สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หยิบวัตถุบนพื้นด้วยกล้องวีดีโอ

PICKING OBJECT WITH V.D.O. CAMERA

โดย

นายวุฒิกร สายสงเคราะห์

นายเอกกมล พิทักษ์ดำรงกิจ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 42503
วัน, เดือน, ปี 24 พ.ค. 2545

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีกาศึกษา 2543

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หยิบวัตถุบนพื้นด้วยกล้องวีดีโอ

ผู้จัดทำ

1. นาย วุฒิกร สายสงเคราะห์
2. นาย เอกกมล พิทักษ์ดำรงกิจ

.....อาจารยที่ปรึกษา

(อ. สุมิตร พนาอุดมทรัพย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หยิบวัตถุบนพื้นด้วยกล้องวีดีโอ

นาย วุฒิกร สายสงเคราะห์
นาย เอกกมล พิทักษ์ดำรงกิจ
อ. สุมิตร พนาอุดมทรัพย์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นผลงานทางด้านวิศวกรรมระบบควบคุมทางด้านแขนกล พัฒนาขึ้นเพื่อให้เกิดประโยชน์ทางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เพื่อช่วยในการหยิบวัตถุบนพื้นระนาบแทนที่การใช้แรงงานคน แขนกลนี้เป็นแขนกลที่มีข้อต่อทั้งหมด 5 ข้อต่อ สร้างขึ้นจากพลาสติกซึ่งมีความแข็งแรงและทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี ที่ข้อต่อแต่ละข้อของแขนกลจะมีมอเตอร์ดีซีติดอยู่และมีกล้องวีดีโอที่มีพอร์ทยูเอสบี(USB Port)ที่ใช้กับคอมพิวเตอร์ทั่วไปเป็นเซ็นเซอร์ในการจับภาพวัตถุนิ่งที่อยู่บนพื้นระนาบ กล้องวีดีโอจะจับภาพนิ่งไว้ในไฟล์เจพีจี(.JPG) แล้วใช้โปรแกรมภาษาปาสคาลในการเปิดไฟล์ภาพและสแกนหาตำแหน่งวัตถุ เมื่อโปรแกรมสามารถหาตำแหน่งวัตถุได้แล้ว จะส่งสัญญาณผ่านบอร์ดอินเตอร์เฟสไปยังวงจรขับมอเตอร์เพื่อทำการขับมอเตอร์ดีซีที่อยู่ตามแต่ละข้อของแขนกลไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PICKING OBJECT WITH VIDEO CAMERA

Vuthikorn Saisongcroh

Ekkamol Pitakdumrongkit

Sumitr Panaudomsub Advisor

2000

Abstract

This thesis we'd like to present is "A Mechanical Arm with V.D.O. Camera as A Detector" project.This mechanical arm can be used in industry for picking object on horizental floor instead of human arm.It has 5 axis and is made of strong and endurable plastic.At each joint of the axis,it is attached with a DC motor.The V.D.O. camera will capture the still object on the floor and the picture will be saved in JPG file.The pascal program will open the file and scan the position of the object. After knowing the position of the object, the data will be sent to the interface board , which will forward to the drive motor circuit that will move the arm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หัวข้อเรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 ความรู้พื้นฐานด้านแขนกล	2
2.1.1 Robotic Manipulations	2
2.1.2 Direct Kinematics	2
2.1.3 Inverse Kinematics	4
2.1.4 Robot Visions	6
2.2 หลักการและทฤษฎีของมอเตอร์ดีซี	7
2.2.1 ชนิดของมอเตอร์ดีซีแบ่งตามลักษณะการกระตุ้น	7
2.2.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ	8
2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับและกระแส	9
2.2.4 สมการเอาท์พุทของอาร์เมเจอร์	11
2.2.5 ทอร์ก(Torque)	12
2.2.6 สมการของทอร์ก(Torque Equation)	12
2.2.7 สมการของความเร็วรอบ	14
2.2.8 ความสามารถในการปรับกระแสได้เองตามขนาดของโหลด	14
2.2.9 ความสามรถในการเร่งหรือหน่วงความเร็วรอบ	14
2.3 ระบบเซอร์โวและวงจรขับมอเตอร์	19
2.3.1 ระบบคอนโทรล	16
2.3.2 ระบบเซอร์โว	17
2.3.3 ระบบคอนโทรลมอเตอร์	18
2.3.4 พื้นฐานของระบบคอนโทรลดีซีมอเตอร์	20
2.3.5 ระบบคอนโทรลตำแหน่งการเคลื่อนที่(Position Control System)	21
2.3.6 บล็อคไดอะแกรมและทรานสเฟอร์ฟังชั่นของระบบเซอร์โว	22
2.3.7 บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลตำแหน่งมุม	23
2.3.8 บล็อคไดอะแกรมของพาวเวอร์แอมปลิไฟเออร์	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หัวข้อเรื่อง	หน้า
2.3.9 บล็อคไดอะแกรมของดีซีเซอร์โวมอเตอร์	24
2.3.10 บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลความเร็วรอบ	25
2.3.11 บล็อคไดอะแกรมของตัววัดรอบความเร็ว	26
2.3.12 บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลทอร์ก	28
2.3.13 การวิเคราะห์ลูปคอนโทรลจากบล็อคไดอะแกรมของทรานสเฟอร์ฟังชั่น	29
2.3.14 ระบบเซอร์โวที่สมบูรณ์	30
2.3.15 การชดเชยในระบบคอนโทรลตำแหน่ง	31
บทที่ 3 โครงสร้างและการออกแบบ	34
3.1 โครงสร้างและอุปกรณ์เชิงกล	34
3.1.1 การออกแบบ	34
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้	34
3.2 วงจรขับมอเตอร์	52
3.3 บอร์ดอินเตอร์เฟส	54
3.4 กล้องวีดีโอ(เซนเซอร์)	55
3.5 การโปรแกรม	55
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	58
4.1 การทดลอง	58
4.1.1 การเชื่อมต่อและการติดตั้งอุปกรณ์	58
4.1.2 การทดลอง	59
4.2 ผลการทดลอง	59
ภาคผนวก	68
ผ1. ลักษณะทั่วไปและการใช้งาน ET – DIO CARD	69
ผ2. โปรแกรมตัวอย่างของบอร์ด EX-STEPM	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หัวข้อเรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
รูปที่ 1.1 บล็อคไดอะแกรม	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
รูปที่ 2.1 Link-Coordinate	3
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างอิมเมจที่กล้องสแกนได้	6
รูปที่ 2.3 มอเตอร์คอมปาวด์แบบคิวมูเลทีฟ	8
รูปที่ 2.4 มอเตอร์คอมปาวด์แบบดิฟเฟอเรนเชียล	8
รูปที่ 2.5 ทิศทางแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ	8
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับในวงจรอาร์มาเจอร์	10
รูปที่ 2.7 โมเมนต์ซึ่งลวดอาร์มาเจอร์กระทำรอบจุดศูนย์กลาง	12
รูปที่ 2.8 ขบวนการที่จะคอนโทรล	16
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างระบบคอนโทรลแบบลูปเปิด	16
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างระบบคอนโทรลแบบลูปปิด	17
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างแขนหุ่นยนต์ที่มีดีซีเซอร์โวมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนในแต่ละข้อต่อและโปรแกรมได้ด้วยไมโครโปรเซสเซอร์	19
รูปที่ 2.12 หุ่นยนต์สำหรับใช่ในการวิจัยและอุตสาหกรรมขนาดเบา	19
รูปที่ 2.13 ระบบการคอนโทรลดีซีมอเตอร์แบบพื้นฐาน	20
รูปที่ 2.14 บล็อคไดอะแกรมของระบบเซอร์โวที่ทำให้ง่ายขึ้น	22
รูปที่ 2.15 บล็อคไดอะแกรมลูปการคอนโทรลตำแหน่งมุม	23
รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลย์ดีซีเซอร์โว	24
รูปที่ 2.17 บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลความเร็วรอบ	25
รูปที่ 2.18 วงจรการวัดความเร็วรอบ	26
รูปที่ 2.19 บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลความเร็วรอบ	27
รูปที่ 2.20บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลทอร์ก	28
รูปที่ 2.21 บล็อคไดอะแกรมของระบบเซอร์โวที่ประกอบด้วยลูปการป้อนกลับของตำแหน่ง ลูปการป้อนกลับของความเร็ว และลูปการป้อนกลับของกระแส	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หัวข้อเรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.39 บล็อคไดอะแกรมของระบบเซอร์โวเพื่อการคอนโทรลตำแหน่งหมุน	30
บทที่ 3 โครงสร้างและการออกแบบ	
รูปที่ 3.1 ชิ้นส่วนฐานล่าง	37
รูปที่ 3.2 ชิ้นส่วนฐานบน	38
รูปที่ 3.3 แผ่นรองรับเพลาขับ	39
รูปที่ 3.4 ชิ้นส่วนหัวไหล่	40
รูปที่ 3.5 ชิ้นส่วนแขน	41
รูปที่ 3.6 ชิ้นส่วนข้อมือ	42
รูปที่ 3.7 ชิ้นส่วนมือจับ	43
รูปที่ 3.8 เฟือง	44
รูปที่ 3.9 แกนหมุนส่วนล่าง	45
รูปที่ 3.10 ชิ้นส่วนแกนหมุน	46
รูปที่ 3.11 การประกอบหัวไหล่	47
รูปที่ 3.12 การประกอบแขน	48
รูปที่ 3.13 การประกอบมือ	49
รูปที่ 3.14 การประกอบฐานและเพลาขับ	50
รูปที่ 3.15 แขนกล	51
รูปที่ 3.16 แผงวงจรของบอร์ด EX-STEPM	52
รูปที่ 3.17 ส่วนของวงจรขับมอเตอร์บนบอร์ด EX-STEPM	53
รูป 3.18 แผงวงจรของบอร์ด EX-STEPM (Schemetics)	54
รูปที่ 3.19 แผงวงจรของบอร์ด ET-PCDIO	55
รูปที่ 3.20 ขาต่างๆของพอร์ทเอาท์พุทของบอร์ดอินเตอร์เฟส ET-PCDIO	56
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
รูปที่ 4.1 ภาพตัวอย่างแสดงภาพวัตถุที่อยู่ระยะใกล้	60
รูปที่ 4.1 ภาพตัวอย่างแสดงภาพวัตถุที่อยู่ระยะกลาง	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หัวข้อเรื่อง **หน้า**

รูปที่ 4.1 ภาพตัวอย่างแสดงภาพวัตถุที่อยู่ระยะไกล 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

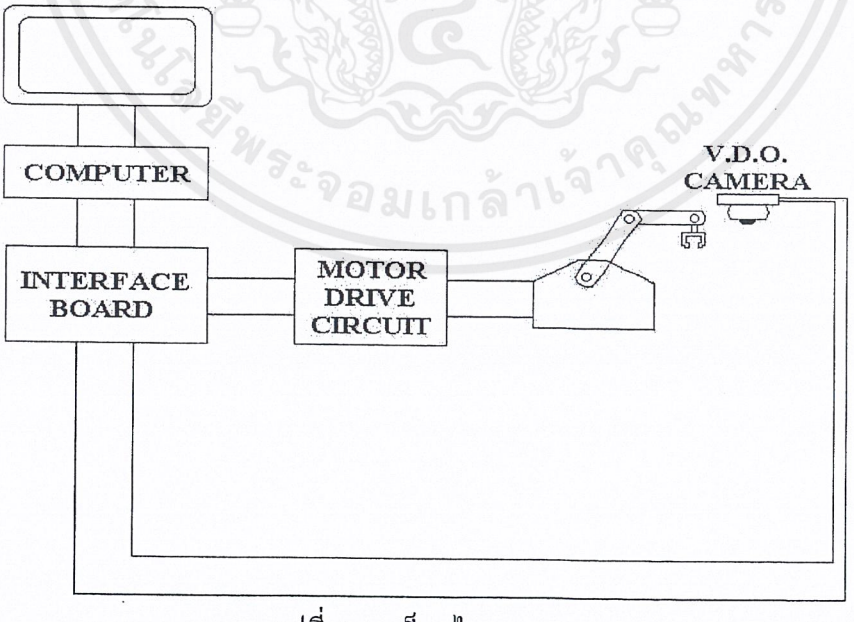
บทที่1

บทนำ

ในปัจจุบันในประเทศไทยได้พัฒนาภาคอุตสาหกรรมขึ้นอย่างกว้างขวาง เทคโนโลยีจึงจำเป็นต้องนำมาใช้เพื่อพัฒนางานอุตสาหกรรมให้เกิดความสะดวกสบายและปลอดภัยยิ่งขึ้น

ปริญญานิพนธ์ชิ้นนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อประโยชน์ในการใช้แขนกลในการหยิบวัตถุบนพื้นโดยมีกล้องวีดีโอเป็นเซนเซอร์ในการจับภาพวัตถุ เพื่อความสะดวกในงานอุตสาหกรรมแทนการที่ต้องใช้แรงงานคนในการหยิบหรือคัดเลือกสินค้าอุตสาหกรรม รวมทั้งประโยชน์ในการหยิบวัตถุที่มนุษย์ไม่สามารถใช้มือในการหยิบได้ เช่น วัตถุที่เป็นอันตรายต่อ
ผิวหนัง เป็นต้น

แขนกลนี้มีแนวความคิดมาจากแขนกล 5 แกน(ข้อต่อ) ประกอบด้วยแกนต่างๆดังนี้ ฐาน(Base) หัวไหล่(Shoulder) ข้อศอก(Elbow) ข้อมือ(Tool pitch) และมือจับ(Tool Tip) โดยอาศัยทฤษฎีจากวิชา Robotics Analysis&Control เพื่อใช้ในการศึกษาองค์ประกอบ วิธีควบคุม และวิธีตรวจจับภาพวัตถุ โดยใช้กล้องวีดีโอเป็นเซนเซอร์สแกนภาพวัตถุในพื้นที่ที่กำหนดแล้วส่งอิมเมจที่ได้ให้กับคอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ คอมพิวเตอร์จะประมวลผลตามโปรแกรมปาสคาลแล้วส่งสัญญาณให้การ์ดอินเตอร์เฟสเพื่อส่งสัญญาณควบคุมแบบดิจิตอลให้วงจรขับมอเตอร์ จากนั้นวงจรขับมอเตอร์จะส่งสัญญาณต่อให้ดีซีมอเตอร์เพื่อขับข้อต่อในแต่ละข้อเพื่อหมุนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ



รูปที่ 1.1 บล็อคไดอะแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

1. ความรู้พื้นฐานด้านแขนกล

ในส่วนของ Robotics นี้เราจะใช้ทฤษฎี Robotics เบื้องต้นซึ่งประกอบด้วยหัวข้อต่างๆ ดังนี้

1.1 Robotic Manipulation

จะนำทฤษฎีในส่วนของคุณสมบัติของโรบอต (Robot Specifications) อันได้แก่ Repeatability, Precision, Accuracy โดยจะทำการทดลองและวัดค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวนี้ออกมาเพื่อเป็นการบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของ Robot ที่เราประดิษฐ์ขึ้น

Repeatability – ความแม่นยำของโรบอต (Robot) เมื่อให้โรบอต เคลื่อนที่กลับไปมาระหว่างจุดที่กำหนดกับจุดเริ่มต้น (โดยวัดค่าผิดพลาดไปเท่าใดจากจุดที่กำหนด)

Precision – ความละเอียดในการเคลื่อนที่ของ Robot ในระยะทางน้อยที่สุดที่จะเคลื่อนที่ได้

Accuracy – ความแม่นยำของโรบอต ในการเคลื่อนที่ไปยังจุดที่กำหนด (โดยวัดว่าผิดพลาดไปเท่าใดจากจุดที่กำหนด)

