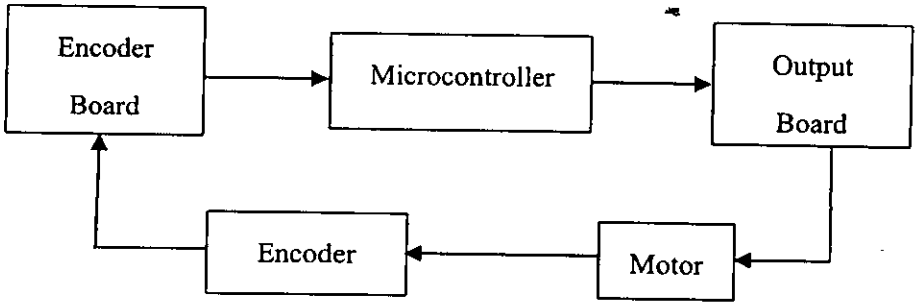
บทที่ 4

ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก

จากบทที่ผ่านมา ได้ทราบถึงแบบจำลองของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก และได้นำแบบจำลองนั้นมาสร้างเป็นระบบการควบคุมจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองการทำงานและปรับตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกให้ได้ผลตอบสนองต่อตำแหน่งที่เหมาะสม ดังนั้นในบทนี้ จะเป็นการนำแบบจำลองเหล่านั้น มาสร้างเป็นระบบควบคุมจริงต่อไป

4.1 ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก

ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำในเครื่องพับและตัดเหล็ก สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 4-1



ภาพประกอบ 4-1 ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก

ระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก มีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

4.1.1. ส่วนอินพุต (input part)

4.1.2. ส่วนตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic controller)

4.1.3. ส่วนเอาท์พุต (output part)

4.1.1. ส่วนอินพุต (input part)

ส่วนของสัญญาณอินพุตของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณอินพุตทั้งหมดที่ใช้ในระบบ ได้แก่ สัญญาณจากตัวเอนโคดเดอร์ (encoder) และสัญญาณจากตัวลิมิตสวิตช์ ดังนั้น เราสามารถแยกออกเป็นส่วนย่อย ๆ ได้ดังต่อไปนี้

- **เอนโคดเดอร์ (encoder)**

ในระบบควบคุมตำแหน่งนั้น สามารถแบ่งลักษณะการควบคุมได้ 2 แบบ คือ

1. ระบบควบคุมที่ไม่มีการป้อนกลับ เป็นการให้ค่าตำแหน่งกลไกโดยไม่รับรู้ถึงผลลัพธ์ที่ได้จริง เช่น การควบคุมมอเตอร์สเตปปิ้ง (stepping motor) ซึ่งควบคุมโดยการจ่ายแรงดันให้กับขดลวดในจุดต่างๆ ทำให้เกิดการหมุนเป็นสเตป แต่วงจรควบคุมจะไม่สามารถรับรู้ได้ว่าค่าตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปจริงๆนั้นเป็นอย่างไร

2. ระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ เป็นการควบคุมกลไกโดยตรวจสอบผลการทำงานที่ได้จริงแล้วนำมาวิเคราะห์ เช่น มอเตอร์เซอร์โว (servo motor) ซึ่งควบคุมโดยการจ่ายแรงดันให้มอเตอร์หมุนไป พร้อมๆกับการตรวจสอบตำแหน่งที่ได้จริงจากการทำงานของกลไก แล้วนำค่าตำแหน่งนั้นมาวิเคราะห์เพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์ต่อไป

ในการควบคุมที่ต้องการประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง จะใช้ระบบควบคุมแบบมีการป้อนกลับ ซึ่งระบบนี้อาจจะควบคุมด้วยการวิเคราะห์ผลลัพธ์อย่างง่าย หรืออาจเป็นแบบพีไอดี ซึ่งมีระบบการคำนวณที่ซับซ้อนมาก แต่ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า ซึ่งการอ่านค่าตำแหน่งนั้น ก็สามารถอ่านค่าได้หลายวิธีจากอุปกรณ์หลายประเภท และในการทำงานของชุดวัดระยะที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น เราจะใช้โรตารี่เอนโคดเดอร์ (rotary encoder) ในการตรวจสอบถึงทิศทางและตำแหน่งการหมุนไปของบอลสกรู (ball screw) เพื่อจะได้ทราบถึงตำแหน่งของตัววัดระยะ

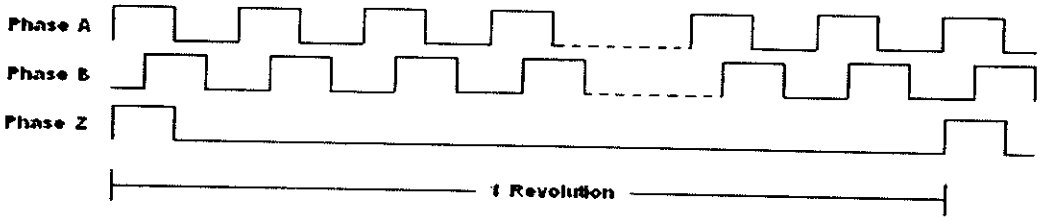
ภาพประกอบ 4-2 อินคริเมนทอลโรตารี่เอนโคดเดอร์ (incremental rotary encoder)

โรตารี่เอนโคดเดอร์นั้น มี 3 แบบ คือ

1. Absolute rotary encoder ที่ให้ค่าตำแหน่งการหมุนของแกน ข้อมูลที่ได้จะเป็นค่าตำแหน่ง ณ จุดนั้นๆ ซึ่งข้อมูลอาจจะอยู่ในรูปแบบบีซีดี (BCD) หรือรหัสเกรย์ (gray code)

2. Multi-turn rotary encoder เหมือนกับ absolute rotary encoder แต่สามารถอ่านค่าจากการหมุนในหลายๆรอบได้

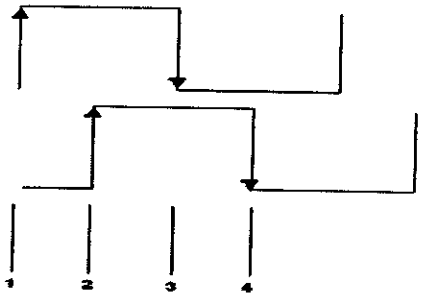
3. Incremental rotary encoder ที่ให้ค่าในรูปของการเปลี่ยนแปลงเฟสในการหมุน ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของเฟสที่ต่างกัน 90 องศา มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับระบบตรวจจับการเคลื่อนไหวของเมาส์



ภาพประกอบ 4-3 แสดงพัลซ์ที่ได้จากอินคริเมนทอลโรตารี่เอนโคดเดอร์

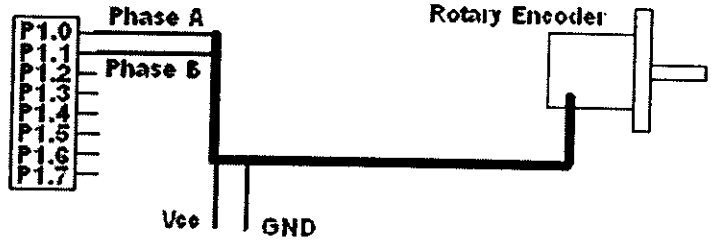
อินคริเมนทอลโรตารี่เอนโคดเดอร์ จะให้เอาต์พุตเป็นเส้นสัญญาณ 3 เส้น คือ เฟส A, เฟส B และเฟส Z โดยเมื่อมีการหมุนแกนของโรตารี่เอนโคดเดอร์ จะมีสัญญาณพัลซ์ ออกมาทางสายทั้ง 3 เส้น โดยที่พัลซ์ ของเฟส A และเฟส B จะต่างกันอยู่ 90 องศา แต่การที่เฟสใดจะนำอีกเฟสหนึ่งนั้นจะขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของแกน และเมื่อหมุนครบรอบทุกครั้ง จะมีพัลซ์ออกมาทางเฟส Z ด้วย

