but separately note the requirement of "25PPM"

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4. The 8th to 11th digits is to denote the Resistance Value:

- For the standard resistance values of E-24 series in 5% & 10% tolerance, the 8th digit is "0", the 9th & 10th digits are to denote the significant figures of the resistance and the 11th digit is the number of zeros following
- For the standard resistance values of E-96 series in $\leq 2\%$ tolerance, the 8th digit to the 10th digits are to denote the significant figures of the resistance and the 11th digit is the number of zeros following.
- For the code to the significant figures to E-24 & E-96 series, please refer to page 170 & 171 of the standards Resistance Value list.
- The following numbers and the letter codes is to be used to indicate the number of zeros in the 11th digit:

0 = 10 ⁰	1 = 10 ¹	2 = 10 ²	3 = 10 ³	4 = 10 ⁴	5 = 10 ⁵	6 = 10 ⁶
J = 10 ⁻¹	K = 10 ⁻²	L = 10 ⁻³	M = 10 ⁻⁴	N = 10 ⁻⁵	P = 10 ⁻⁶	

- For Cement Resistors the 8th digit will be coded with "W" or "P" to denote Wire-wound type or Power Film type respectively of the Cement Fixed Resistor product. The 9th to 11th please refer to point 4.a

Example:

E-24 series

0120 = 12 ohm
0123 = 12K ohm
012J = 1.2 ohm

E-96 series

1210 = 121 ohm
1302 = 13K ohm
196J = 19.6 ohm

Cement Resistors

W120 = 12 ohm Wire-wound type
W12J = 1.2 ohm Wire-wound type
P273 = 27 kohm Power Film type

5. The 12th, 13th & 14th digits:

- The 12th digit is to denote the Packaging type with the following codes:
A = Tape / Box (Ammo Pack) C = Bulk in Cassette (for Chip product)
B = Bulk / Box T = Tape / Reel P = Tape / Box of PT-26 product
- The 13th digit is normally to indicate the Packing Quantity of Tape/Box or Tape/Reel packaging types. Except for Chip products Bulk packing, this digit should be filled "0" or other products with "Bulk/Box packaging requirement". The following letter codes is to be used for some packaging quantities.

A = 500pcs	B = 2,500pcs	C = 10,000pcs	N = 12,500pcs	E = 15,000pcs
D = 20,000pcs	G = 25,000pcs	L = 45,000pcs	H = 50,000pcs	J = 60,000pcs

Example:

CHIP product

TD = T/R-20,000
TE = T/R-15,000
T4 = T/R-4,000

Other products

A5 = T/B-5,000
TB = T/R-2,500
B0 = B/B

- For the Forming type products, the 13th & 14th digits are used to denote the forming types of the product with the following letter codes:

MF = M type with Flattened lead wire	F0 = F type
MK = M type with Kinked lead wire	F1 = F1 type
ML = M type with normal lead wire	F2 = F2 type
MC = M type with kinked lead wire	F3 = F3 type

- For power rating over 100watt, the 12th to the 14th digits are to denote the actual wattage of the products:

Example: 100 = 100watt 150 = 150watt 225 = 225watt

- For some products, the 14th digit alone can use to denote special features or additional information with the following codes:

P = Panasert type	1 = Avisert 1 type	2 = Avisert 2 type
3 = Avisert 3 type	A = CO 1/4W - A type	B = CO 1/4W - B type

E = used to denote the "Environment Protection, lead Free type" of SMD category resistors (now, this became the Standard type of SMD)

- For some products, the 14th digit alone can use to denote special features or additional information with the following codes:

B=1/32W	C=1/16W	F=1/10W	G=1/8W	H=1/6W	J=1/4W	K=1/3W	M=1/2W
N=3/4W	P=1W	S=Special					

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.