1.2 Direct Kinematic

เป็นทฤษฎีเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของ โรบอต โดยกำหนดว่าในแต่ละข้อของแขนกลหมุนไปเป็นมุมเท่าใด แล้วหาว่าจุดปลายมือจับ (tool tip) จะไปหยุดที่ตำแหน่งใด

เริ่มจากการหาสมการการหมุน โดยอาศัยความรู้พื้นฐานเรื่อง Dot Product

$$X \cdot Y = |X||Y|\cos\theta$$

กำหนดให้แกน f เป็นแกนที่อยู่นิ่งกับที่ (fix link) และให้แกน m เป็นแกนหมุน (mobile link) โดยแกน m หมุนรอบแกน f เป็นมุม ϕ จะได้สมการการหมุนดังนี้

$$R_1(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}$$ เมื่อหมุนรอบแกน f_1 (แกน x)

$$R_2(\phi) = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix}$$ เมื่อหมุนรอบแกน f_2 (แกน y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_3(\phi) = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$ เมื่อหมุนรอบแกน f_3 (แกน z)

เมื่อได้สมการการหมุนแล้วเราจะนำสมการนี้มาแทนในเมตริกซ์ตัวแปลง (Translation Matrix)

$$T = \left[\begin{array}{c|c} R & p \\ \hline \eta^T & \sigma \end{array}\right]$$

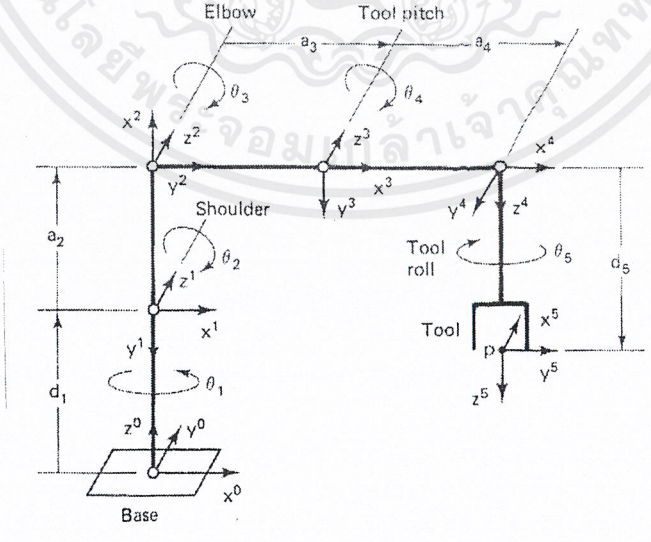
R - Rotation

P - Translation

η^T - Perspective

σ - Scale

ซึ่งแขนกลของเราเป็นลักษณะ 5 แกน (5-axis) โดยเขียน link coordinate และตารางค่าพารามิเตอร์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 Link – Coordinate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 Kinematic Parameters ของแขนกล

AXIS	θ	d	a	α	Home
1	θ_1	d_1	0	$-\pi/2$	0
2	θ_2	0	a_2	0	0
3	θ_3	0	a_3	0	0
4	θ_4	0	a_4	$-\pi/2$	$-\pi/2$
5	θ_5	d_5	0	0	0

โดยสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล (Arm Equation) เขียนได้จาก link coordinate tranformation

$$T^{k}_{k-1} = \begin{bmatrix} c\theta_k & -c\alpha_k s\theta_k & s\alpha_k s\theta_k & a_k c\theta_k \\ s\theta_k & c\alpha_k c\theta_k & -s\alpha_k c\theta_k & a_k s\theta_k \\ 0 & s\alpha_k & c\alpha_k & d_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางข้างต้น จะได้สมการเคลื่อนที่ของแขนกลดังนี้

$$\left[\begin{array}{ccc:c} C_1C_{234}C_5 + S_1S_5 & -C_1C_{234}S_5 + S_1C_5 & -C_1S_{234} & C_1(a_2C_2 + a_3C_{23} + a_4C_{234} - d_5S_{234}) \\ S_1C_{234}C_5 - C_1S_5 & -S_1C_{234}S_5 - C_1C_5 & -S_1S_{234} & S_1(a_2C_2 + a_3C_{23} + a_4C_{234} - d_5S_{234}) \\ -S_{234}C_5 & S_{234}S_5 & -C_{234} & d_1 - a_2S_2 - a_3S_{23} - a_4S_{234} - d_5C_{234} \\ \hdashline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right]$$

1.3 Inverse Kinematic

เป็นทฤษฎีที่มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากจะนำทฤษฎีนี้มาประยุกต์ในการเขียนโปรแกรมควบคุมแขนกล Inverse Kinematics เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของ Robot เช่นกัน แต่คราวนี้จะกำหนดจุดที่ต้องการที่จะให้ปลายแขนเคลื่อนที่ไปแล้วใช้หลักการจากทฤษฎีนี้ในการหาขบวนการให้แขนเคลื่อนที่ไปยังจุดที่กำหนด (ก็คือหาว่าแต่ละข้อต้องหมุนไปเป็นมุม

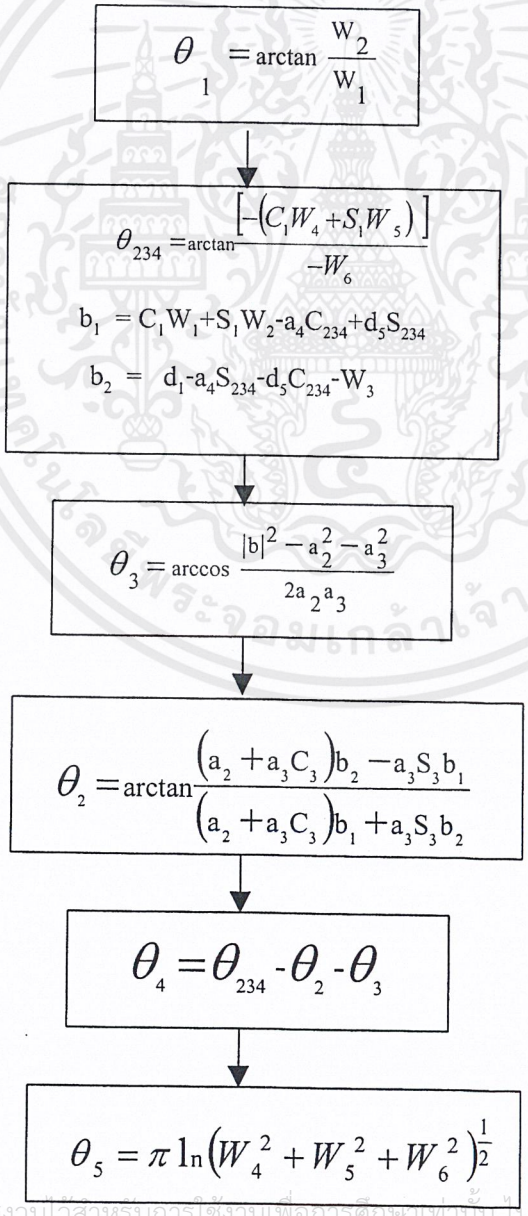
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่าใดนั่นเอง) เราจะกำหนดเวคเตอร์ w (Tool – Configuration Vector) เพื่อใช้ในการกำหนดตำแหน่งเป้าหมายสุดท้ายของแขนกล ซึ่งเวคเตอร์ w เขียนได้ดังนี้

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ \cdots\cdots \\ W_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \exp(q_n/\pi)r^3 \end{bmatrix}$$

หรือ $W = [\, p_1, p_2, p_3, 0, 0 - \exp(q_4/\pi)\,]^T$

จากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้น Inverse Kinematic ของแขนกล 5 แกนนี้สามารถเขียนเป็น Flow Chart ได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 Robot Visions

เป็นทฤษฎีเกี่ยวกับเซนเซอร์ (กล้องวีดีโอ) หรือ การจับภาพโดยใช้เซนเซอร์ของแขนกล ซึ่งจะออกมาในรูปของ อิมเมจ (image) เราจะนำอิมเมจที่ได้มาเขียนในรูปของ Chain code หรือ Run-length code เพื่อสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป

```
00000000000000000000000000000000
00011111100000001111111000000000
00011111111111111111111111000000000
00011111111111111111111111000000000
```

1 – สีดำ (วัตถุ)

0 – สีขาว (พื้น)

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างอิมเมจที่กล้องสแกนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หลักการและทฤษฎีของมอเตอร์ดีซี

มอเตอร์ คือ อุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล และมอเตอร์ซึ่งขับเคลื่อนด้วยกระแสไฟฟ้าดีซีนี้เรียกว่า มอเตอร์ดีซี และที่ขับเคลื่อนด้วยกระแสไฟเอซีเรียกว่า มอเตอร์เอซี นอกจากนั้นยังมีมอเตอร์ขนาดเล็กซึ่งอาจขับเคลื่อนได้ทั้งกระแสไฟดีซีหรือเอซี ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ดีซี จะตรงข้ามกับกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีซีโดยสิ้นเชิง แต่สำหรับโครงสร้างแล้วจะเหมือนกันทุกประการจึงสามารถนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีซีมาใช้ทำหน้าที่ของมอเตอร์
ดีซีได้

2.2.1 <u>ชนิดของมอเตอร์ดีซีแบ่งตามลักษณะการกระตุ้น</u>

การแบ่งชนิดของมอเตอร์ดีซีตามลักษณะการกระตุ้นจะเหมือนกับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีซี โดยแบ่งออกเป็น 2 ชนิดดังนี้

1. มอเตอร์ดีซีแบบกระตุ้นแยก
2. มอเตอร์ดีซีแบบกระตุ้นตัวเอง
   - มอเตอร์ดีซีแบบชันต์
   - มอเตอร์ดีซีแบบซีรี
   - มอเตอร์ดีซีแบบคอมปาวด์

มอเตอร์ดีซีแบบกระตุ้นแยกนั้น กระแสที่ป้อนให้ชุดขดลวดสนามและขดลวดอาร์มจะมาจากแหล่งจ่ายไฟดีซีซึ่งแยกชุดกัน ส่วนแบบกระตุ้นตัวเองนั้นจะมาจากแหล่งจ่ายจ่ายไฟดีซีชุดเดียวกัน กรณีที่ต้องการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ดีซี โดยการปรับระดับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะใช้มอเตอร์ดีซีแบบกระตุ้นแยกเป็นกรณีพิเศษเท่านั้น แต่โดยทั่วไปจะใช้แบบกระตุ้นตัวเองเป็นส่วนมาก สำหรับลักษณะการต่อวงจรของมอเตอร์ดีซีแบบซีรี แบบชันต์ และแบบคอมปาวด์นั้น จะเหมือนกับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีซี

อนึ่งสำหรับการต่อวงจรภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีซีแบบคอมปาวด์นั้นจะมี 2 ลักษณะด้วยกันคือ ต่อในลักษณะที่ให้แอมแปร์เทอร์จากขดลวดสนามแบบชันต์เสริมหรือหักล้างกับขดลวดสนามแบบซีรี มอเตอร์ซึ่งต่อในลักษณะแรกนี้เรียกว่า มอเตอร์คอมปาวด์แบบคิวมูเลทีฟ และแบบหลังเรียกว่าแบบดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) (ข)

รูปที่ 2.3 มอเตอร์คอมปาวด์แบบดิวมูเลทีฟ

รูปที่ 2.3 (ก) และ (ข) แสดงทิศทางของ MMF จากขดลวดสนามแบบชันต์และขดลวดสนามแบบซีรีของมอเตอร์คอมปาวด์แบบดิวมูเลทีฟ ส่วนรูปที่ 2.4 (ก) และ (ข) แสดงทิศทางของกรณีดิฟเฟอเรนเชียล

(ก) (ข)

รูปที่ 2.4 มอเตอร์คอมปาวด์แบบดิฟเฟอเรนเชียล

2.2.2 <u>แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ</u>

เมื่อมอเตอร์ดีซีหมุน ลวดตัวนำแต่ละเส้นซึ่งมีกระแสไหลผ่านจะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กใหญ่ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นมาจำนวนหนึ่งในทิศทางที่สวนกับทิศทางของกระแสที่ป้อนให้กับมอเตอร์ ลองพิจารณาทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับดังรูปที่ 2.5

(ก) ทิศทางแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับของอามาเจอร์ (ข) ทิศทางกระแสของอามาเจอร์

รูปที่ 2.5 ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้เส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กใหญ่ และการหมุนของขดลวดมีทิศทาดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) ขณะนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นในขดลวดตัวนำ C_1 และ C_2 จะมีทิศพุ่งเข้า (×) และพุ่งออก (•) ตามลำดับ แต่การที่ลวดตัวนำจะยังคงหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาได้นั้น จากกฎมือซ้าย กระแสที่ไหลในเส้นลวดตัวนำ C_1 และ C_2 จะต้องมีทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข) เท่านั้น นั่นคือมีทิศทางของกระแสที่ตรงข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าในรูปที่ 2.5 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นในรูปที่ 2.5 (ก) สำหรับกรณีมอเตอร์เท่านั้นที่เรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับเกิดจากการที่ลวดตัวนำหมุนตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กใหญ่ ในทำนองเดียวกับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีซี จึงมีสมการเหมือนกับกรณีหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นได้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนี้

$$E_{b'} = p\Phi \times \frac{n}{60} \times \frac{Z_c}{a} \qquad (2\text{-}2\text{-}1)$$

จากสมการที่ (2-2-1) เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับแปรผันโดยตรงกับจำนวนรอบหมุนของมอเตอร์ ดังนั้นในกรณีที่มอเตอร์ยังไม่เริ่มหมุน (n = 0) แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับจะมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย กำหนดมอเตอร์ดีซีขนาด 4 kW 200 V ความต้านทานภายในของอาร์มาเจอร์ 0.5 Ω ถ้าป้อนไฟดีซีจากแหล่งจ่ายขนาด 200 V ให้กับมอเตอร์ในสภาพที่หยุดหมุน จะเห็นว่ากระแสจะไหลในขดอาร์มาเจอร์ทันทีถึง 400 A(200/0.5) แต่เนื่องจากกระแสที่ไหลในขดอาร์มาเจอร์ แม้ที่ตำแหน่งโหลดเต็มที่จะมีขนาดน้อยกว่านี้มากประมาณ 25 A เป็นอย่างสูง การที่กระแสซึ่งไหลในขดอาร์มาเจอร์ขณะที่มอเตอร์หมุนด้วยขนาดของกระแสเพียง 25 A ได้นั้น เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับทิศที่เกิดขึ้นนี้พยายามต้านการจ่ายกระแสจากแหล่งจ่ายจ่ายไฟดีซี

2.2.3 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับและกระแส</u>

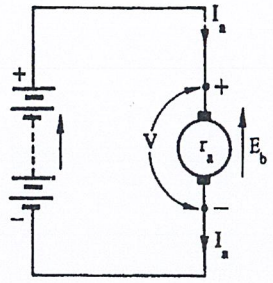
เมื่อกำหนดให้ V คือ แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟดีซี ระหว่างคู่แปรงถ่าน

E_b คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ

r_a คือ ความต้านทานภายในทั้งหมดในวงจรของอาร์มาเจอร์

I_a คือ กระแสอาร์มาเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับในวงจรอาร์มาเจอร์