ในชุดวัดระยะที่ได้ทดลองพัฒนานั้น ใช้อินคริเมนทอลโรตารี่เอนโคดเดอร์ ยี่ห้อ OMRON รุ่น E6A2-CWZ3C ที่ให้ 100 พัลซ์ ต่อ 1 รอบ และอาศัยการตรวจจับขอบขาขึ้นและขาลงของทั้งเฟส A และเฟส B ทำให้สามารถแบ่ง 1 พัลซ์ เป็น 4 ส่วน ดังนั้นในการหมุน 1 รอบก็จะสามารถแบ่งสเตปการหมุนได้เป็น 400 ส่วน

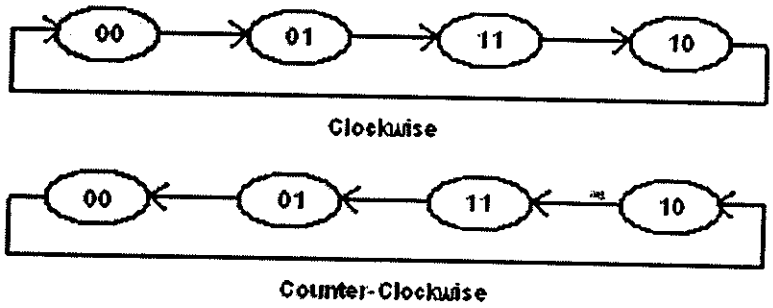


ภาพประกอบ 4-4 การตรวจจับขอบขาขึ้น และขอบขาลงของทั้ง 2 เฟส

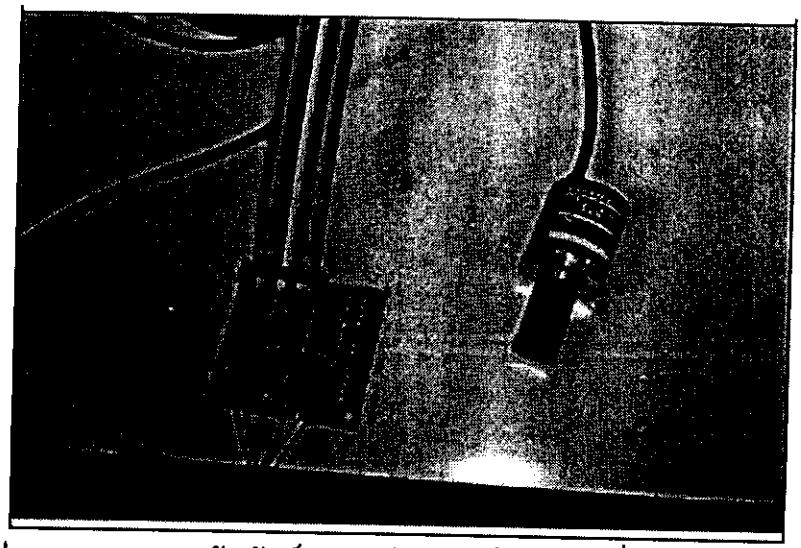
ในการอ่านค่าจากโรตารี่เอนโคดเดอร์ จะประกอบสายสัญญาณต่างๆ ดังรูป



ภาพประกอบ 4-5 การประกอบโรตารี่เอนโคดเดอร์เข้ากับวงจร



ภาพประกอบ 4-6 วิธีการตรวจจับทิศทางการหมุนของโรตารี่เอนโคดเดอร์ โดยอ่านค่าเข้ามาทางพอร์ตหนึ่งของไมโครคอนโทรลเลอร์



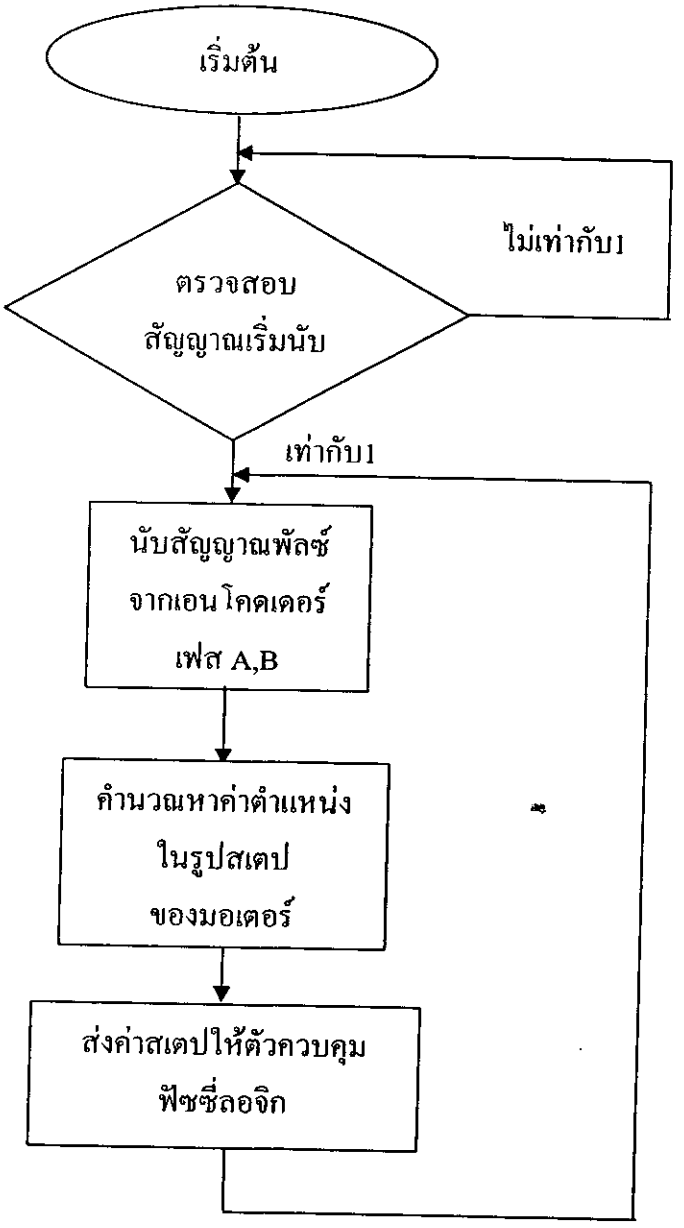
ภาพประกอบ 4-7 วงจรรับพัลซ์จากเอนโคดเดอร์ และโรตารี่เอนโคดเดอร์

- **บอร์ดเอนโคดเดอร์ (encoder board)**

โรตารี่เอนโคดเดอร์ เป็นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่ในการตรวจสอบตำแหน่งของชุดวัดระยะว่าเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการหรือยัง โดยการรับพัลซ์จากเอนโคดเดอร์ที่ส่งมา และนับสเตปแต่ละพัลซ์ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งเป้าหมาย เพื่อหาค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ป้อนเป็นอินพุตให้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก และส่งสัญญาณให้ตัววัดระยะ เคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมาย

บอร์ดเอนโคดเดอร์ จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณจากเอนโคดเดอร์มาประมวลผล เพื่อคำนวณออกมาเป็นค่าตำแหน่งของมอเตอร์ในขณะนั้นๆ และส่งต่อไปให้กับบอร์ดตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ในการประมวลผลนั้นจะใช้ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ Phillips P89C51RD2 เช่นเดียวกับบอร์ดตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

การทำงานของโปรแกรมที่ทำหน้าที่ติดต่อกับเอนโคดเดอร์ ในการคำนวณค่าตำแหน่งของมอเตอร์ มีรูปแบบการทำงาน คือจะรับสัญญาณพัลซ์จากเอนโคดเดอร์ โดยจะเริ่มนับพัลซ์ เมื่อได้รับสัญญาณเริ่มนับ (start counting) ซึ่งจะเริ่มนับเมื่อมอเตอร์เข้าถึงจุดเริ่มต้นแล้ว จากนั้นจะคำนวณค่าสเตป แล้วส่งค่าสเตปไปยังบอร์ดตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ซึ่งสามารถแสดงการทำงานโดยโฟลว์ชาร์ต ดังภาพประกอบ 4-8 ต่อไปนี้

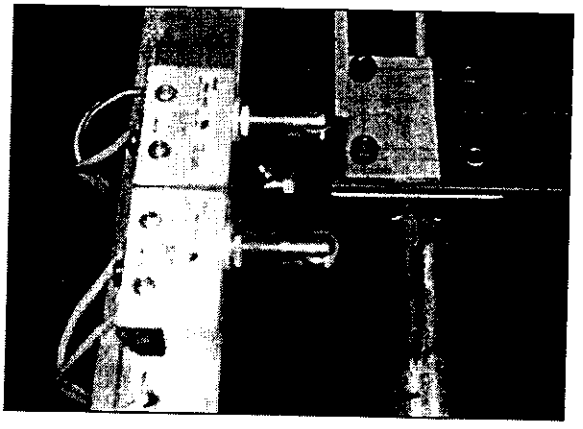


ภาพประกอบ 4-8 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมคำนวณ
ค่าตำแหน่งของมอเตอร์จากเอนโคดเดอร์

- **ลิมิตสวิตช์ (limit switch)**

ลิมิตสวิตช์ เป็นส่วนสำคัญในการกำหนดตำแหน่งของตัววัดระยะ โดยเฉพาะจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของตำแหน่งตัววัดระยะ ทั้งยังช่วยป้องกันตัววัดระยะ เคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งที่กำหนด ในกรณีที่โปรแกรมควบคุมเกิดผิดพลาดไม่สามารถควบคุมได้ ส่วนของลิมิตสวิตช์ ประกอบไปด้วย ลิมิตสวิตช์ จำนวน 3 ตัว ดังภาพประกอบ 4-9 ตัวที่หนึ่งทำหน้าที่ในการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของ

การใช้งานหรือเป็นตำแหน่งที่ 00.0 mm. โดยจะมีการใช้งานร่วมกับโรตารี่เอน โคดเดอร์ เพื่อทำให้เกิดความแน่นอนในการหาตำแหน่ง มีประโยชน์ในกรณีที่ต้องการเคลียร์ค่าผิดพลาดสะสมจากการทำงานหลาย ๆ ครั้ง ตัวที่สอง ทำหน้าที่ในการตัดไฟที่เข้าวงจรหลัก เพื่อหยุดการทำงานในกรณีที่โปรแกรมเกิดความผิดพลาดในการควบคุม ทำให้ตัววัดระยะ เกิดเคลื่อนที่เกินตำแหน่งเริ่มต้น เมื่อตัววัดระยะ เคลื่อนที่ไปแตะกับลิมิตสวิตช์ตัวนี้ จะทำให้ไฟที่จ่ายให้กับวงจรเป็นวงจรเปิดหยุดการทำงาน ตัววัดระยะก็หยุดเคลื่อนที่ด้วย ส่วนลิมิตสวิตช์ ตัวที่สามเป็นตัวที่กำหนดตำแหน่งปลายสุดหรือระยะทางมากที่สุดที่จะเคลื่อนที่ได้ อยู่ที่ระยะทาง 360.0 mm. ถ้าตัววัดระยะ เคลื่อนที่ไปแตะลิมิตสวิตช์ ตัวนี้จะตัดไฟวงจรหลักเช่นเดียวกับลิมิตสวิตช์ ตัวที่ 2



ภาพประกอบ 4-9 ลิมิตสวิตช์ ที่ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของตัววัดระยะ

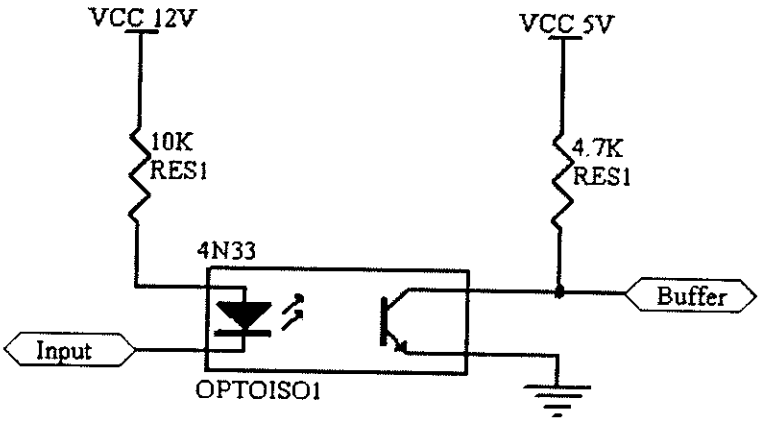
- **วงจรอินพุต**

วงจรนี้จะรับสัญญาณจากอุปกรณ์ภายนอก เช่น จากลิมิตสวิตช์ต่างๆ โดยจะมีทั้งหมด 24 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณจะมี opto-isolator เพื่อแยกกราวด์ของอินพุต กับบอร์ดควบคุม ให้แยกจากกัน แต่ข้อมูลยังต้องสามารถส่งถึงกันได้ ซึ่ง IC opto-isolator เบอร์ 4N33 นี้จะใช้แสงในการส่งผ่านข้อมูล เพียงเท่านี้ กราวด์ของวงจรทั้งสองก็แยกจากกัน ทั้งนี้เพื่อลดความเสียหายจากสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ภายนอกที่จะมีต่อวงจรควบคุมที่ละเอียดอ่อนได้

ส่วนที่รับข้อมูลต่างๆของตัวเครื่องจักร มีอุปกรณ์ดังนี้

1. IC opto-isolator 4N33
2. IC บัฟเฟอร์ 74LS244

โดยจะมีรูปแบบวงจร ดังภาพประกอบ 4-10

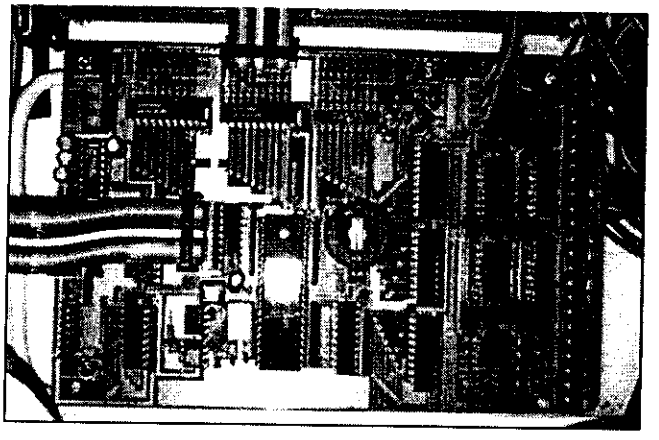


ภาพประกอบ 4-10 วงจรอินพุต (แสดงเพียง 1 ช่องสัญญาณ)

4.1.2. ส่วนตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic controller)

เมื่อผ่านส่วนอินพุตของระบบแล้ว สัญญาณอินพุตต่างๆ จะถูกป้อนเข้าตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกเพื่อใช้ในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ ดังนั้นส่วนนี้จึงเปรียบเสมือนหัวใจของการควบคุมและประมวลผล ในส่วนนี้จะประกอบด้วยส่วนย่อยๆ ดังนี้

- บอร์ดควบคุม

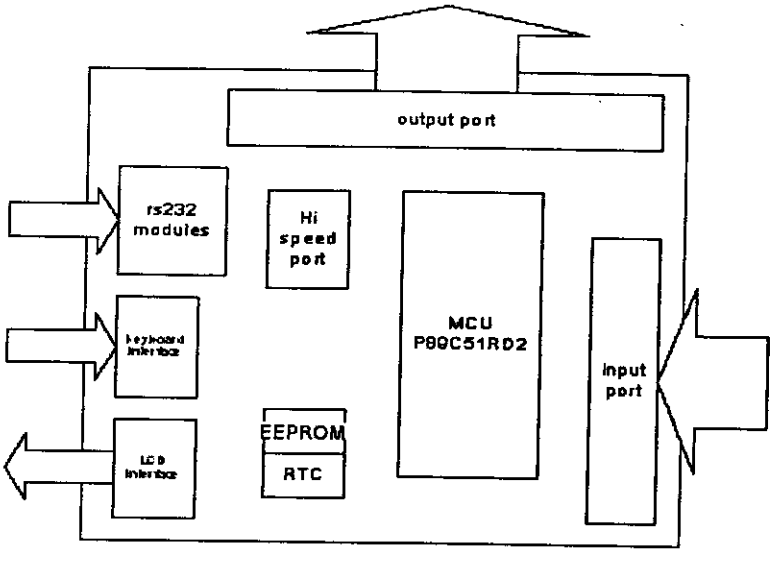


ภาพประกอบ 4-11 รูปบอร์ดควบคุมที่ใช้งาน

คือบอร์ดควบคุมที่มีหน้าที่ประมวลผลและส่งเข้าหรือรับสัญญาณมาจัดการ โดยในส่วนนี้เป็นส่วนหลักที่สำคัญที่สุดและบนบอร์ดนี้จะประกอบไปด้วยวงจรสนับสนุนการทำงานอื่นๆที่ช่วย