จากรูปที่ 2.6 จะได้ว่า

$$I_a = \frac{V - E_b}{r_a} \qquad (2\text{-}2\text{-}2)$$

หรือ $V = E_b + I_a r_a$

$$E_b = V - I_a r_a \qquad (2\text{-}2\text{-}3)$$

กรณีที่มอเตอร์ทำงานที่โหลดเต็มที่แรงดันตกคร่อม $I_a r_a$ จะมีค่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของ V ขณะที่มอเตอร์หยุดหมุน เนื่องจาก Eb = 0 จะได้

$$E_b = \frac{V}{r_a} \qquad (2\text{-}2\text{-}4)$$

โดยที่ I_s คือ กระแสตอนเริ่มเดินเครื่องมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

จากสมการที่ (2-2-2) และ (2-2-4) สามารถอธิบายได้ว่า ขณะที่มอเตอร์ยังไม่เริ่มหมุน เมื่อป้อนไฟดีซีจะมีกระแส $I_s = V/r_a$ จำนวนมากไหลในขดอาร์มาเจอร์ มอเตอร์จะหยุดหมุนด้วยความเร็วรอบสูงในทันที ทำให้ E_b มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว กระแสในอาร์มาเจอร์จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าคงที่ในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 สมการเอาต์พุตของอาร์มาเจอร์

จากสมการที่ (2-2-3) ได้ว่า

$$V = E_b + I_a r_a \qquad (V)$$

หรือ $$E_b = V - I_a r_a \qquad (V)$$

เมื่อคูณ I_a ตลอดจะได้

$$VI_a = E_b I_a + I_a^2 r_a \qquad (W)$$

หรือ $$E_b I_a = VI_a + I_a^2 r_a \qquad (W)$$

โดยที่ VI_a คือ กำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตที่ป้อนให้กับอาร์มาเจอร์

$I_a^2 r_a$ คือ การสูญเสียจากลวดตัวนำในอาร์มาเจอร์

เมื่อหัก $I_a^2 r_a$ ออกจาก VI_a จะเหลือ $E_b I_a$ ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าส่วนที่เปลี่ยนไปเป็นกำลังกลภายในอาร์มาเจอร์ กำหนดให้เป็น P_{ar} ดังนั้นจะได้

$$\boxed{P_{ar} = E_b I_a} \qquad (2\text{-}2\text{-}5)$$

กำลังกล (P_{ar}) บางส่วนจะสูญเสียไปในรูปของการสูญเสียทางกล และการสูญเสียในแกนเหล็กจึงไม่สามารถปรากฏออกมาให้เห็นได้หมด จากสมการที่ (2-2-1)

$$Eb = \frac{p}{a} \times \frac{n}{60} \times Z_c \times \Phi \qquad (V)$$

เนื่องจากมอเตอร์ซึ่งสร้างสำเร็จรูป นอกจาก n และ Φ แล้วค่าอื่นๆ คือ p/a, Z_c มีค่าคงที่หมด จึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\boxed{E_b = Kn\Phi} \qquad (2\text{-}2\text{-}6)$$

โดยที่ $$K = \frac{p}{a} \times \frac{Z_c}{60}$$

เมื่อคูณ I_a ตลอดจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_b I_a = Kn\Phi I_a = P_{ar} \qquad (2\text{-}2\text{-}7)$$

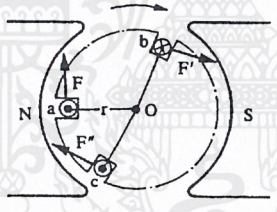
2.2.5 <u>ทอร์ก(Torque)</u>

รูปที่ 2.7 แสดงแรงที่กระทำบนลวดตัวนำ (a) ซึ่งห่างจากจุดศูนย์กลาง (O) เป็นระยะ r (หน่วยเป็นเมตร) ในทิศทางสัมผัสกับเส้นรอบวงของแกนเหล็กอาร์มาเจอร์ ที่ตำแหน่งนี้กำหนดให้มีค่าเป็น F นิวตัน ดังนั้นแรงที่กระทำบนลวดตัวนำนี้จะมีโมเมนต์เท่ากับ F×r ซึ่งจะพยายามขับเคลื่อนแกนเหล็กอาร์มาเจอร์ให้หมุนเคลื่อนที่ไป แต่เนื่องจากในแกนเหล็กอาร์มาเจอร์มีสล็อตเป็นจำนวนมาก แต่ละสล็อตก็มีลวดตัวนำจำนวนมากเช่นกัน ดังนั้นแรงที่กระทำบนลวดตัวนำทั้งหมดจะมีโมเมนต์ซึ่งพยายามขับเคลื่อนแกนเหล็กให้หมุนไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อรวมโมเมนต์ย่อยทั้งหมดนี้เข้าด้วยกัน จะได้ผลรวมของโมเมนต์ ดังนี้

$$T_a = (Fr + F'r + F''+ \ldots)$$

โดยที่ T_a คือ ทอร์กที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น m-N

ดังนั้นทอร์ก คือ ผลรวมของโมเมนต์ของแรงที่กระทำต่อลวดตัวนำรอบจุดศูนย์กลาง



รูปที่ 2.7 โมเมนต์ซึ่งลวดตัวนำอาร์มาเจอร์กระทำรอบจุดศูนย์กลาง

2.2.6 <u>สมการของทอร์ก (Torque Equation)</u>

จากรูปที่ 2.7 กำลังกล P_a ของลวดตัวนำ (a) ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับผลคูณแรงระหว่าง (F) มีหน่วยเป็นนิวตันกับระยะทาง $(2\pi r)(n/60)$ มีหน่วยเป็นเมตร ซึ่งเป็นระยะทางที่ลวดตัวนำ (a) เคลื่อนที่ไปในแนวแรงในช่วงเวลา 1 วินาที ดังนั้นจะได้

$$P_a = 2.\pi r \times \frac{n}{60} \times F$$

$$= 2.\pi \times \frac{n}{60} \times Fr \qquad (W)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจาก $2\pi n/60 = \omega$ ซึ่งเป็นความเร็วเชิงมุม (rad/sec) และ Fr คือ โมเมนต์ของแรง (F) รอบจุดศูนย์กลาง (O) จะได้

$$P_a = \omega Fr \qquad (W)$$

ดังนั้นผลรวมของกำลังกลที่เกิดขึ้น (P_{ar}) ของลวดตัวนำทั้งหมดจะมีค่าดังสมการคือ

$$\begin{aligned} P_{ar} &= P_a + P_b + P_c + \ldots \\ &= (\omega \times Fr) + (\omega \times F'r) + (\omega \times F''r) + \ldots \\ &= \omega(Fr + F'r + F''r + \ldots) \end{aligned}$$

ดังนั้น $$P_{ar} = \omega T_a \qquad (W)$$

และจากสมการที่ (2-2-7) ได้ว่า

$$Kn\Phi I_a = P_{ar}$$

ดังนั้น $$Kn\Phi I_a = \omega T_a$$

เมื่อแทนค่า K และ ω ($K = \frac{p}{a} \times \frac{Z_c}{60}, \omega = 2\pi \frac{n}{60}$)

$$n \frac{p}{a} \times \frac{Z_c}{60} \times \Phi I_a = 2\pi \left(\frac{n}{60}\right) I_a$$

$$\boxed{Ta = \frac{1}{2\pi} \times \frac{p}{a} \times Z_c \times \Phi \times I_a} \quad (m\text{-}n) \qquad (2\text{-}2\text{-}8)$$

$$= K'\Phi I_a = (m\text{-}n)$$

$$K' = \frac{1}{2\pi} \times \frac{p}{a} Z_c$$

นั่นคือ ทอร์กของมอเตอร์ดีซีจะแปรผันโดยตรงกับผลคูณระหว่างจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กกับกระแสอาร์มาเจอร์ ไม่เพียงแต่มอเตอร์ดีซีเท่านั้น ความสัมพันธ์นี้ยังสามารถใช้ได้กับมอเตอร์เอซีด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 สมการของความเร็วรอบ

จากสมการที่ (2-2-3) และ (2-2-7) จะได้

$$E_b = V - I_a r_a$$

และ $$E_b = K\Phi n$$

$$\therefore \quad n = \frac{E_b}{K\Phi} = \frac{V - I_a r_a}{K\Phi}$$

$$\boxed{n \approx \frac{V}{K\Phi}} \quad \text{(rpm)} \qquad (2\text{-}2\text{-}9)$$

$I_a r_a$ ในสมการนี้ประมาณว่ามีค่าน้อยมาก ซึ่งควรใช้เฉพาะกรณีที่มี I_a หรือกระแสโหลดไม่มากเท่านั้น จะเห็นว่าความเร็วรอบแปรผันโดยตรงกับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ และแปรผกผันกับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก

2.2.8 ความสามารถในการปรับกระแสได้เองตามขนาดของโหลด

เมื่อป้อนแรงดัน V คงที่ให้กับมอเตอร์แบบซีรี และให้ทำงานที่โหลดต่ำๆ มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็วรอบ (n) ค่าหนึ่ง และจะดึงกระแสจากแหล่งจ่ายไฟดีซีด้วยค่า I_a ค่าหนึ่งเนื่องจากกำลังที่ด้านเอาต์พุตของมอเตอร์ในขณะนี้มีน้อย VI_a จึงมีค่าน้อยด้วย นั่นคือกระแส I_a ที่แหล่งจ่ายไฟดีซีจ่ายออกจะต้องมีค่าต่ำด้วย เมื่อให้มอเตอร์ทำงานที่โหลดมากๆ VI_a จะต้องมีค่ามากขึ้น สำหรับกรณีที่แรงดันของแหล่งจ่ายมีค่าคงที่ I_a จำเป็นต้องมีค่ามากขึ้นด้วย นั่นคือเมื่อโหลดน้อยมอเตอร์จะดึงกระแสจากแหล่งจ่ายไฟดีซีน้อย และเมื่อโหลดมากจะดึงกระแสมากขึ้นโดยอัตโนมัติ

2.2.9 ความสามารถในการเร่งหรือหน่วงความเร็วรอบ

ลองพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโหลดทอร์กซึ่งเป็นทอร์กที่โหลดต้องการ กับมอเตอร์ทอร์กซึ่งเป็นทอร์กที่มอเตอร์จ่ายให้กับโหลด เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นจะยกตัวอย่างมอเตอร์ดีซีแบบชันต์ในการอธิบาย การหมุนของมอเตอร์ในขณะที่มีโหลดทางกลนั้น จะเท่ากับการใส่แรงเบรกกระทำต่อแกนของอาร์มาเจอร์ เมื่อโหลดทอร์กสูงขึ้น ก็เท่ากับแรงเบรกที่กระทำต่อแกนอาร์มาเจอร์มีค่ามากขึ้น นั่นคือขณะที่มอเตอร์กำลังหมุนภายใต้โหลดค่าหนึ่งด้วยเสถียรภาพที่ดี ถ้าให้โหลดทอร์กมีค่าสูงขึ้น หรือแรงเบรกที่กระทำมีค่ามากขึ้น จะทำให้เกิดความหน่วงขึ้น ความเร็วรอบ n จะมีค่าลดลง สำหรับกรณีของมอเตอร์แบบชันต์ตราบใดที่แรงดันระหว่างขั้วมีค่าคงที่อาจถือได้ว่า Φมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าไม่เปลี่ยนแปลง (แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากอาร์มาเจอร์รีแอกชันทำให้ Φ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปบ้าง) ดังนั้นถ้าความเร็วรอบน้อยลงแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (E_b) จะมีค่าต่ำลง แต่เนื่องจาก $I_a = (V-E_b)/r_a$ และทอร์ก $(T) = K'\Phi I_a$ มอเตอร์ทอร์กจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเร็วรอบจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งทำให้ทอร์ก T เท่ากับโหลดทอร์กพอดี จากนั้นมอเตอร์จะเริ่มทำงานที่ตำแหน่งใหม่นี้

ในทางตรงกันข้ามถ้าโหลดทอร์กมีค่าน้อยกว่ามอเตอร์ทอร์ก แรงที่หมุนแกนอาร์มาเจอร์จะมากกว่าแรงเบรก ทำให้เกิดความเร่งขึ้นและความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับจะมีค่าเพิ่มขึ้น กระแส $(I_a) = (V-E_b)/r_a$ จะมีค่าน้อยลง ทอร์ก $(T) = K'\Phi I_a$ จะมีค่าลดลง ความเร่งจะน้อยลงจนเป็น 0 เมื่อทอร์กจากมอเตอร์มีค่าเท่ากับโหลดทอร์กพอดีจากนั้นมอเตอร์จะเริ่มทำงานที่ตำแหน่งใหม่นี้ ในการเริ่มเดินมอเตอร์จากสภาพที่หยุดนิ่ง จนกระทั่งหมุนนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (E_b) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จาก $E_b = 0$ ในช่วงแรกสุดนั้นเนื่องจากมีกระแสสูงมาก ทอร์กจากมอเตอร์จะมีค่าสูงกว่าโหลดทอร์กมาก จึงทำให้เกิดความเร่งสูงมาก ความเร็วรอบจะสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งโหลดทอร์กเท่ากับมอเตอร์ทอร์กและความเร็วรอบจะคงที่ โหลดทอร์กจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบ หรือมีค่าคงที่เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนไปหรือไม่นั้นย่อมขึ้นกับคุณสมบัติของโหลด ตัวอย่างเช่น พัดลมนั้นยิ่งหมุนที่ความเร็วรอบสูงขึ้นโหลดทอร์กหรือทอร์กที่โหลดต้องการจะยิ่งมีค่ามากขึ้น ในขณะที่เครื่องกลึงไม่ว่าความเร็วรอบจะเปลี่ยนไปอย่างไรก็ตาม โหลดจะต้องการทอร์กเกือบคงที่โดยตลอด

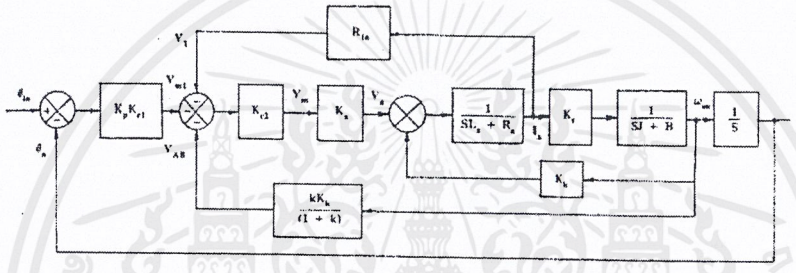
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ระบบเซอร์โวและวงจรขับมอเตอร์

2.3.1 ระบบคอนโทรล

ระบบคอนโทรล คือ ระบบที่อาศัยพื้นฐานการป้อนกลับเพื่อควบคุมให้ได้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่เราต้องการ

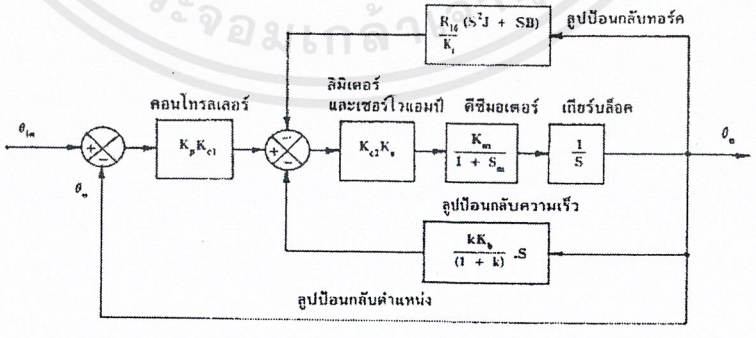
พื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบคอนโทรลกระทำได้โดยอาศัยหลักทฤษฎีระบบลิเนียร์ โดยกำหนดถึงความสัมพันธ์ของอินพุท – เอาพุท ของส่วนประกอบของระบบ ดังนั้นส่วนประกอบของระบบหรือกระบวนการที่เราจะทำการคอนโทรลสามารถแสดงได้ด้วยบล็อคไดอะแกรม ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กระบวนการที่เราจะคอนโทรล

ระบบคอนโทรลแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

ก. ระบบคอนโทรลแบบลูปเปิด คือ ระบบที่มีตัวคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่เราต้องการ ระบบแบบนี้ไม่มีการป้อนกลับแสดงดังในรูปที่ 2.9



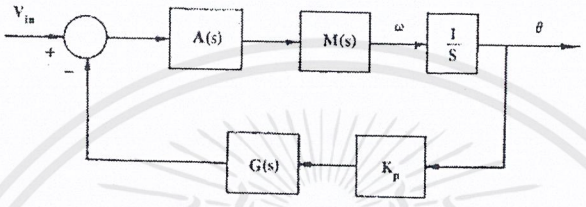
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างระบบคอนโทรลแบบลูปเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ข.ระบบคอนโทรลแบบลูปปิดหรือแบบมีการป้อนกลับ คือ ระบบที่มีการป้อนกลับเอาเอาท์พุทของระบบกลับไปเปรียบเทียบกับอินพุทของระบบจะได้เป็นความแตกต่างหรือเออร์เรอร์ป้อนไปให้ตัวคอนโทรลเลอร์เพื่อไปคอนโทรลระบบหรือกระบวนการให้ได้ผลตอบสนองตามที่เราต้องการ ระบบคอนโทรลป้อนกลับแบบลูปปิดแสดงได้ดังในรูปที่ 2.10

การวิเคราะห์และออกแบบระบบคอนโทรลจะอยู่บนพื้นฐานในแนวความคิดของการป้อนกลับ



รูปที่ 2.10 ระบบคอนโทรลป้อนกลับแบบลูปปิด

2.3.2 ระบบเซอร์โว

ระบบการคอนโทรลเครื่องจักรกลที่มีการทำงานเป็นไดนามิคหมายถึงระบบคอนโทรลที่มีตัวแปรอินพุท r(t) เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังนั้นตามหลักการของระบบคอนโทรลที่มีการป้อนกลับแบบลูปปิดแล้ว การทำงานของระบบเซอร์โวตัวแปรเอาท์พุทของระบบจะติดตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอินพุทไปในเวลาเดียวกัน ซึ่งเราอาจเรียกระบบดังกล่าวได้อย่างหนึ่งว่าเป็นระบบแทรคกิ้งคอนโทรล (tracking control system) หรือระบบโฟลโลอิ้งคอนโทรล (following control system)

1. ระบบการคอนโทรลตำแหน่งเพลาของมอเตอร์, เมื่อ r(t) = $\theta(t)$

2. ระบบการคอนโทรลความเร็วของเพลามอเตอร์, เมื่อ r(t) = $\frac{d\theta(t)}{dt}$ = $\omega(t)$

3. ระบบการคอนโทรลอัตราเร่งของเพลามอเตอร์, เมื่อ r(t) = $\frac{d\omega(t)}{dt}$ = $\alpha(t)$

4. ระบบการคอนโทรลแรงบิดของเพลามอเตอร์, เมื่อ r(t) = $J\frac{d\omega}{dt}$ = $T(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
42503

ระบบเซอร์โวที่ใช้งานทั่วๆ ไปจะประกอบด้วยการคอนโทรลหลายๆ อย่างในระบบเดียวกันคือ ในระบบจะมีทั้งการคอนโทรลตำแหน่งมุม ความเร็ว อัตราเร่งและแรงบิดไปพร้อมๆ กัน

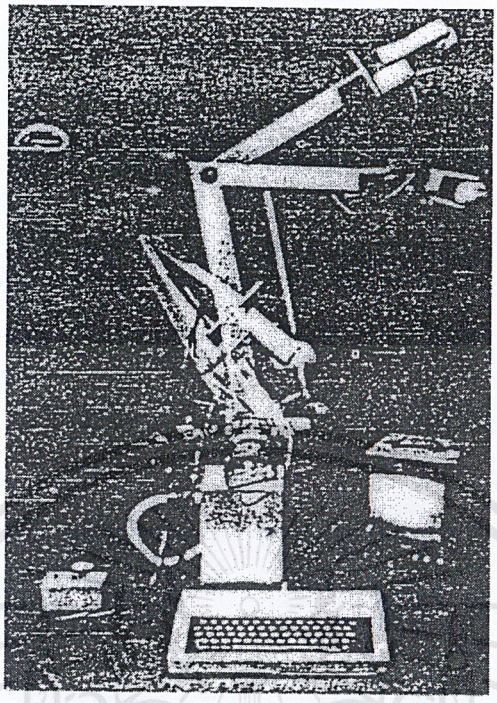
2.3.3 ระบบคอนโทรลมอเตอร์

ในปัจจุบันการคอนโทรลดีซีมอเตอร์จะพบได้ในงานอุตาสาหกรรมส่วนมากเนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางไมโครอิเลคตรอนิคส์และไมโครโปเซสเซอร์ ดังนั้นการออกแบบระบบคอนโทรลดีซีมอเตอร์และการวิเคราะห์จึงเป็นเทคนิคใหม่ที่สำคัญและน่าสนใจ

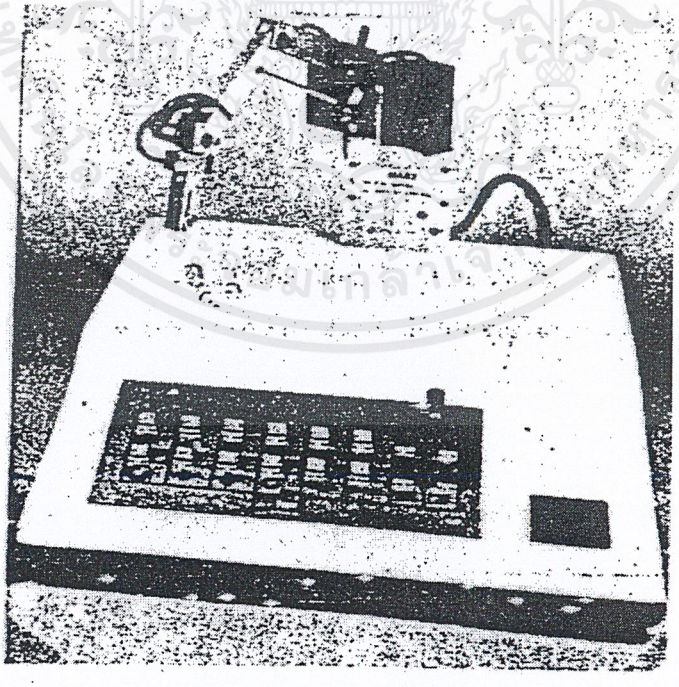
ระบบการคอนโทรลแบบดั้งเดิม พลังจักรกลที่สำคัญในระบบมักได้แก่ พวกมอเตอร์ไฟฟ้าต่างๆ ไฮโดรลิคแอ็คชิวเอทเตอร์และพวกเบรกคลัชเป็นต้น แต่ด้วยความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีการสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีคุณภาพสูง ทำให้ดีซีมอเตอร์กลายเป็นพลังจักรกลที่สำคัญในระบบคอนโทรลเกือบทุกชนิดในปัจจุบัน และในเวลาเดียวกันบวกกับความก้าวหน้าของไมโครโปเซสเซอร์ได้สร้างการประยุกต์งานใหม่ๆ ขึ้นทำให้ดีซีมอเตอร์และสเตปมอเตอร์ได้รับความนิยมในงานอุตสาหกรรมปัจจุบันอย่างกว้างขวาง

ดีซีมอเตอร์เป็นอนาลอกแอ็คชิวเอทเตอร์ที่ไม่มีตำแหน่งยุคที่แน่นอนเหมือนสเตปมอเตอร์ ดังนั้นระบบคอนโทรลดีซีมอเตอร์โดยทั่วไปมักเป็นระบบแบบลูปปิด ในระบบแบลูปปิดตำแหน่งเอาท์พุทหรือความเร็วเอาท์พุทจะถูกป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับอินพุทอ้างอิงเพื่อให้ได้คุณสมบัติการทำงานที่ต้องการ ในรูปที่ 2.11 ตัวอย่างระบบการคอนโทรลดีซีมอเตอร์ที่ประยุกต์ใช้กับแขนหุ่นยนต์โดยมีดีซีเซอร์โวมอเตอร์ในแต่ละข้อต่อเพื่อให้ได้อัตราส่วนของแรงบิดต่อแรงเฉื่อยสูง สามารถกำหนดตำแหน่งได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถวัดแรงบิดขับเคลื่อน เพื่อป้อนกลับไปเป็นระบบแบบลูปปิด และในรูปที่ 2.12 เป็นหุ่นยนต์อีกแบบหนึ่งสำหรับใช้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรมขนาดเบาโดยใช้ดีซีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนในแต่ละข้อต่อทำให้กำหนดตำแหน่งได้อย่างสมบูรณ์สามารถโปรแกรมใช้งานต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง มีความแข็งแรงและสามารถจับยึดสิ่งต่างๆ ได้อย่างคล่องตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างแขนหุ่นยนต์ที่มีดีซีเซอร์โวมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนในแต่ละข้อต่อและโปรแกรมได้ด้วยไมโครโปรเซสเซอร์



รูปที่ 2.12 หุ่นยนต์สำหรับใช้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรมขนาดเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 พื้นฐานของระบบคอนโทรลดีซีมอเตอร์

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบคอนโทรลดีซีมอเตอร์แสดงได้ในบล็อคไดอะแกรมของรูปที่ 2.13 ซึ่งประกอบด้วยบล็อคที่สำคัญ 4 บล็อคคือ :

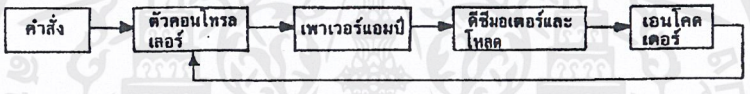
(1) ตัวคอนโทรลเลอร์

(2) วงจรไดรเวอร์หรือเพาเวอร์แอมปลิไฟ

(3) พีดแบ็คทรานดิวเซอร์หรือเอนโคดเดอร์

(4) ดีซีมอเตอร์และโหลด

ตัวคอนโทรลเลอร์ เป็นส่วนของระบบที่ทำให้เกิดสัญญาณคอนโทรล ไปบังคับดีซีมอเตอร์และโหลด คอนโทรลเลอร์ที่ให้สัญญาณคอนโทรลเป็นสัญญาณอนาลอกเราเรียกว่าอนาลอกคอนโทรลเลอร์ ส่วนคอนโทรลเลอร์ที่ให้สัญญาณคอนโทรลเป็นสัญญาณดิจิตอลเราเรียกว่าดิจิตอลคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 2.13 ระบบการคอนโทรลดีซีมอเตอร์แบบพื้นฐาน

วงจรไดรเวอร์ เป็นส่วนประกอบของระบบที่อยู่ระหว่างตัวคอนโทรลเลอร์กับดีซีมอเตอร์และโหลดมีหน้าที่ปรับรูปและขยายสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะป้อนเข้าไปขับซีดีมอเตอร์และโหลด วงจรไดรเวอร์ส่วนใหญ่ได้แก่เพาเวอร์แอมปลิไฟซึ่งอาจแบ่งย่อยออกเป็นลิเนียร์เพาเวอร์แอมปลิไฟและพัลซ์วิดทโมดูเลชั่นแอมปลิไฟ

ฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์หรือเอนโคดเดอร์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้รับรู้หรือดีเท็คสัญญาณเอาท์พุทที่ต้องการ โดยไม่มีผลของการโหลดดิ้ง (loading) สัญญาณที่ดีเท็คได้นี้จะป้อนกลับไปเปรียบกับสัญญาณอ้างอิงทำให้ได้สัญญาณเออร์เรอร์ ฟีดแบ็คทรานซดิวเซอร์แบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ อนาลอกทรานซดิวเซอร์ คือสิ่งประดิษฐ์ใช้เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งให้เป็นสัญญาณอนาลอกได้แก่พวกทาโคเยนเนอเรเตอร์ โปเทนทิโอเมเตอร์และซิงโครเป็นต้น ส่วนฟีดแบ็คทรานซดิวเซอร์อีกแบบหนึ่งคือ ดิจอตอลทรานซดิวเซอร์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งให้เป็นสัญญาณดิจิตอล ได้แก่พวกอินคริเม้นท์เอนโคดเดอร์รีโซลเวอร์ แมกนิติคพิคอัพ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีซีมอเตอร์และโหลด คือระบบที่ถูกคอนโทรลหรือส่วนที่ออกแรงทำงานซึ่งจะเป็นเครื่องจักรกล (ดีซีมอเตอร์) หรืออะไรก็ตามที่ให้ตัวแปร ดีซีมอเตอร์ในที่นี้เป็นแบบแม่เหล็กถาวรที่มีคุณสมบัติการทำงานสูง มีอาร์มาเจอร์อินดัคแต้นซ์และแรงเฉื่อยของโรเตอร์ต่ำ

2.3.5 <u>ระบบคอนโทรลตำแหน่งการเคลื่อนที่</u> (Position Control System)

ระบบคอนโทรลการเคลื่อนที่ส่วนมากมักต้องการการหมุนโหลดให้ไปหยุดในตำแหน่งที่กำหนดและยึดตำแหน่งนั้นไว้จนกว่าจะได้รับคำสั่งคอนโทรลการหมุนอันใหม่ การเคลื่อนที่อีกแบบหนึ่งของระบบนี้คือในบางครั้งต้องการให้โหลดเคลื่อนที่ไปตามระยะตำแหน่งที่กำหนดให้ข้อกำหนดการเคลื่อนที่ทั้งสองแบบดังกล่าวสามารถกระทำได้โดยอาศัยระบบการคอนโทรลตำแหน่ง

ระบบการคอนโทรลตำแหน่ง ตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ที่ต่ออยู่กับโหลดจะสอดคล้องกับคำสั่งอินพุท เมื่อสัญญาณคอนโทรลคงที่เพลาของมอเตอร์ก็จะล็อคกับตำแหน่งที่ต้องการ เมื่อสัญญาณคอนโทรลแปรไปอย่างต่อเนื่องตำแหน่งของมอเตอร์ก็จะเคลื่อนตามคอนโทรลตราบเท่าที่การแปรไปของสัญญาณคอนโทรลอยู่ภายในแบนด์วิดท์ของลูป

ตัวเซนเซอร์ตำแหน่งอาจเป็นพวกที่ให้สัญญาณเอาท์พุทได้ต่อเนื่อง เช่น โปเทนทิโอมิเตอร์ ซึ่งระบบการคอนโทรลแบบนี้จะเป็นไปอย่างต่อเนื่องหรือเป็นระบบการคอนโทรลแบบอนาลอก ระบบการคอนโทรลตำแหน่งแบบอนาลอกมีความละเอียดในการคอนโทรลตำแหน่งได้ดีเยี่ยมซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมในการคอนโทรลตำแหน่ง อย่างไรก็ตาม สัญญาณของตำแหน่งที่มีการแปรอย่างต่อเนื่องจะถูกลิมิตอยู่ในช่วงตำแหน่งช่วงหนึ่งเท่านั้น และการลิมิตนี้จะเป็นตัวจำกัดการเคลื่อนที่