การทำงานของซีพียูอีกด้วย เช่น วงจรติดต่อพอร์ตอนุกรม, วงจรแลทช์สำหรับคีย์บอร์ด และที่สำคัญในวงจรนี้จะใช้ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ Phillips P89C51RD2 ซึ่งมีลักษณะพอสังเขปดังนี้

- มีโครงสร้างและชุดคำสั่งเหมือนกันกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-51
- มีหน่วยความจำ flash EEPROM ขนาด 64 กิโลไบต์ สามารถโปรแกรมผ่านพอร์ตอนุกรมได้
- มีหน่วยความจำแบบแรม 8 บิต ขนาด 64 กิโลไบต์
- 6 clock ต่อ 1 machine cycle
- ความเร็วสูงถึง 20 MHz (ประสิทธิภาพเทียบเท่า 40 MHz)
- มี พอร์ตขนาน 8 บิต 4 พอร์ต
- พอร์ตสามารถซิงค์ (sink) กระแสได้ 20 มิลลิแอมป์และใช้เป็นเอาต์พุตขับจอ LCD ได้มีพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรม 1 ช่องสัญญาณ (UART) แบบฟูลดูเพล็ก (full duplex)
- สามารถโปรแกรมข้อมูล เพื่อป้องกันการอ่านเขียนได้ 2 ระดับ
- มีวงจรนาฬิกาและวงจรนับขนาด 16 บิตจำนวน 2 ชุด
- มีสัญญาณอินเตอร์รัปต์(interrupt) 7 แหล่งแบ่งระดับความสำคัญได้ 4 ระดับ
- มีวงจรเปรียบเทียบสัญญาณอนาลอก (analog comparator) อินพุต 1 ช่องสัญญาณ
- มีระบบประหยัดพลังงาน
- มีรีจิสเตอร์ DPTR ชุดที่ 2



ภาพประกอบ 4-12 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเสริมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์บนบอร์ดควบคุม

การทำงานของโปรแกรมการควบคุมด้วยฟัซซี่ลอจิกในบอร์ดควบคุมนี้ จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการหาตำแหน่งเริ่มต้น (origin) และส่วนตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก โดยในแต่ละส่วน สามารถแสดงการทำงานได้ดังนี้

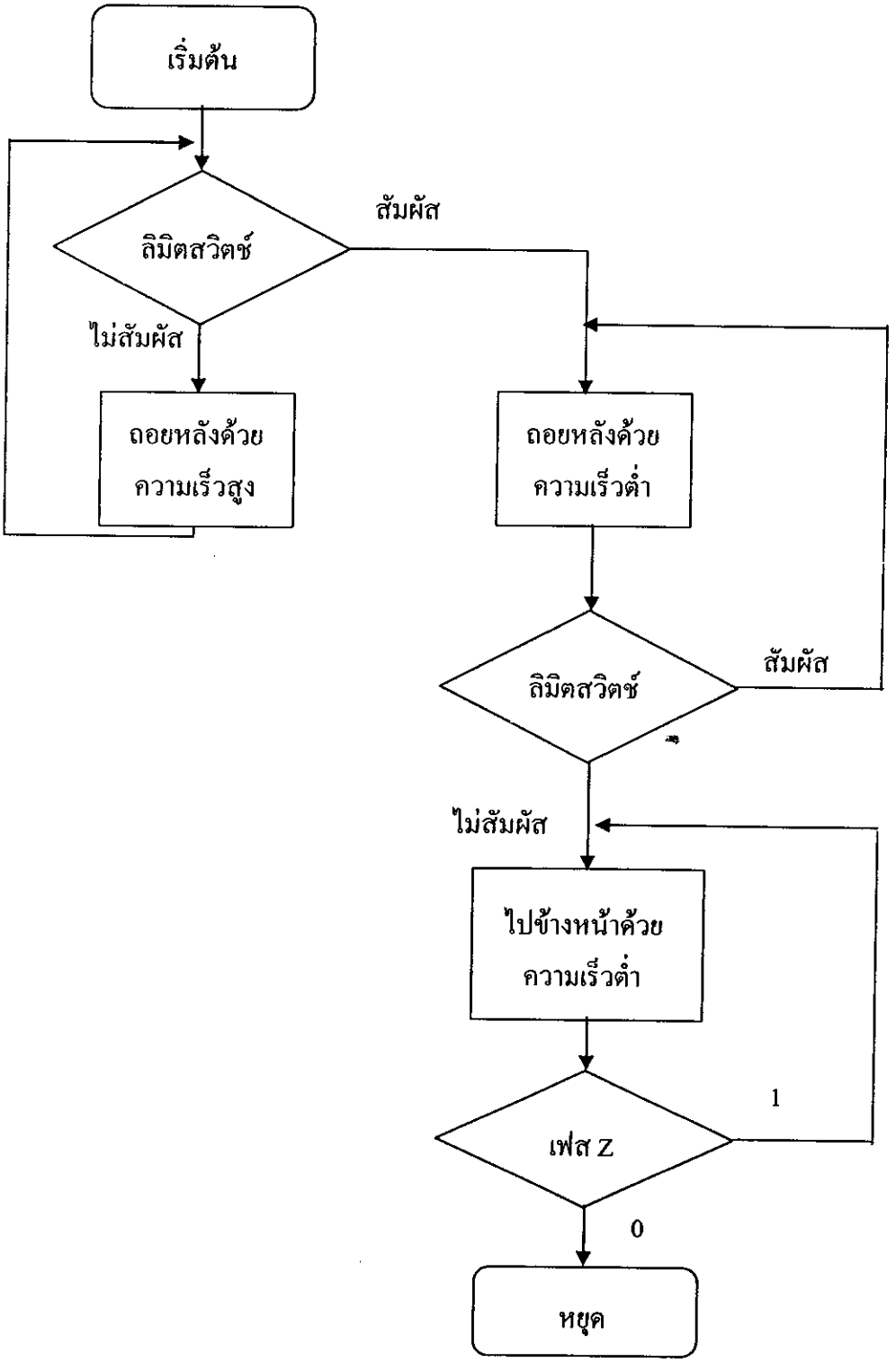
-ส่วนการหาตำแหน่งเริ่มต้น

ในการใช้งานชุดวัดระยะนั้น ระยะทางในการเคลื่อนที่ของตัววัดระยะ จะวัดจากตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งตำแหน่งนี้ จะใช้ในการอ้างอิงถึงระยะในการเคลื่อนที่ และใช้ในการลบค่าความผิดพลาด (error) ในการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยตำแหน่งเริ่มต้นนี้เป็นตำแหน่งที่มีอยู่จริงในระยะการเคลื่อนที่ และการเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเริ่มต้นนั้น ตัววัดระยะจะต้องหยุดอยู่ที่ตำแหน่งนี้ทุกครั้ง

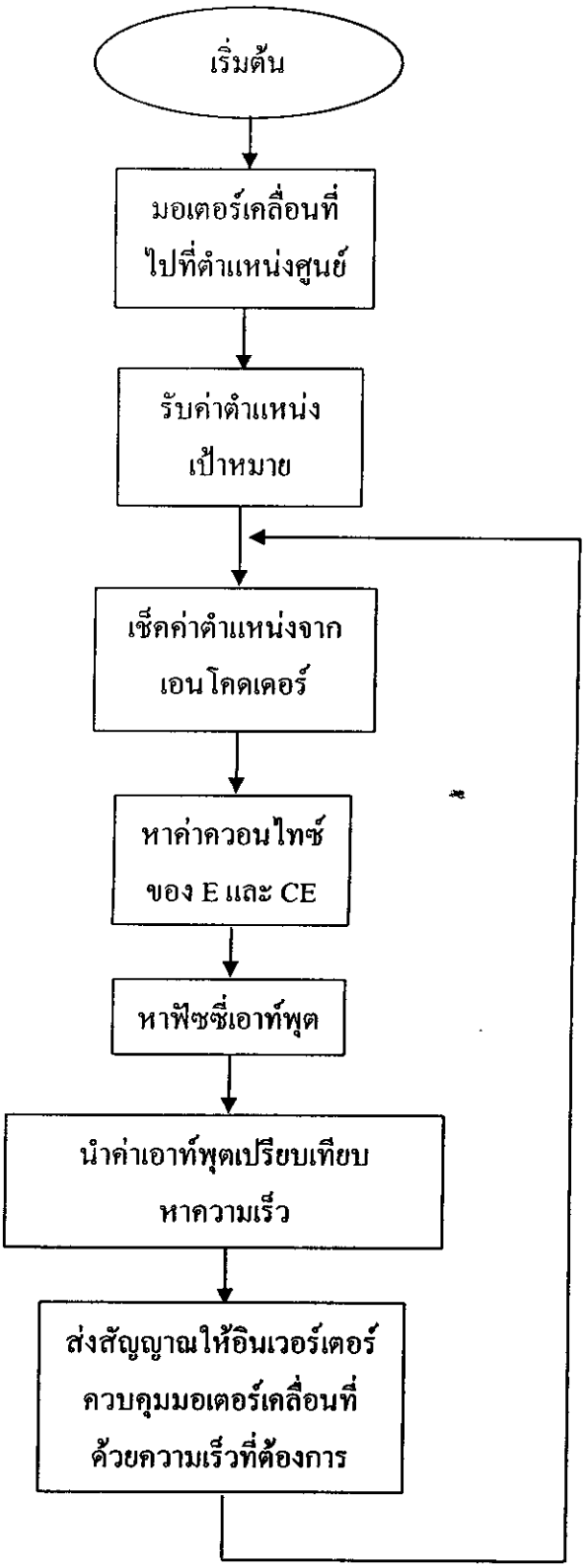
ในการที่จะตรวจหาตำแหน่งเริ่มต้นนั้น จะใช้ลิมิตสวิตช์ในการกำหนดตำแหน่ง ซึ่งจะยึดไว้กับส่วนที่อยู่นิ่ง โดยจะใช้พัลซ์ (pulse) อีกเฟส (phase) หนึ่งของโรตารี่เอนโคดเดอร์ เรียกว่า เฟส Z ที่จะให้พัลซ์ออกมา 1 พัลซ์ ทุกๆ 1 รอบของการหมุน โดยจะติดตั้งลิมิตสวิตช์ บริเวณใกล้ๆกับจุดที่จะเกิดขอบของพัลซ์ของเฟส Z นี้ เมื่อต้องการเข้าหาตำแหน่งเริ่มต้น ตัววัดระยะจะเคลื่อนที่ถอยหลังจนกว่าจะสัมผัสลิมิตสวิตช์ แล้วจึงลดความเร็วและเคลื่อนที่ต่อไปจนกระทั่งลิมิตสวิตช์ไม่ถูกสัมผัสแล้วจึงหยุดและเคลื่อนที่กลับ โดยในการเคลื่อนที่กลับนี้ จะเป็นการเคลื่อนที่กลับไปจนกว่าจะเจอขอบขาลงของเฟส Z จึงสั่งหยุดมอเตอร์ ซึ่งวิธีนี้จะเป็นการหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดทางกลไกของลิมิตสวิตช์ ที่จะทำให้การเข้าหาตำแหน่งเริ่มต้น เกิดความไม่แน่นอนขึ้น และผลลัพธ์ในการใช้งานจะพบว่า ตัววัดระยะจะสามารถหยุดการเคลื่อนที่ได้ตรงตำแหน่งเดิมทุกครั้ง หลักการทำงานของการเข้าหาตำแหน่งเริ่มต้น เป็นดังภาพประกอบ 4-13

-ส่วนตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

การทำงานในส่วนนี้ จะครอบคลุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์หลังจากมอเตอร์เข้าตำแหน่งเริ่มต้นเรียบร้อยแล้ว โดยในการเคลื่อนที่นี้ จะใช้การควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกตลอดการเคลื่อนที่ตั้งแต่เริ่มออกจากจุดเริ่มต้น จนกระทั่งเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ เราสามารถอธิบายโปรแกรมส่วนตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกได้ดังโฟลว์ชาร์ตในภาพประกอบ 4-14 ต่อไปนี้



ภาพประกอบ 4-13 โฟลว์ชาร์ตการเข้าหาตำแหน่งเริ่มต้น

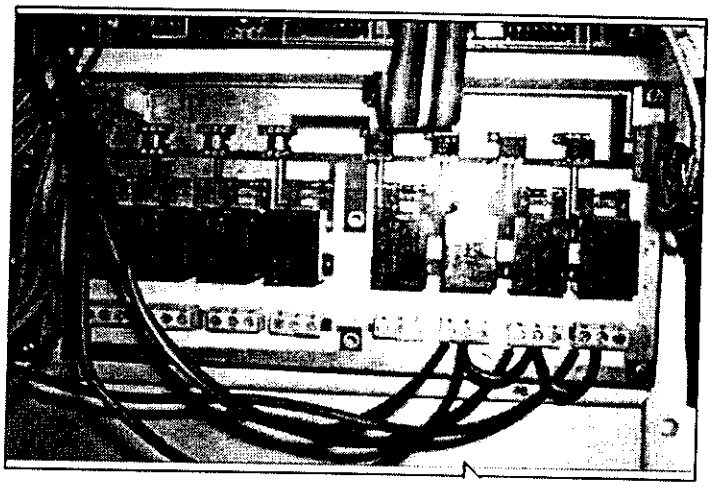


ภาพประกอบ 4-14 โฟล์วชาร์ตแสดงการทำงานของโปรแกรมควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ด้วยระบบควบคุมฟัซซี่ลอจิก

4.1.3 ส่วนเอาท์พุต (output part)

ส่วนเอาท์พุตเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณจากส่วนควบคุมเพื่อส่งสัญญาณออกไปยังอุปกรณ์ภายนอก โดยในส่วนนี้จะประกอบด้วยบอร์ดเอาท์พุตและตัวอินเวอร์เตอร์ กล่าวคือบอร์ดเอาท์พุตจะส่งสัญญาณในรูปแบบดิจิตอลออกไปยังตัวอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมมอเตอร์ต่อไป เราสามารถแสดงรายละเอียดในส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

- **บอร์ดเอาท์พุต**

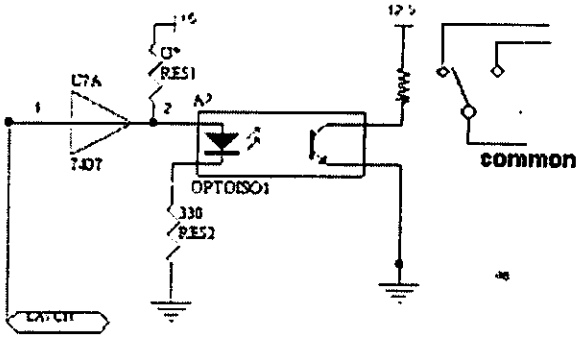


ภาพประกอบ 4-15 บอร์ดวงจรเอาท์พุต

เป็นบอร์ดที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอก โดยจะใช้รีเลย์ (relay) เป็นตัวตัดต่อไฟแรงสูง และจะมีออปโตไอโซเลเตอร์ (opto-isolator) คั่นระหว่างวงจรควบคุม และวงจรรีเลย์ เพื่อใช้ในการป้องกันความเสียหายของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ที่อาจได้รับจากการมีแรงดันย้อนกลับ เนื่องจากการยุบตัวของสนามแม่เหล็กของรีเลย์อย่างรุนแรงและรวดเร็ว ซึ่งมีส่วนประกอบ ดังนี้