ตัวเซนเซอร์ตำแหน่งแบบอื่นได้แก่เซนเซอร์แบบดิจิตอล พวกเอนโคดเดอร์สำหรับตำแหน่งของเพลา พวกเซนเซอร์แบบนี้มีช่วงการทำงานของตำแหน่งไม่มีขีดจำกัด อย่างไรก็ตามเซนเซอร์พวกนี้มีข้อเสียในเรื่องความละเอียดของการคอนโทรลตำแหน่งอยู่ภายในค่าที่จำกัด นอกจากนั้นสัญญาณของตำแหน่งจะอยู่ในลักษณะของสัญญาณดิจิตอลซึ่งสัญญาณนี้จะต้องป้อนเข้า D – A คอนเวอร์เตอร์ ก่อนเพื่อแปลงไปเป็นสัญญาณของตำแหน่งแบบอนาลอก

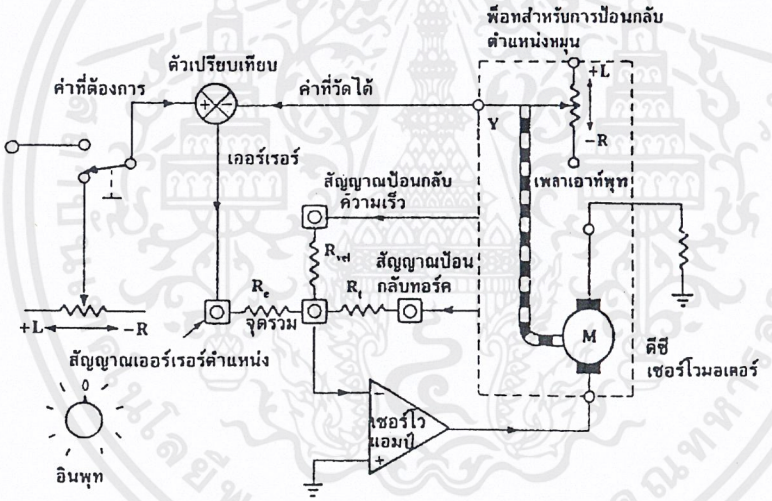
มีหลักความจริงอยู่ว่า เราไม่สามารถจะคอนโทรลตำแหน่งเอาท์พุทของระบบให้เที่ยงตรงได้มากไปกว่าความเที่ยงตรงที่วัดได้จากตัวเซนเซอร์ ปัญหาหลักในการออกแบบระบบการคอนโทรลตำแหน่งคือ การทำให้ระบบมีเสถียรภาพภายใต้อัตราขยายที่เหมาะสม และมีแบนด์วิดท์ของลูปอย่างพอเพียง ดังนั้นเราจะได้เน้นถึงปัญหาของเสถียรภาพและหลักการออกแบบต่อไป ระบบการคอนโทรลแบบป้อนกลับโดยทั่วไปจุดมุ่งหมายหลักคือ ต้องการให้ระบบมีความเที่ยงตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สภาวะคงที่ (steady – state accuracy) เป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นระบบจึงไม่นิยมที่จะให้มีการลดอัตราขยายลงเพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ถ้าอัตราขยายที่ต้องการเพื่อกำหนดความเที่ยงตรงทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพหรือผลตอบสนองมีการแดมป์ที่เลว เมื่อนั้นระบบจะต้องได้รับการเปลี่ยนแปลง (มีการชดเชย) ในวิถีทางที่จะให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ โดยไม่ทำให้ความเที่ยงตรงด้อยลงไป

2.3.6 <u>บล็อคไดอะแกรมและทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของระบบเซอร์โว</u>

ระบบเซอร์โวในรูปที่ 2.14 ประกอบด้วยลูปการคอนโทรลตำแหน่ง ลูปการคอนโทรลความเร็วรอบ และลูปการคอนโทรลทอร์คจากไดอะแกรมวงจรของรูปที่ 2.14 เราสามารถมองเห็นลูปการคอนโทรลทั้ง 3 ลูปได้เด่นชัด เพราะเราเขียนอยู่ในรูปบล็อคไดอะแกรมอย่างง่าย



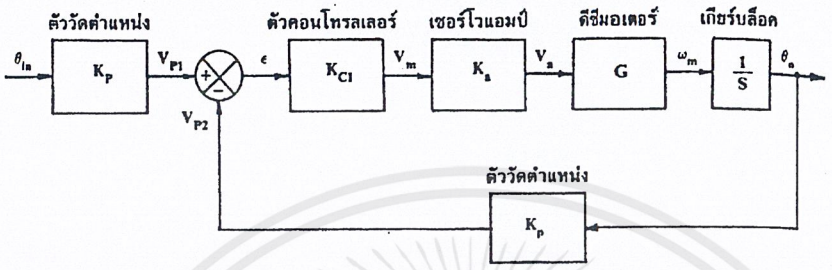
รูปที่ 2.14 บล็อคไดอะแกรมของระบบเซอร์โวที่ทำให้ง่ายขึ้น

การวิเคราะห์ระบบเซอร์โวจากรูปที่ 2.14 เพื่อให้เราเข้าใจการทำงานของระบบได้ดียิ่งขึ้น เราจะแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ลูปคือ โหลดการคอนโทรลตำแหน่งมุม ลูปการคอนโทรลความเร็ว และลูปการคอนโทรลทอร์ค หลังจากนั้นเราจึงวิเคราะห์ทั้งระบบที่ประกอบด้วย 3 ลูป โดยพิจารณาถึงคุณสมบัติไดนามิคและคุณสมบัติสแตติคของระบบหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.7 บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลตำแหน่งมุม

จากรูปที่ 2.14 เราสามารถแยกเขียนเป็นบล็อคไดอะแกรมของลุปคอนโทรลตำแหน่งหมุนได้ดังแสดงในรูปที่ 2.15



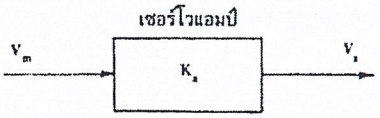
รูปที่ 2.15 บล็อคไดอะแกรมลูปการคอนโทรลตำแหน่งมุม

ส่วนประกอบของลูปการคอนโทรลตำแหน่งหมุน

1. ตัววัดตำแหน่ง (K_p)
2. ตัวคอนโทรลเลอร์ (K_{c1})
3. เพาเวอร์แอมปลิไฟเออร์ (K_a)
4. ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ (G)
5. เกียร์บล็อค $(\frac{1}{s})$

2.3.8 บล็อคไดอะแกรมของเพาเวอร์แอมปลิไฟเออร์

เพาเวอร์แอมป์หรือเซอร์โวแอมป์ในที่นี้เป็นแอมปลิไฟเออร์แบบไบโพล่าร์ (หมายถึงแอมปลิไฟเออร์ที่ต้องใช้เพาเวอร์ซัพพลายทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เรากำหนดให้เวอร์โวแอมป์นี้มีอัตราขยายเท่ากับ K_a ดังนั้นเราสามารถเขียนบล็อคไดอะแกรมของเซอร์โวแอมป์นี้ได้ดังนี้



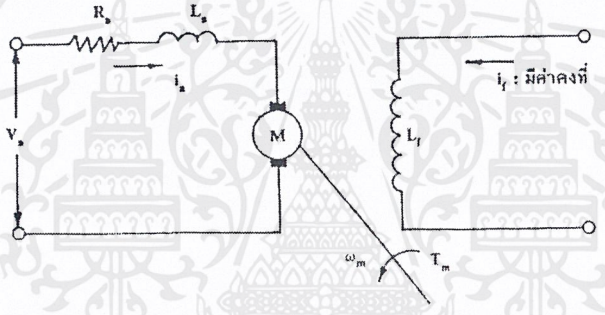
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $$\boxed{V_a = K_a \cdot V_m} \qquad (2\text{-}3\text{-}1)$$

เมื่อ K_a เป็นโวลท์เตจ gain ของเซอร์โวแอมป์มีหน่วยเป็น V/V

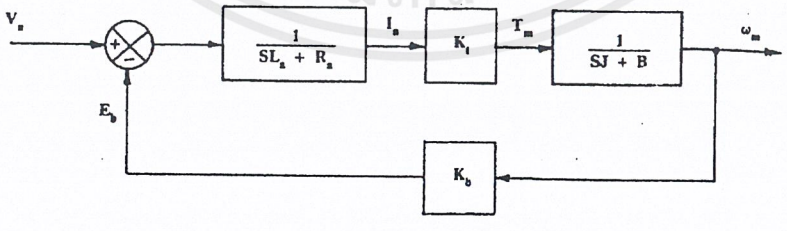
2.3.9 <u>บล็อคไดอะแกรมของดีซีเซอร์โวมอเตอร์</u>

ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้ในระบบนี้เป็นแบบอาร์มาเจอร์คอนโทรลดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลย์ดีซีเซอร์โว

จากรูปที่ 2.16 เราสามารถเขียนบล็อคไดอะแกรมของดีซีเซอร์โวแบบอาร์มาเจอร์คอนโทรลได้ดังนี้



จากบล็อคไดอะแกรมเราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง ω_m/Va ได้ดังนี้

$$G = \frac{\omega_m}{V_a} = \frac{K_t/(BRa + KtKb)}{V_a}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

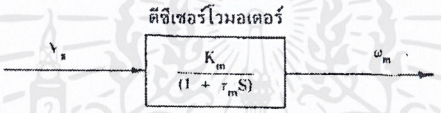
$$\frac{\omega_m}{V_a} = \frac{K_m}{(+ s\tau_m} \qquad (2\text{-}3\text{-}2)$$

เมื่อ $K_m = K_t/(Br_a + K_tK_b)$

$\tau_m = R_aJ/(Br_a + K_tK_b)$

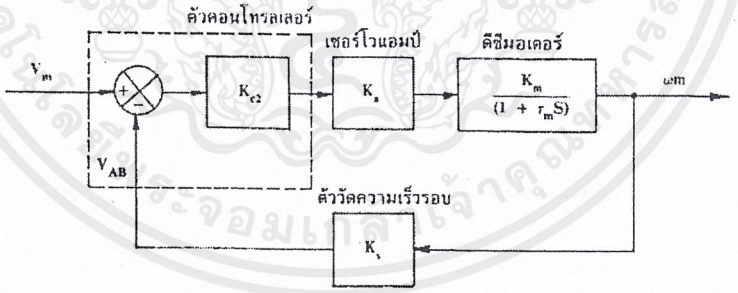
และ $K_t = 0.737\ K_b$

จากสมการ (2-3-2) เราสามารถเขียนเป็นบล็อคไดอะแกรมของดีซีเซอร์โวมอเตอร์ได้ดังนี้



2.3.10 <u>บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลความเร็วรอบ</u>

จากรูปที่ 2.14 เราสามารถแยกเขียนเป็นบล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลความเร็วรอบได้ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลความเร็วรอบ

ส่วนประกอบของลูปคอนโทรลความเร็วรอบ

1. ตัวคอนโทรลเลอร์ (K_{c2})
2. เซอร์โวแอมป์ (K_a)
3. ดีซีมอเตอร์ (G)
4. ตัววัดความเร็วรอบ (K_s)

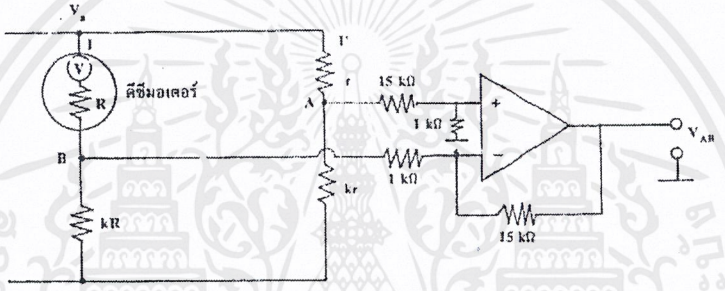
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบหมายเลข 1, 2 และ 3 เราได้พิจารณาทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของส่วนประกอบเหล่านี้แล้วในตอนวิเคราะห์ลูปคอนโทรลตำแหน่งมุม ส่วนประกอบหมายเลข 4 เราจะต้องพิจารณาทรายสเฟอร์ฟังก์ชั่นของมันต่อไป

2.3.11 <u>บล็อคไดอะแกรมของตัววัดรอบความเร็ว</u>

$$V_a = V + IR(1+k)$$

$$I' = \frac{V + IR(1+k)}{r(1+k)}$$



รูปที่ 2.18 วงจรการวัดความเร็วรอบ

$$V_A = \frac{Vk}{(1+k)} + k\ IR$$

$$V_B = k\ IR$$

$$V_{AB} = \frac{Vk}{(1+k)} + k\ IR - k\ IR$$

$$V = K_b\omega_m$$

$$V_{AB} = \frac{k K_b}{(1+k)} \cdot \omega_m$$

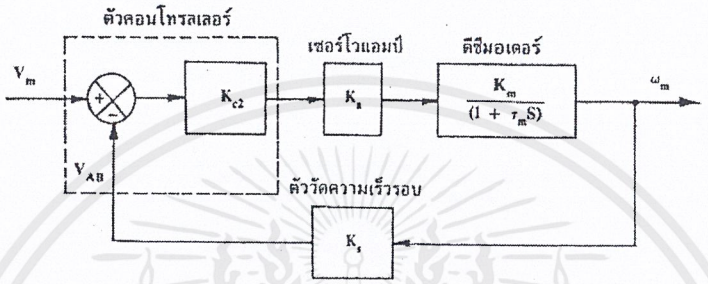
$$\boxed{V_{AB} = K_s \cdot \omega_m} \qquad (2\text{-}3\text{-}3)$$

เมื่อ $K_s = k K_b/(1+k)$

จากสมการที่ (2-3-3) เราสามารถเขียนบล็อคไดอะแกรมของตัววัดความเร็วรอบได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ลูปคอนโทรลความเร็วรอบจากบล็อคไดอะแกรมของทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่น



รูปที่ 2.19 บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลความเร็วรอบ

จากรูปที่ 2.19 เราหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของลูปคอนโทรลความเร็วรอบ ω_m/V_m ได้เป็น

$$\frac{\omega_m}{V_m} = \frac{K_{c2}K_aK_m}{\tau_m S+(K_{c2}K_aK_mK_S+1)}$$

$$\frac{\omega_m}{V_m} = \frac{K'}{\tau_m S+(K'K_S+1)}, \quad (\text{เมื่อ } K' = K_{c2}K_aK_m)$$

$$\boxed{\frac{\omega_m}{V_m} = \frac{K'/(K'K_S+1)}{1+(\frac{\tau_m}{K'K_S+1})S}} \qquad (2\text{-}3\text{-}4)$$

$$\omega_m^{(t)} = [\frac{K'}{(K'K_S+1)}] - C^{-t/(\tau(K'KS+1)} \qquad (2\text{-}3\text{-}5)$$

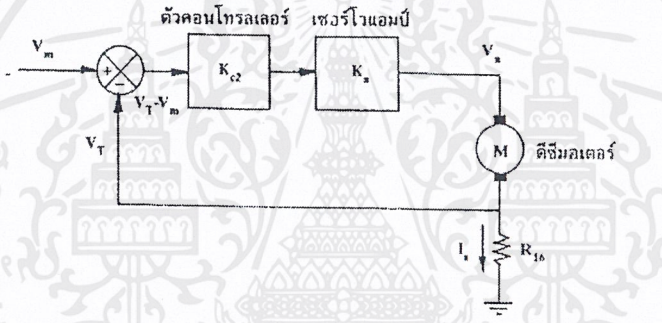
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2-3-5) แสดงถึงผลตอบสนองของระบบต่อสเตปอินพุทเมื่อลูปคอนโทรลความเร็วมีความเร็วคงที่

$$\omega_{m|t\to\infty} = \frac{K'}{(K'K_S + 1)} \cong \frac{1}{K_S} \qquad (2\text{-}3\text{-}6)$$

2.3.12 <u>บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลทอร์ค</u>

จากรูปที่ 2.14 เราสามารถแยกเขียนเป็นบล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลทอร์คได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลทอร์ค

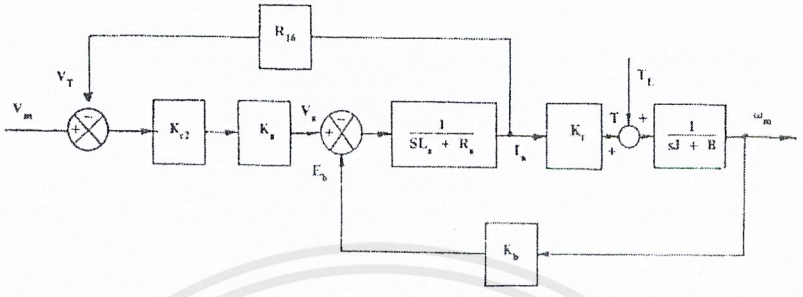
ส่วนประกอบของลูปคอนโทรลทอร์ค

1. ตัวคอนโทรลทอร์ค (K_{c2})
2. เซอร์โวแอมป์ (K_a)
3. ดีซีมอเตอร์ (G)
4. ตัววัดทอร์ค (K_T)

ในรูปคอนโทรลทอร์คนี้เราจะพิจารณาบล็อคไดอะแกรมเฉพาะตัววัดทอร์คเท่านั้นเพราะบล็อคไดอะแกรมของส่วนประกอบอื่นๆ เราได้พิจารณามาแล้วในตอนต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.13 การวิเคราะห์ลูปคอนโทรลจากบล็อคไดอะแกรมของทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่น



รูปที่ 2.20 บล็อคไดอะแกรมของลูปคอนโทรลทอร์ค

จากรูปที่ 2.15 เราหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นของลูปคอนโทรลทอร์ค ω_m/V_m ได้เป็น

$$\frac{\omega_m}{V_m} = \frac{K'}{1+S(\tau_m + \frac{K'R_{16}J}{K_t}) \frac{BK'R_{16}}{K_t}} \qquad (2\text{-}3\text{-}7)$$

$$\omega_m = \frac{K'}{1+S(\tau_m + \frac{K'R_{16}J}{K_t})(1+\frac{BK'R_{16}}{K_t})} \cdot V_m \qquad (2\text{-}3\text{-}8)$$

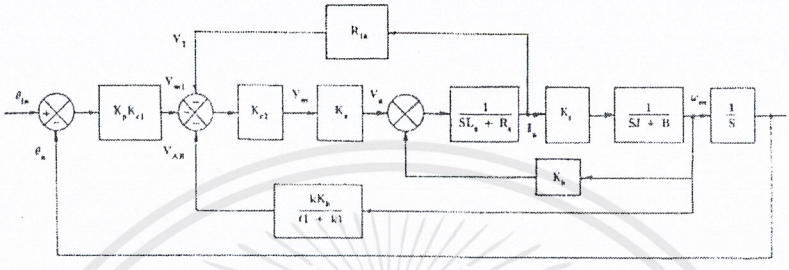
$$\omega_{m|t\to\infty} = \frac{K'}{(1+\frac{BK'R_{16}}{K_t})} \cdot V_m \qquad (2\text{-}3\text{-}9)$$

จากสมการที่ (2-3-9) เราจะเห็นได้ว่าความเร็วของมอเตอร์เข้าสู่สถานะคงที่จะไม่ขึ้นอยู่กับโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

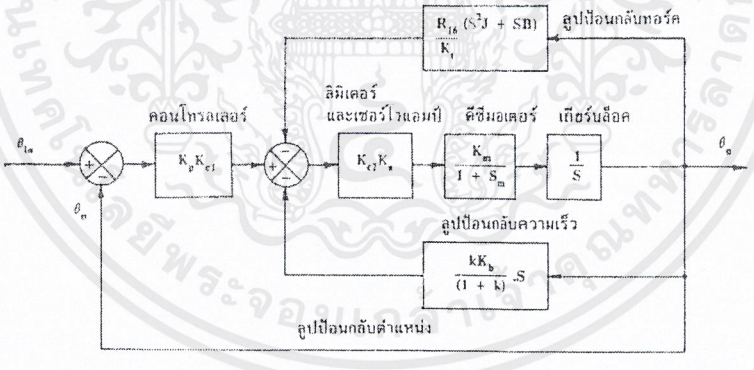
2.3.14 <u>ระบบเซอร์โวที่สมบูรณ์</u>

ระบบเซอร์โวที่ได้รับการออกแบบเป็นระบบคอนโทรลตำแหน่งหมุนที่ประกอบด้วยลูปคอนโทรลความเร็วรอบ และลูปคอนโทรลทอร์คแสดงได้ดังในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.21 บล็อคไดอะแกรมของระบบเซอร์โวที่ประกอบด้วยลูปการป้อนกลับของตำแหน่ง ลูปการป้อนกลับของความเร็วและลูปการป้อนกลับของกระแส

เราสามารถทำบล็อคไดอะแกรมในรูปที่ 2.16 ให้ง่ายขึ้นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.22 บล็อคไดอะแกรมของระบบเซอร์โวเพื่อการคอนโทรลตำแหน่งหมุน

สรุปการวิเคราะห์คุณสมบัติไดนามิคของระบบเซอร์โวที่มีจุดประสงค์สำหรับการคอนโทรลตำแหน่งได้ดังนี้

(ก) เมื่อระบบมีลูปคอนโทรลตำแหน่งเพียงลูปเดียว

- ความเร็วในการตอบสนองของระบบยังไม่ดีพอ
- เสถียรภาพของระบบอยู่ในขั้นที่ไม่ดีนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) เมื่อระบบประกอบด้วยลูปคอนโทรลตำแหน่งลูปคอนโทรลความเร็วรอบ

- ความเร็วในการตอบสนองของระบบดีขึ้น
- เสถียรภาพของระบบดีขึ้น

(ค) เมื่อระบบประกอบด้วยลูปคอนโทรลตำแหน่งและลูปคอนโทรลทอร์ค

- ความเร็วในการตอบสนองของระบบดีขึ้น
- เสถียรภาพของระบบไม่ดีขึ้น

(ง) เมื่อระบบประกอบด้วยลูปการคอนโทรลตำแหน่ง ลูปการคอนโทรลความเร็วรอบ และลูปการคอนโทรลทอร์ค

- ความเร็วในการตอบสนองของระบบดีขึ้น
- เสถียรภาพของระบบดีขึ้นอย่างมาก

2.3.15 <u>การชดเชยในระบบคอนโทรลตำแหน่ง</u>

ในระบบการบังคับแบบป้อนกลับโดยทั่วไป มักต้องการคุณสมบัติของระบบที่มีลักษณะดังต่อไปนี้

(1) ให้ความเที่ยงตรงที่สภาวะคงที่ได้ดีเยี่ยม

(2) ให้ผลตอบสนองได้รวดเร็ว

(3) มีการเร็คกูเลทที่ดี คือสามารถต้านการรบกวนที่มีต่อระบบได้ดี ซึ่งจะทำให้ระบบมีความผิดพลาดเล็กน้อย

(4) ระบบจะต้องมีเสถียรภาพและให้ผลตอบสนองชั่วขณะที่เป็นการแดมป์ลงได้ดี

หลักการออกแบบระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเบื้องต้นนั้น ปกติระบบจะมีพารามิเตอร์เพียงตัวเดียวที่ปรับค่าได้คือ อัตราขยายของระบบ ดังนั้นจึงเป็นไปไม่ได้ที่จะให้ระบบมีคุณสมบัติครบถ้วนตามข้อ (1) (2) (3) และ (4) โดยการปรับพารามิเตอร์เพียงตัวเดียว

เพื่อให้ระบบมีคุณลักษณะเป็นไปตาม 3 ข้อแรก ระบบจะต้องมีอัตราขยายสูงแต่คุณลักษณะตามข้อ (4) ระบบจะต้องมีอัตราขยายต่ำ ดังนั้นคุณสมบัติที่ระบบต้องการจึงไม่สอดคล้องกัน จึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงระบบโดยการชดเชยเพิ่มส่วนประกอบเข้าไปในระบบเพื่อให้สามารถปรับพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ได้เพิ่มขึ้นและเพื่อให้การชดเชยไปอย่างมีประสิทะภาพจะต้องเลือกให้การปรับพารามิเตอร์เป็นไปโดยสอดคล้องกับคุณสมบัติที่ระบบต้องการซึ่งจะได้กล่าวต่อไปถึงข้อกำหนดพื้นฐานในการเลือกและหลักการออกแบบการชดเชย

ระบบต้องการการชดเชยเมื่ออัตราขยายทำให้ระบบไม่เสถียรภาพหรือมีโอเวอร์ชูทสูง ดังนั้นจุดมุ่งหมายของการชดเชยในทางคณิตศาสตร์คือต้องการเลื่อนค่ารากของสมการ คุณสมบัติของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไปทางด้านครึ่งซ้ายของ s-plane ให้ค่ารากนั้นอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้ผลตอบสนองชั่วขณะของระบบมีค่าที่เหมาะสม วิธีการดังกล่าวจะทำได้โดยเทคนิคของรูทโลกัสซึ่งเทคนิคการเขียนทางเดินรูทโลกัส สามารถกระทำได้ง่าย และการชดเชยจะทำให้ทางเดินของรูทลกัสเปลี่ยนแปลงซึ่งเราจำเป็นต้องเขียนรูปของทางเดินรูทโลกัสใหม่โดยต้องให้สอดคล้องกับข้อกำหนด 4 ข้อต่อไปนี้

1. เส้นทางเดินของ loci ต้องผ่านส่วนของ s-plane ซึ่งมีรากที่เราต้องการ
2. ค่าอัตราขยายที่ต้องการจะเป็นตัวกำหนดของค่ารากให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดของความเที่ยงตรง
3. เมื่อมีการชดเชยจะเป็นการเพิ่มโพลและซีโรตัวใหม่ โพลและซีโรที่เพิ่มขึ้นใหม่นี้จะต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อเขียนรูปรูทโลไซขึ้นมาใหม่ และต้องสอดคล้องกับอัตราขยายที่ต้องการ
4. เมื่อมีการชดเชยก็จะเป็นเพียงการเปลี่ยนตำแหน่งของโพลหรือซีโรของระบบเดิม โครงสร้างโพล – ซีโรอันใหม่ จะต้องทำให้ทางเดินของรูทโลกัสใหม่ที่เหมาะสมและต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดของอัตราขยายด้วย

เรามักจะใช้เทคนิคการลองผิดลองถูกกันเป็นส่วนมากซึ่งสังเกตได้ว่าอัตราขยายของระบบมักจะเป็นตัวที่ปรับค่าได้แต่ก็เพียงทำให้ค่ารากเคลื่อนไปตามทางเดินของโรไซเท่านั้น และทางเดินของโรไซเองก็จะเป็นตัวกำหนดว่าการปรับค่าของอัตราการขยายจะมีประสิทธิผลเท่าไร ตามปกติแล้วการชดเชยของระบบอาจจะวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคของโบดพล็อท เนื่องจากระบบจะอยู่ที่ขีดจำกัดของเสถียรภาพเมื่อเฟสมาร์จินและมาร์จินของอัตราขยายเป็นศูนย์ (แต่ระบบจะมีเสถียรภาพเมื่อเฟสมาร์จินและมาร์จินของอัตราขยายเป็นบวกและผลตอบสนองจะเดมป์ลง ด้วยดีเมื่อมาร์จินมีค่าเป็นบวก) ดังนั้นจุดมุ่งหมายของการชดเชยคือ ต้องการให้ได้เฟสมาร์จินและมาร์จินของอัตราขยายมีค่ามากโดยที่ไม่ทำให้ความเที่ยงตรงที่สภาวะสงบนิ่งด้อยลง (เราไม่สามารถจะหาเฟสมาร์จินและมาร์จินของอัตราขยายได้ถ้าหากทรานสเฟอร์ฟังก์ชั่นแบบเปิดลูปมีโพลอยู่ในครึ่งขวาของ s-plane ในกรณีดังกล่าวถือได้เป็นกรณีพิเศษซึ่งเราไม่พิจารณาในที่นี้) ตามปกติการเปลี่ยนแปลงในระบบจะทำให้รูปร่างของทั้งแมกนิจูดและเฟสเปลี่ยนไปด้วยการชดเชยของระบบสามารถกระทำได้ 2 วิธีดังต่อไปนี้

(1) หาทางที่จะชดเชยหรือเปลี่ยนรูปร่างของเส้นโค้งที่แสดงถึงมุมของเฟสซึ่งอยู่ในพื้นที่ของจุดตัดระหว่างของเส้นโค้งแมกนิจูดเปลี่ยนแปลงไปน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) หาทางที่จะชดเชยหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเส้นโค้งของแมกนิจูด โดยพยายามให้จุดตัดของแมกนิจูดตัดกับความถี่เลื่อนไปยังค่าซึ่งทำให้เฟสมาร์จินของระบบที่ยังไม่ได้ชดเชยมีค่าที่เหมาะสม การชดเชยลักษณะนี้จะต้องทำให้เส้นโค้งที่แสดงถึงมุมของเฟสที่จุดตัดใหม่ของแมกนิจูดกับความถี่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

ทั้งสองวิธีที่กล่าวมาแล้วสมมติว่าอัตราขยายที่ความถี่ต่ำ (ซึ่งเป็นตัวกำหนดความเที่ยงตรง) คงสภาพอยู่ที่ค่าที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
โครงสร้างและการออกแบบ

3.1 โครงสร้างและอุปกรณ์เชิงกล

แขนนี้ถูกออกแบบให้มีจำนวนข้อต่อ 5 ข้อต่อ โดยสามารถทำงานในพื้นที่ที่ไม่ใหญ่มากนักและทำงานโดยรับค่าจากการคำนวณของคอมพิวเตอร์ ชิ้นส่วนต่างๆ ถูกออกแบบให้ดูสวยงามและทำงานได้จริง ซึ่งจะประกอบด้วย ส่วนฐาน,หัวไหล่,แขน,ข้อมือ และมือจับ สำหรับรายละเอียดจะอธิบายไว้ในหัวข้อต่อๆไป

3.1.1 การออกแบบ

โครงสร้างของแขนกลนี้ถูกออกแบบโดยเริ่มจากการศึกษาแขนกลที่มีอยู่แล้วมาทำการประยุกต์ โดยการออกแบบแขนกลตัวใหม่นี้มีข้อกำหนดหลักคือ ต้องสามารถทำงานได้ดี และต้องสามารถหาซื้อชิ้นส่วนอุปกรณ์ได้โดยราคาไม่แพงนัก

การออกแบบจึงต้องทำโดย ออกแบบลักษณะแขนเพื่อการทำงานเฉพาะอย่าง จากนั้นต้องหาอุปกรณ์ที่จะใช้ในการผลิตชิ้นส่วนทุกชิ้น จากนั้นนำรูปแบบมาปรับเปลี่ยนโดยคำนึงถึงอุปกรณ์ที่สามารถหาได้จริง และต้องสามารถทำงานได้จริง และท้ายที่สุดคือการออกแบบวิธีและขั้นตอนการทำชิ้นส่วนต่าง

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้

จากการที่มีกำลังซื้อหรือต้นทุนการผลิตค่อนข้างน้อย จึงจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในตลาดทั่วไป และนำมาดัดแปลงเอง โดยอุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมดจะแบ่งตามชิ้นส่วนของแขนกลซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนฐาน หัวไหล่ แขน ข้อมือ และมือจับ โดยแต่ละส่วนออกแบบให้มีอุปกรณ์ที่จะใช้ดังต่อไปนี้