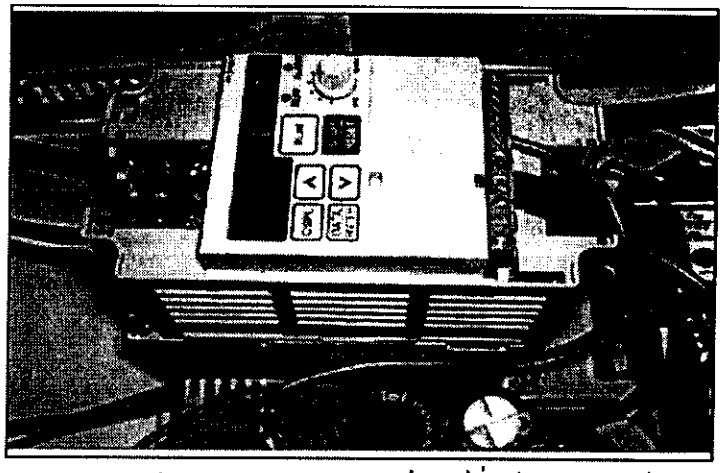
1. แลทช์ ใช้ไอซี เบอร์ 74LS373 เพื่อเป็นตัวค้างค่าข้อมูลไว้ในกรณีที่ไม่ต้องการให้ข้อมูลภายนอกเปลี่ยนแปลง
2. บัฟเฟอร์ ใช้ ไอซีบัฟเฟอร์ เบอร์ 74LS07 มีหน้าที่ขับกระแส
3. ออปโตไอโซเลเตอร์ ใช้เบอร์ 4N37 ทำหน้าที่ในการแยกกราวด์ของเอาต์พุต กับของบอร์ดควบคุม
4. รีเลย์ มีหน้าที่เสมือนสวิตช์ตัดไฟ 220 โวลต์

เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการจะส่งสัญญาณออกไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอก จะต้องมีการอีนาเบิลแลทช์ เสียก่อนและให้แล็ทช์ นั้นเข้าสู่โหมดการเปลี่ยนสัญญาณได้ แล้วจากนั้นจึงส่งสัญญาณออกมาทางบัสข้อมูลซึ่งจะได้รับการขยายขนาดกระแสโดยบัฟเฟอร์ IC 74LS07 จากนั้นสัญญาณที่ได้จะเข้ามากระตุ้นออปโตไอโซเลเตอร์ให้ส่งสัญญาณไปยังอีกฟากหนึ่งของวงจรโดยที่การส่งสัญญาณนั้น ใช้แสงเป็นตัวกลาง กราวด์ของวงจรควบคุม และวงจรรีเลย์ จึงไม่ต่อกัน หลังจากนั้นสัญญาณจะเข้าสู่วงจรสวิตช์รีเลย์ ซึ่งส่วนนี้จะติดต่อกับไฟกระแสสลับ 220 โวลต์ ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกันโดยจะให้มีฟิวส์ใส่อยู่ด้วย และยังมีไดโอดเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแส และแรงดันกระชากเนื่องจากการขุบตัวของสนามแม่เหล็กของรีเลย์



ภาพประกอบ 4-16 วงจรเอาต์พุต (แสดงเพียง 1 ช่องสัญญาณ)

- **อินเวอร์เตอร์ (inverter)**

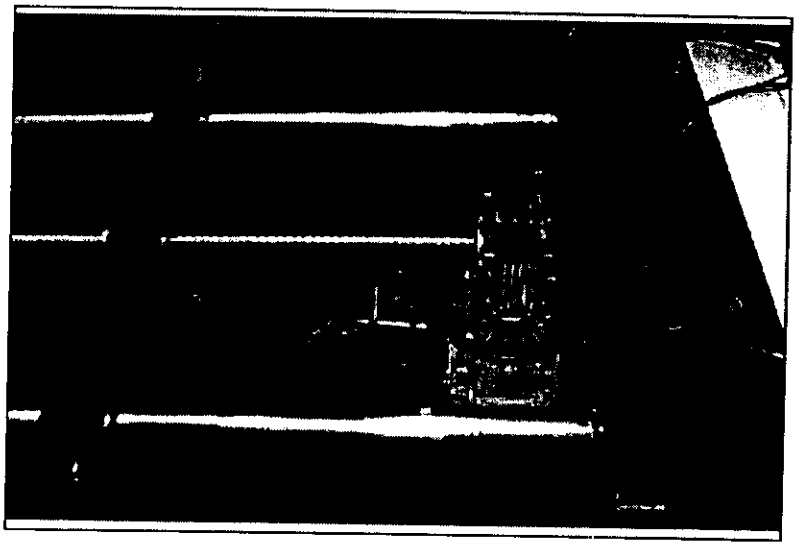


ภาพประกอบ 4-17 อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับมอเตอร์

ในการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC motor) นั้น มีรูปแบบหลายวิธี แต่ในงานที่ต้องการควบคุมความเร็ว, กำลัง, อัตราเร่งให้มีความแม่นยำสูงนั้น จะใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุม เนื่องจากสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้อย่างครบถ้วน ง่าย มีการแสดงผลชัดเจน และราคาไม่สูงมากนัก ในงานพัฒนาชุดวัดระยะนี้จะใช้อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Yaskawa mini J7 Series แสดงผลเป็นตัวเลข สามารถควบคุมความเร็วแบบดิจิตอล และอนาลอก สามารถตั้งความเร็วได้หลายระดับ และการควบคุมนั้น เราสามารถควบคุมผ่านแผงหน้าปัดได้โดยตรง หรือจะควบคุมผ่านวงจรภายนอกก็ได้ โดยจะใช้รีเลย์ในการควบคุมขาสัญญาณเพื่อสั่งงานอินเวอร์เตอร์ให้ขับมอเตอร์ที่ความเร็วต่างๆ ตามที่ได้กำหนดค่าเริ่มต้นเอาไว้

ในการควบคุมตำแหน่งของตัววัดระยะ นั้น จะใช้วงจรควบคุมอินเวอร์เตอร์ เพื่อขับมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้ตัววัดระยะเคลื่อน และในขณะเดียวกันก็อ่านค่าจากโรตารี่เอนโคดเดอร์ และทุกๆ สเตป ที่ได้จากโรตารี่เอนโคดเดอร์ จะเท่ากับระยะการเคลื่อนที่ 25 ไมครอน และในการคำนวณระยะทางก็จะนำระยะนี้มาเพิ่ม หรือลดจากค่าตำแหน่งปัจจุบันก็ขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ เมื่อเริ่มเคลื่อนที่ จะควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้ขับมอเตอร์ที่ความเร็วสูงแต่อัตราเร่งต่ำ และเมื่อเข้าใกล้จุดหมายก็ลดความเร็วมอเตอร์ลงมาอยู่ในระดับต่ำมาก และหยุดเมื่อถึงจุดหมายแล้ว และในการเข้าถึงจุดหมายทุกครั้ง จะเข้าถึงจุดหมายในทิศทางเดียว คือทิศทางเข้าหาแนวตัด เพราะการตัดแต่ละครั้งจะป้อนแผ่นโลหะทางด้านหน้าจนมาชนกับตัววัดระยะ ซึ่งแรงกระแทกจะทำให้เกิดการเลื่อนตัวกลับ ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดขึ้น ดังนั้นการเข้าถึงจุดหมายในทางเดียวจะเป็นการทำให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงกระแทกจากแผ่นโลหะ ตำแหน่งจึงมีความถูกต้องมากขึ้น

กลไกของชุดวัดระยะนั้นไม่มีความซับซ้อนมากนัก โดยจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำส่งกำลังเข้าสู่ชุดเฟืองทดที่มีอัตราทดเท่ากับ 1:7.5 เพื่อลดความเร็วและเพิ่มทอร์กในการหมุนของบอลสกรู และเนื่องจากบอลสกรูมีระยะพิทช์ (pitch) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อบอลสกรู หมุนครบ 1 รอบ จะทำให้ตัววัดระยะ เลื่อนไปได้ 10 มิลลิเมตร และในขณะเดียวกัน วงจรก็อ่านค่าจากโรตารี่เอนโคดเดอร์ได้ 400 สเตป เช่นกัน เราจึงสามารถคำนวณได้ว่า ทุกๆ 1 สเตป ที่อ่านได้จากโรตารี่เอนโคดเดอร์ จะเท่ากับการเคลื่อนที่ของตัววัดระยะ ในทุกๆ 10 มิลลิเมตร/400 = 25 ไมครอนนั่นเอง ดังนั้นระยะอ้างอิงของชุดวัดระยะ นี้คือ 25 ไมครอน



ภาพประกอบ 4-18 มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ และระบบขับเคลื่อน

4.2 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก

ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึง วิธีการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่ใช้สำหรับการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ในเครื่องพับและตัดเหล็ก โดยนำค่าที่ได้จากการปรับตัวควบคุมในระบบจำลองมาใช้ในการออกแบบ เพื่อสร้างตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่จะนำมาใช้ในระบบควบคุมจริง

โครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกประกอบด้วย ฟัซซิฟิเคชัน การอนุมาน และการดีฟัซซิฟิเคชัน โดยตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกที่ใช้จะมีโครงสร้างเป็นแบบแมมดานิ (mamdani) ที่มีตัวแปรอินพุต 2 ตัว คือ ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (E) และค่าการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (CE) โดยมีตัวแปรเอาท์พุตเป็นความถี่ที่กำหนดให้กับตัวอินเวอร์เตอร์ (f) ตัวแปรต่างๆ เหล่านี้จะถูกนำไปออกแบบกฎการควบคุมฟัซซี่ลอจิก โดยใช้ทูลบอกซ์ฟัซซี่ลอจิกในโปรแกรม MATLAB และจำลองการทำงานระบบ เพื่อปรับค่าตัวแปรต่างๆ ในตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด และนำค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้มาทำการออกแบบ เพื่อเขียนโปรแกรมควบคุมต่อไป

ในการออกแบบตัวควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์โดยใช้หลักการฟัซซี่ลอจิก ได้ทำการออกแบบดังนี้

4.2.1 การฟัซซิฟิเคชันของอินพุต เป็นการหาอินพุตของระบบ หาช่วงฟัซซี่ของอินพุตและทำการสร้างระดับความเป็นสมาชิกที่เป็นไปได้

อินพุตของระบบควบคุมนี้ ประกอบด้วยอินพุต 2 ตัว ได้แก่

1. ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (error,E) ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าตำแหน่งเป้าหมายกับตำแหน่งที่เคลื่อนที่จริงของมอเตอร์

   error(E) = S_m^*(target position) - S_m (motor position) (4.1)

2. ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง (change of error,CE) ซึ่งหาได้จากความแตก ต่างระหว่างค่าความผิดพลาดของตำแหน่งล่าสุด (lated error) กับค่าความผิดพลาดของตำแหน่งก่อนหน้านั้น (previous error)

   change of error (CE) = E_l (lated error)-E_p(previous error) (4.2)

ในการหาช่วงฟัซซี่ของอินพุตนั้น ได้มาจากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้ทูลบอกซ์ฟัซซี่ลอจิกในโปรแกรม MATLAB เป็นเกณฑ์ในขั้นต้น จากนั้นได้ทำการปรับปรุงค่าเพิ่มเติมจนได้ค่าที่เหมาะสมกับระบบจริง ซึ่งช่วงฟัซซี่ของอินพุตที่เหมาะสมกับระบบควบคุมนี้ มีค่าช่วงฟัซซี่ของตัวแปร E คือ (-21, 21) และค่าช่วงฟัซซี่ของตัวแปร CE คือ (-0.6, 0.6) โดยตัวแปรทางอินพุตทั้งสองตัวนี้ ต้องนำมาผ่านขั้นตอนของการฟัซซิฟิเคชันในรูปของฟัซซี่ของอินพุต โดยการเปรียบเทียบค่าตัวแปรทางอินพุตกับตาราง 4-1 ซึ่งเป็นค่าควอนไทซ์ (quantized value) ที่กำหนดขึ้น ทำให้สามารถลดจำนวนของอินพุตที่จะนำมาทำฟัซซิฟิเคชันได้

ตาราง 4-1 ค่าควอนไทซ์ของ E ของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์

error position (E, mm.)	quantized value
E>21	5
16<E<=21	4
8<E<=16	3
4<E<=8	2
1<E<=4	1
-1<E<=1	0
-4<=E<-1	-1
-8<=E<-4	-2
-16<=E<-8	-3
-21<=E<-16	-4
E<-21	-5

ตาราง 4-2 ค่าควอนไทซ์ของ CE ของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์

change of error position (CE,mm.)	quantized value
CE>=0.6	6
0.5<=CE<=0.6	5
0.4<=CE<=0.5	4
0.3<=CE<=0.4	3
0.2<=CE<=0.3	2
0.1<=CE<=0.2	1
-0.1<=CE<0.1	0
-0.2<=CE<-0.1	-1
-0.3<=CE<-0.2	-2
-0.4<=CE<-0.3	-3
-0.5<=CE<-0.4	-4
-0.6<=CE<-0.5	-5
CE<-0.6	-6

4.2.2 การกำหนดตัวแปรเอาท์พุตฟัซซี่ หาช่วงฟัซซี่ของเอาท์พุตและการสร้างระดับความเป็นสมาชิกที่เป็นไปได้ในแต่ละช่วง

ตัวแปรเอาท์พุตฟัซซี่ของระบบควบคุมนี้ คือ ความถี่ (f) ซึ่งเป็นค่าที่ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกทำการคำนวณออกมา และส่งไปยังอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วตามที่ต้องการไปยังตำแหน่งเป้าหมายต่อไป โดยเราสามารถหาช่วงฟัซซี่ของเอาท์พุตและค่าจุดศูนย์ถ่วง (assigned value) ของเอาท์พุตฟัซซี่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้ทูลบอกซ์ฟัซซี่ลอจิกในโปรแกรม MATLAB เป็นเกณฑ์ในขั้นต้นเช่นเดียวกับตัวแปรทางอินพุต จากนั้นจึงทำการปรับปรุงค่าเพิ่มเติม เพื่อให้เหมาะสมกับระบบควบคุมจริง โดยค่าจุดศูนย์ถ่วงที่เหมาะสมกับระบบแสดงในตาราง 4-3

ตาราง 4-3 ค่าจุดศูนย์ถ่วง (assigned value) ของเอาท์พุตฟัซซี่ของระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์

output fuzzy set	assigned value
NB	-0.8

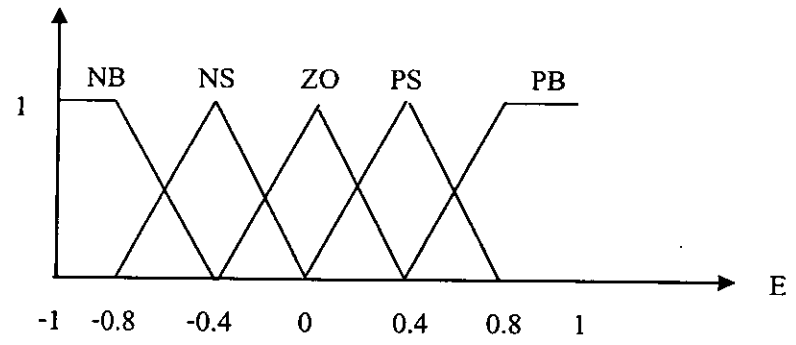
output fuzzy set	assigned value
NS	-0.4
ZO	0
PS	0.4
PB	0.8

4.2.3 การกำหนดขอบเขตเชิงภาษา (fuzzy linguistic) และการกำหนดค่าความเป็นสมาชิก (grade of membership function)