3.1.2.1 ส่วนฐาน

ฐานของแขนกลนี้จะใช้แผ่นอะคลีริกใสขนาด 30*30*0.8 ซม. นำมาทำการเจาะรูตรงกลาง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 ซม. ไว้เพื่อติดตั้งแกนหมุนของฐาน ซึ่งเป็นแกนแรกสุดของแขนกลนี้

3.1.2.2 หัวไหล่

หัวไหล่ของแขนกลนี้จะใช้แผ่นอะคลีริกใส มาทำการเจาะรูเพื่อทำการใส่ลูกปืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และทำการติดตั้งข้อต่อต่างๆ โดยส่วนหัวไหล่นี้จำเป็นต้องมีความแข็งแรงมาก เพราะเป็นส่วนที่รับน้ำหนักของแขนกลทั้งหมด ซึ่งรวมถึงมอเตอร์ แกนหมุน เฟือง โซ่ รวมถึงโซลีนอยด์ หัวไหล่ของแขนกลนี้จะใช้แผ่นอะคลีริกใสทั้งหมด 3 ชิ้น คือ

ขนาด 17*12*0.8 ซม. จำนวน 2 ชิ้น

ขนาด 27*23*0.8 ซม. จำนวน 1 ชิ้น

3.1.2.3 ส่วนแขน

แขนกล ถูกแบ่งชิ้นส่วนของแขนออกเป็นแขนส่วนบนและแขนส่วนล่าง โดยอุปกรณ์ที่ใช้จะเป็นอุปกรณ์ชนิดเดียวกันคือ แผ่นอะครีลิกใส ขนาด 30*5*0.8 ซม. โดยจะมีการเจาะรูทั้งขนาดใหญ่และเล็กเพื่อทำการใส่ลูกปืน และแกนหมุนต่าง นอกจากนี้ชิ้นส่วนที่ใช้ทำแขนยังมีการกัดเนื้องานทิ้งเพื่อลดน้ำหนักของชิ้นส่วน เป็นการช่วยให้มอเตอร์ทำงานน้อยลง กินกระแสลดลง

3.1.2.4 ส่วนข้อมือ

ข้อมือจะใช้อะครีลิกใส ขนาด 8*5*0.8 ซม. ทั้งหมด 3 ชิ้น โดยมีการเจาะลักษณะเดียวกัน 2 ชิ้น และต่างออกไปอีก 1 ชิ้น ดูได้จากรูปที่ 3.6

3.1.2.5 ส่วนมือจับ

มือจับจะใช้อะครีลิกใส ขนาดต่างๆกัน หลายชิ้นมาประกอบกันโดยยึดติดกันกับข้อมือด้วยตัวหนอนขนาด 5 มม. ซึ่งสามารถดูได้จาก รูปที่ 3.7 ในส่วนภาพบรรยาย

3.1.2.6 ส่วนเฟือง

ส่วนเฟือง จะมีการใช้เฟืองแบบเดียวกัน 2 ขนาด คือ ขนาดเล็ก 14 ฟันเฟืองและขนาดใหญ่ 18 ฟันเฟือง โดยจุดประสงค์การใช้จะต่างกันตามคำอธิบายดังนี้

เฟืองขนาดเล็กจะนำมาใส่ Boot และนำไปติดกับส่วนมอเตอร์เพื่อใช้เป็นตัวขับเคลื่อนการหมุนของข้อต่อต่างๆของแขนกล

เฟืองใหญ่จะใช้งานกับส่วนของแกนหมุนโดยแยกทำเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดแรกมีการกลึงคว้านรูในและใส่ลูกปืนเพื่อมีความเป็นอิสระในการหมุน และชนิดที่ 2 จะมีการใส่ Boot เช่นเดียวกับเฟืองเล็กโดยมีวัตถุประสงค์คือ เป็นตัวจับแกนหมุนและบังคับให้แกนหมุนของมอเตอร์

3.1.2.7 มอเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้จะเป็นดีซีมอเตอร์ที่มีการทดรอบเพื่อเพิ่มกำลังขับโดยเราจะใช้ไฟจาก Power Supply เป็นไฟดีซี 24 โวลท์ สำหรับรายละเอียดของมอเตอร์อ่านได้จาก บทที่ 2 ของหนังสือเล่มนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.8 โซลีนอยด์

โซลีนอยด์ เป็นโซลีนอยด์ไฟฟ้าแบบ Single Acting โดยลักษณะการทำงานคือ เมื่อแขนขยับไปตรงจุดที่ต้องการหยิบวัตถุแล้ว จึงจ่ายไฟ ดีซี 12 โวลท์กับโซลีนอยด์ โซลีนอยด์ก็จะทำการดึงส่วนปลายมือให้หนีบเข้าเพื่อจับวัตถุ และเมื่อหยุดจ่ายไฟ โซลีนอยด์ก็จะผลักมือที่หนีบอยู่ให้ปล่อยโดยอัตโนมัติ เนื่องจากโซลีนอยด์มี Spring ติดอยู่ด้วย

3.1.2.9 น็อตและตัวหนอน

น็อตที่ใช้จะเป็นขนาด 3*50 มม. ซึ่งจะทำให้น็อตสามารถหมุนตามโซลีนอยด์ได้อย่างอิสระ

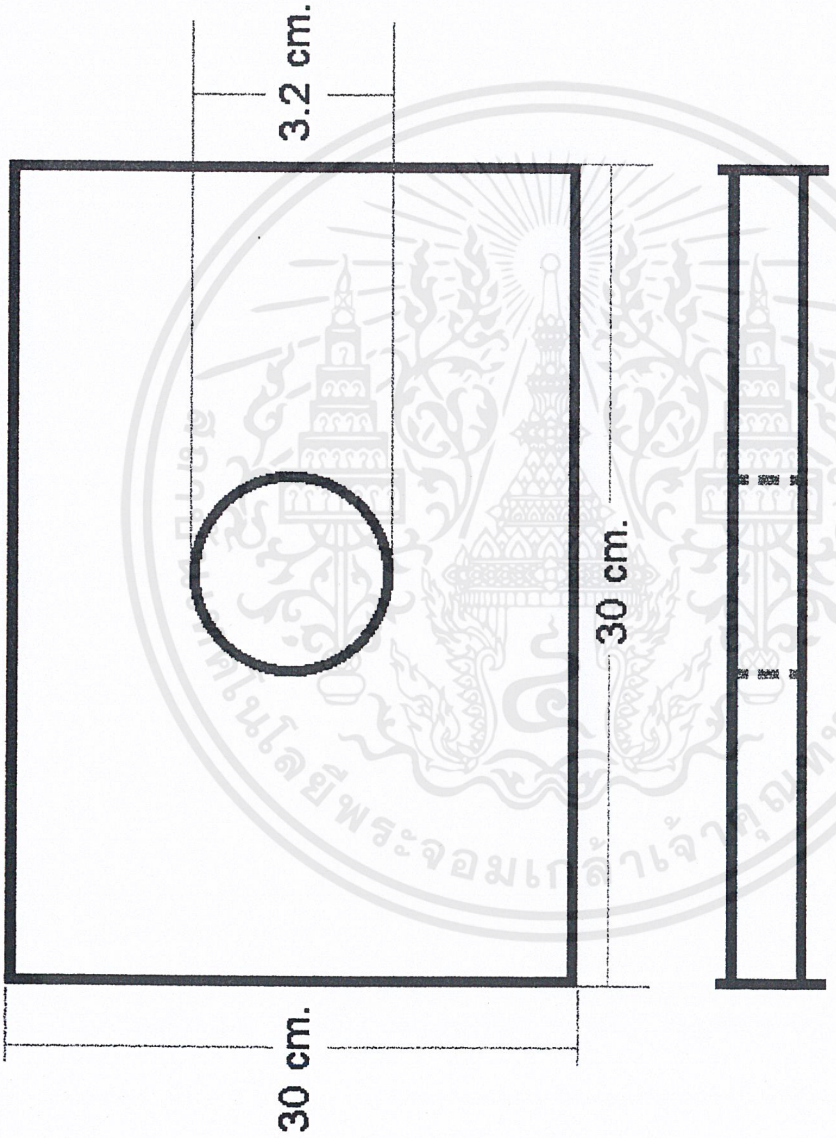
ตัวหนอน จะใช้ตัวหนอนขนาดเดียวกันทั้งหมดเพื่อสะดวกในการทำงานโดยจะใช้ตัวหนอนขนสด 5 มม. และสำหรับการเจาะงานเพื่อใส่ตัวหนอน จะใช้ดอกสว่านขนาด 4.4 มม. และทำการต๊าบเกลียวด้วย โดยการใช้ดอกต๊าบขนาด M – 5

3.1.2.10 แกนหมุน

ส่วนของแกนหมุนนี้ จะใช้อะลูมีเนียมเป็นวัสดุ ที่ไม่ใช้เหล็กเนื่องจากจะทำให้งานมีน้ำหนักมาก ต้องใช้มอเตอร์ใหญ่สิ้นเปลือง อะลูมีเนียมที่จะนำมาใช้ต้องกลึงให้มีขนาด 10 มม. เท่ากันทั้งหมด 3 ชิ้น และมีแกนหมุนล่างซึ่งใช้อะลูมีเนียมขนาดเส้นผ่สนศูนย์กลาง 32 มม. และแกนขับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม.

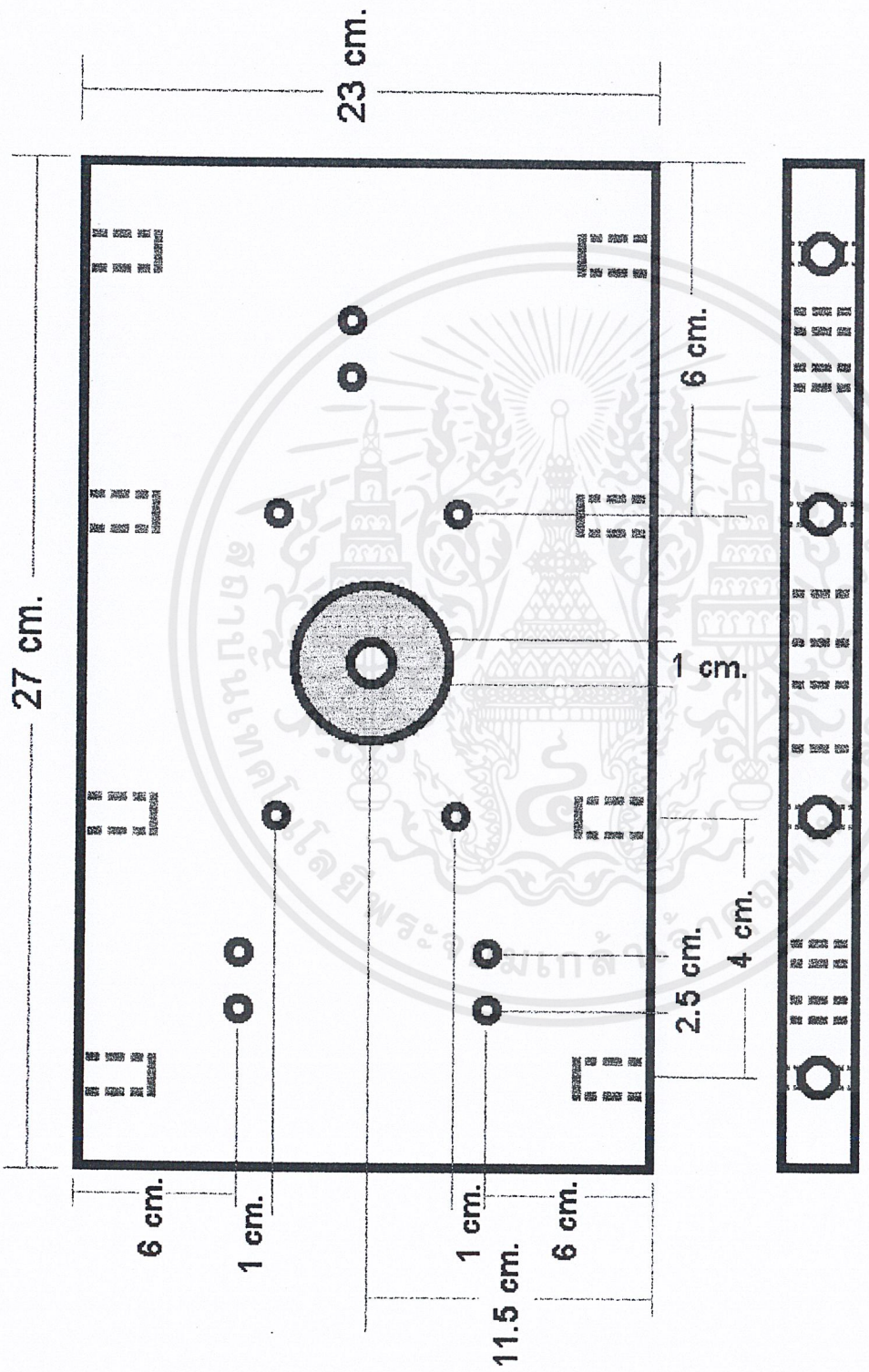
ภาพที่ 3.1 – 3.15 เป็นภาพแสดงการทำชิ้นส่วนของแขนกลนี้ รวมถึงการประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน ซึ่งในภาพจะมีขนาดบอกไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



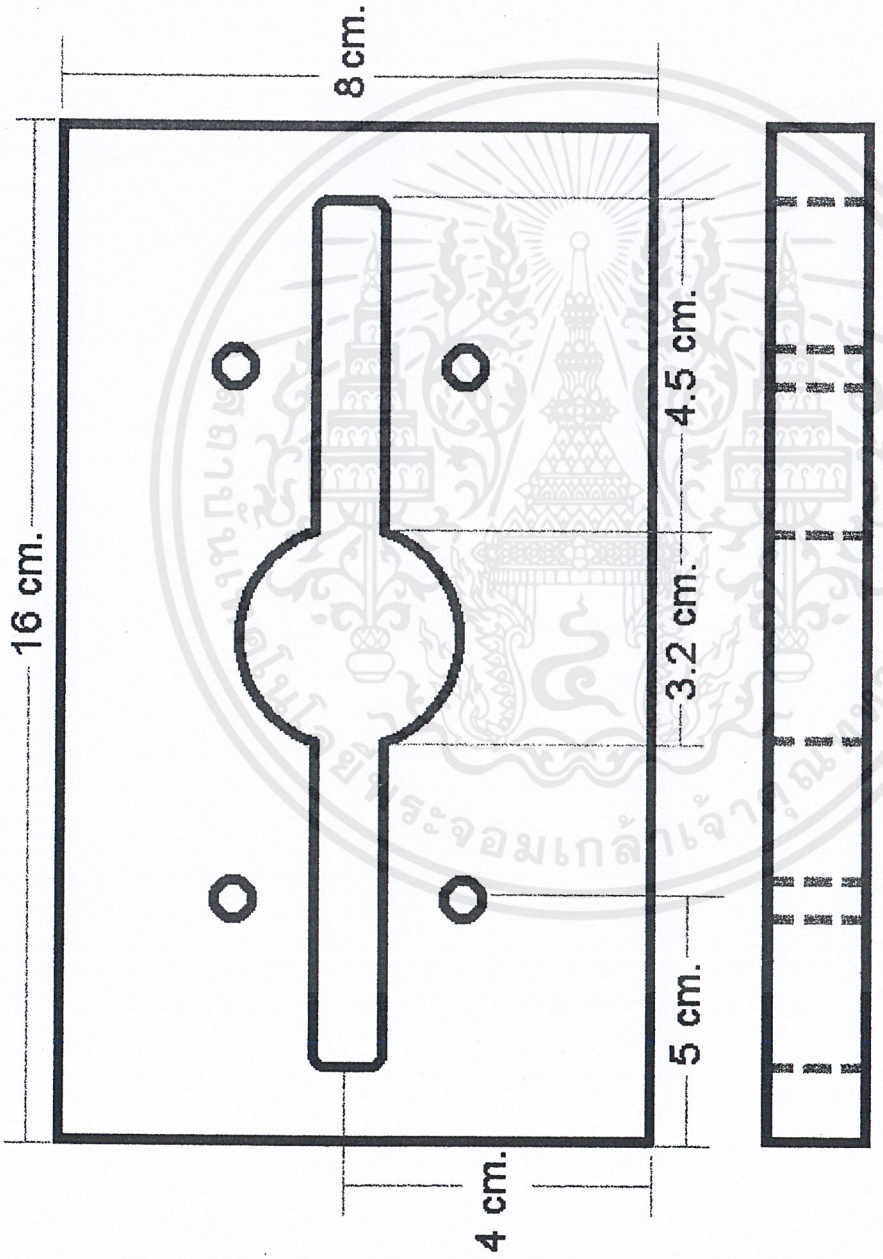
รูปที่ 3.1 : ชิ้นส่วนฐานล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