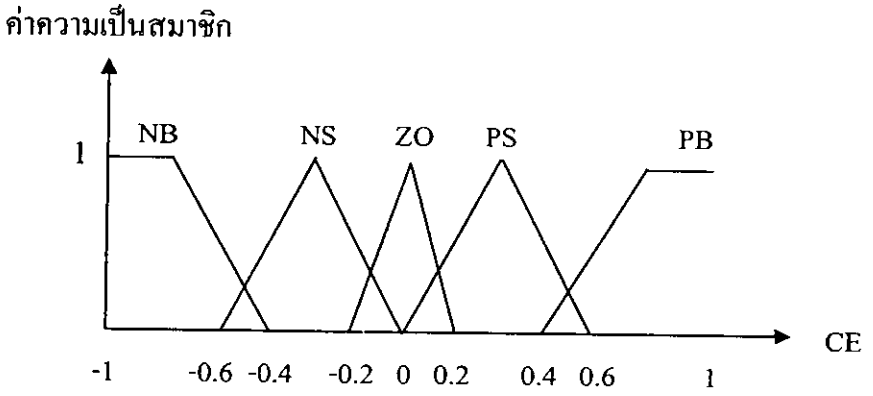
ในการกำหนดขอบเขตเชิงภาษาของตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาท์พุต รวมถึงกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของ fuzzy subset นั้น ได้ทำการออกแบบผ่านการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้ทูลบอกซ์ฟัซซี่ลอจิกในโปรแกรม MATLAB โดยจากการออกแบบเราสามารถกำหนดได้เป็น 5 ฟัซซี่เซต

- Negative Big (NB)
- Negative Small (NS)
- Zero (ZO)
- Positive Small (PS)
- Positive Big (PB)

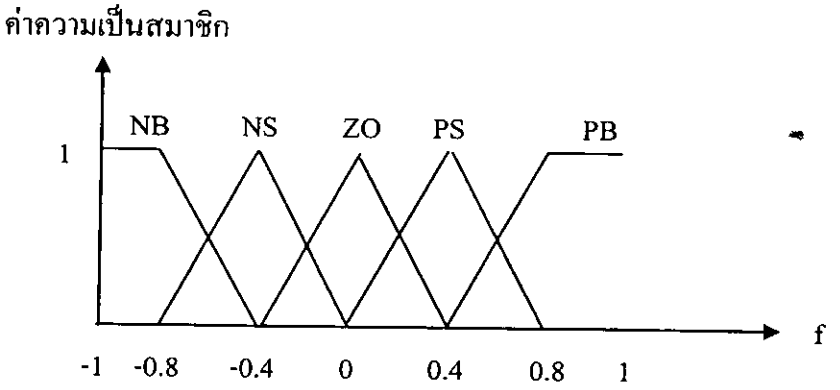
โดยการกำหนดรูปร่างฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุตทั้งสองตัวและเอาท์พุต ดังนี้



ภาพประกอบ 4-19 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุต E



ภาพประกอบ 4-20 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุต CE



ภาพประกอบ 4-21 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเอาท์พุตฟัซซี่ f

4.2.4 การสร้างเงื่อนไขหรือกฎการควบคุม

ขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้างเงื่อนไขหรือกฎการควบคุม เพื่อนำมาใช้ในการควบคุมของตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก ให้สามารถควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ได้ตามต้องการ โดยกฎการควบคุมนี้จะเป็นส่วนในการกำหนดให้ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกทำการควบคุม เมื่อมอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ที่ไม่ตรงกับตำแหน่งเป้าหมาย โดยค่าเอาท์พุตฟัซซี่นี้ จะถูกนำไปกำหนดค่าความเร็วให้กับมอเตอร์ต่อไป โดยค่าเอาท์พุตฟัซซี่นี้ จะขึ้นอยู่กับค่าอินพุตทั้งสองตัวที่เปลี่ยนแปลงไปตามตาราง 4-4

ตารางที่ 4-4 กฎการควบคุมฟัซซี่

CE \ E	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZO
NS	NB	NB	NS	NS	PS
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
PS	NS	ZO	PS	PS	PB
PB	ZO	PS	PB	PB	PB

จากตาราง 4-4 เป็นกฎการควบคุมฟัซซี่ลอจิกสำหรับควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ที่มีตัวแปรภาษาเป็นสื่อแทนความหมาย โดยตัวอย่างตัวแปรภาษาที่ใช้เป็นกฎควบคุม เป็นดังนี้

If (E) is NB AND (CE) is NB THEN (f) is NB

เมื่อตัวแปร E, CE และ f เป็นตัวแปรภาษาโดยมี E และ CE เป็นตัวแปรอินพุตที่แทนค่าของความผิดพลาดของตำแหน่งและค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งตามลำดับ สำหรับ f เป็นตัวแปรเอาท์พุตที่แทนค่าของความถี่ที่กำหนดให้อินเวอร์เตอร์ ส่วนNB เป็นค่าของตัวแปร E, CE และ f ตามลำดับ ส่วนการอนุมานกฎการควบคุมของตัวแปรอินพุตและเอาท์พุตนั้น เลือกการอนุมานแบบใช้ค่าต่ำสุด (minimum) ในการคำนวณผลลัพธ์รวมของฟัซซี่

4.2.5 การดีฟัซซิฟิเคชันของเอาท์พุต และการกำหนดวิธีการรวมผลของฟัซซี่

เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของค่าเอาท์พุตแล้ว จะเห็นว่าในแต่ละอินพุตจะได้ค่าเอาท์พุตฟัซซี่ออกมาหลายค่า จึงต้องหาค่าที่แม่นตรงเพียงค่าเดียว เพื่อให้ได้ค่าเอาท์พุตที่แท้จริงของตัวควบคุม ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีการหาค่าศูนย์กลางเพื่อหาค่าแซนทรอยด์ โดยหาได้จากสูตร

$$Y = \sum_{n=1}^{n} (\mu_n * Y_n) / \sum \mu_n \qquad (4.3)$$

เมื่อ Y คือ Crisp Output

μ คือ Membership Function

n คือ Number of Membership = 1,2,3,...

เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในทุก ๆ กรณีที่สามารถเกิดขึ้นได้ โดยใช้เงื่อนไขตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น จะได้ผลลัพธ์เอาท์พุตเป็นดังตาราง 4-5

ตาราง 4-5 ค่าเอาท์พุตทั้งหมดของทุกกรณีที่เกิดขึ้นในระบบควบคุม

CE / E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-5	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.4	-0.4	-0.3	0	0	0
-4	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.4	-0.4	-0.3	0	0	0
-3	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.6	-0.3	-0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
-2	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.4	-0.2	0	0.4	0.4	0.4	0.4
-1	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.6	-0.6	-0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6
0	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.4	-0.4	0	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.9
1	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.4	-0.4	0.3	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.9
2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.9
3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0	0.1	0.6	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9
4	0	0	0	0.3	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
5	0	0	0	0.3	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

4.2.6 การเปรียบเทียบค่าเอาท์พุตที่หาได้

จากตาราง 4-5 เป็นค่าความเร็วที่ต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไป เนื่องจากเมื่อทำการดีฟัซซิฟิเคชันเสร็จแล้ว จะได้ผลลัพธ์ในรูปเอาท์พุต แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ได้โดยตรง จึงต้องทำการเปรียบเทียบค่าเอาท์พุตที่หาได้ในตาราง 4-5 เป็นค่าความเร็วที่ต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนที่ โดยการนำเอาท์พุตไปเปรียบเทียบกับค่าในตาราง 4-6 เพื่อหาค่าความเร็วที่กำหนดให้มอเตอร์

ตาราง 4-6 ค่าความสัมพันธ์ของเอาท์พุตกับค่าความเร็วที่กำหนดให้กับมอเตอร์

เอาท์พุต	ค่าความเร็วที่กำหนด
[0.81,1.00]	90
[0.61,0.80]	60
[0.51,0.60]	6

เอาท์พุต	ค่าความเร็วที่กำหนด
[0.31,0.50]	4
[0.01,0.30]	2
0	0
[-0.30,-0.01]	-2
[-0.50,-0.31]	-4
[-0.60,-0.51]	-6
[-0.80,-0.61]	-60
[-1.00,-0.81]	-90

เมื่อได้ค่าความเร็วที่กำหนดให้กับมอเตอร์แล้ว ให้นำค่าที่ได้ ส่งไปยังตัวอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมมอเตอร์ให้เคลื่อนที่เข้าตำแหน่งเป้าหมายด้วยความเร็วตามที่ต้องการต่อไป