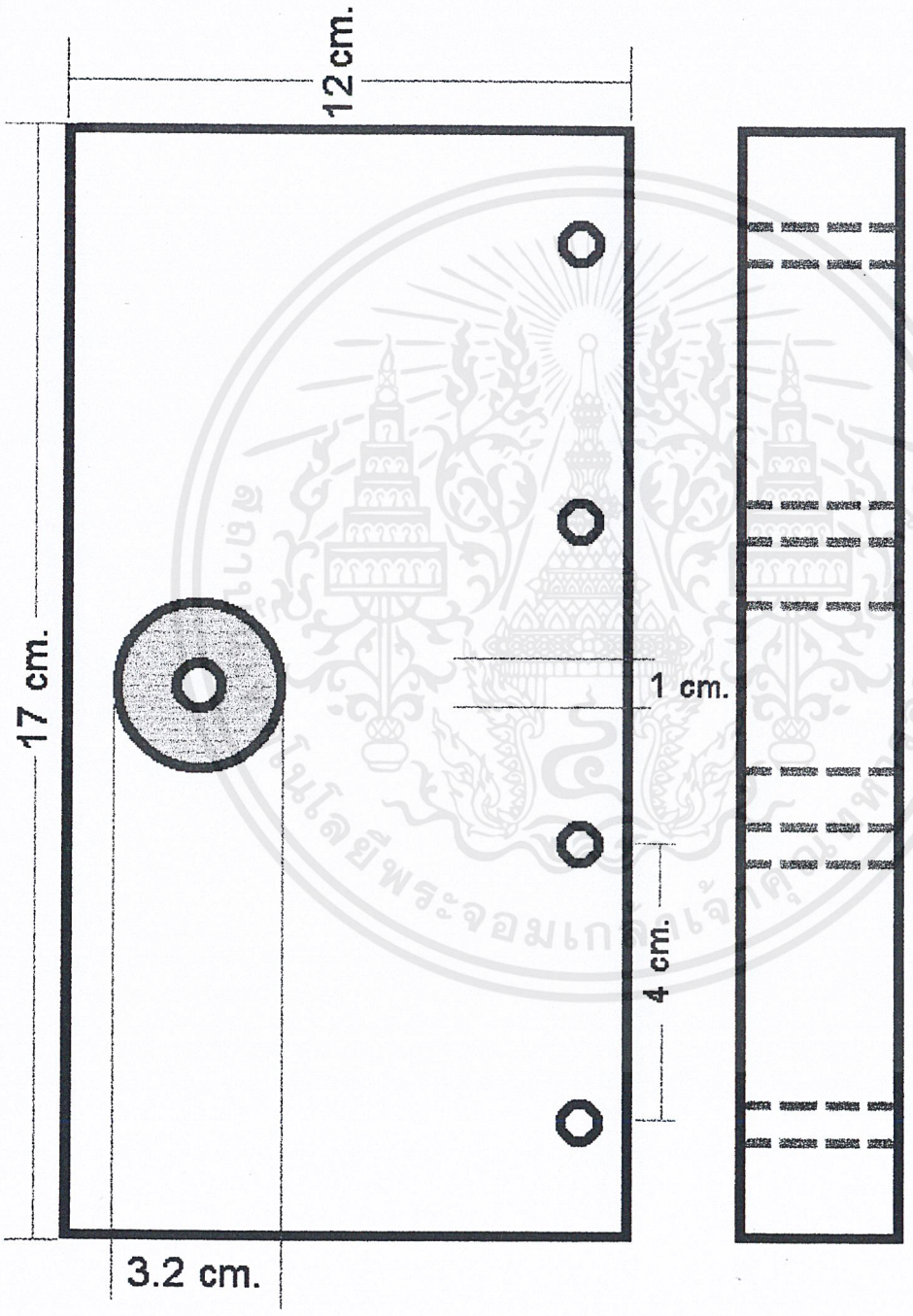
รูปที่ 3.2 : ชิ้นส่วนฐานส่วนบนม่อ เจาะรู,อัดลูกปืน และด้านเสียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 : แผ่นรองรับเพลาขับแม่เหล็กและรูปแสดงการเพลาขับ

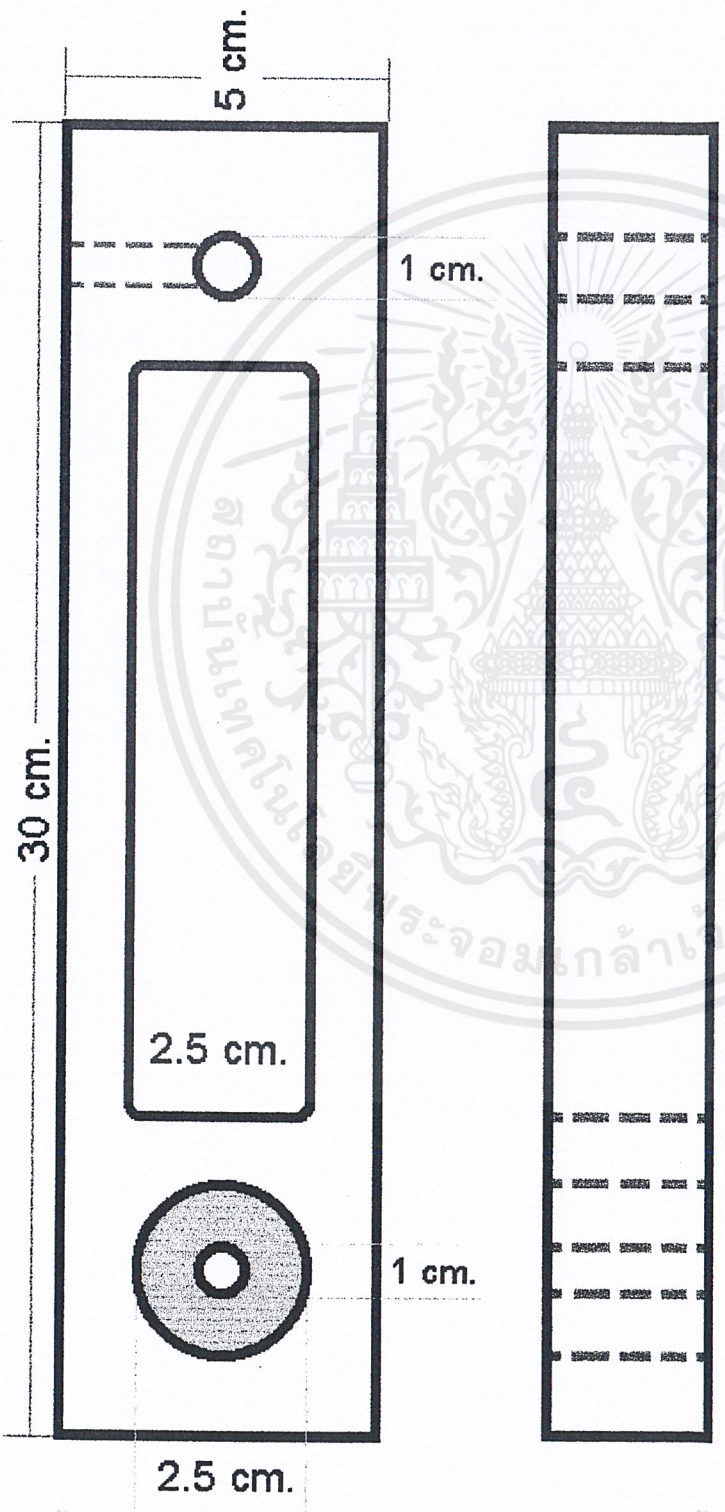
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 : ชิ้นส่วนหัวใหญ่ แม่แบบรู,อัดลูกปืน

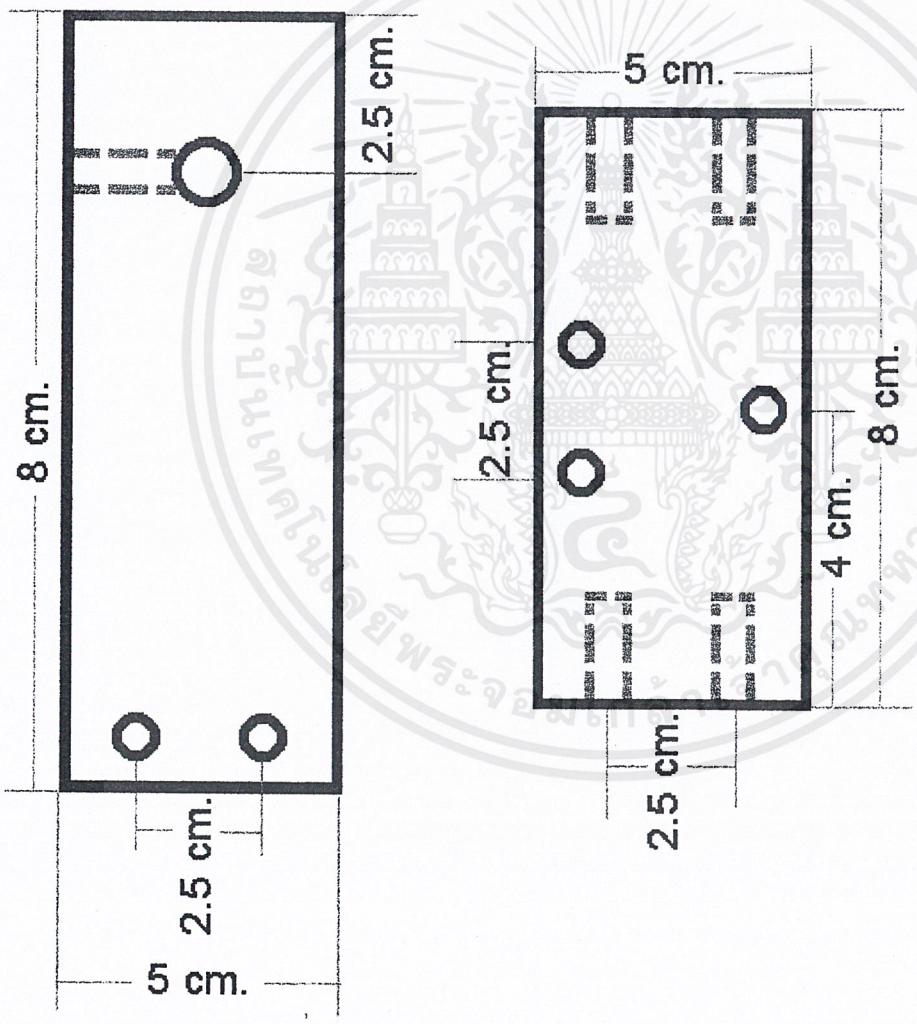
แสดงขนาดมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



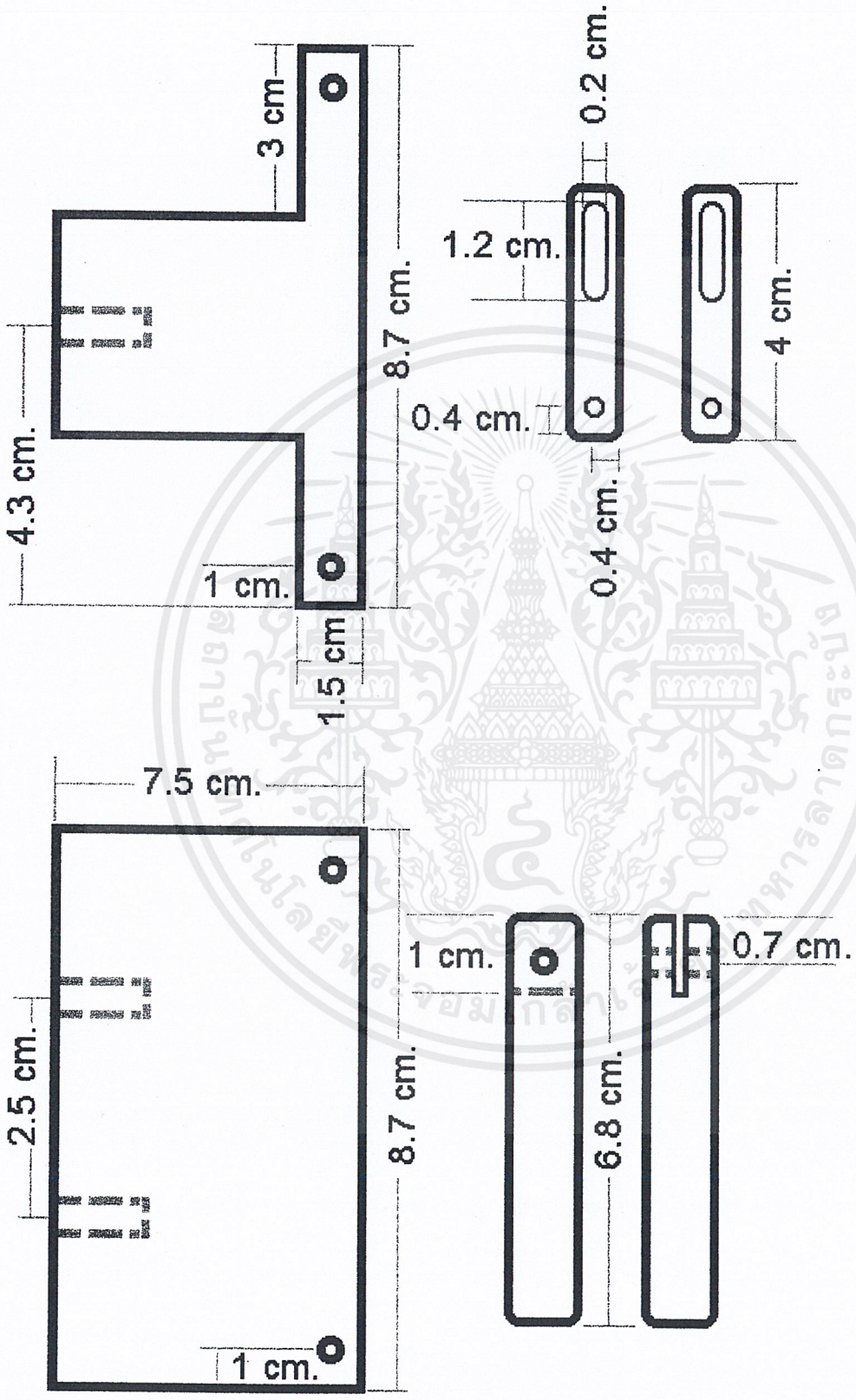
รูปที่ 3.5 : ชิ้นส่วนแขน แม่เหล็กยึดลูกปืนและกัดน้ำยางบางส่วนที่ตลอดมาถอดน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



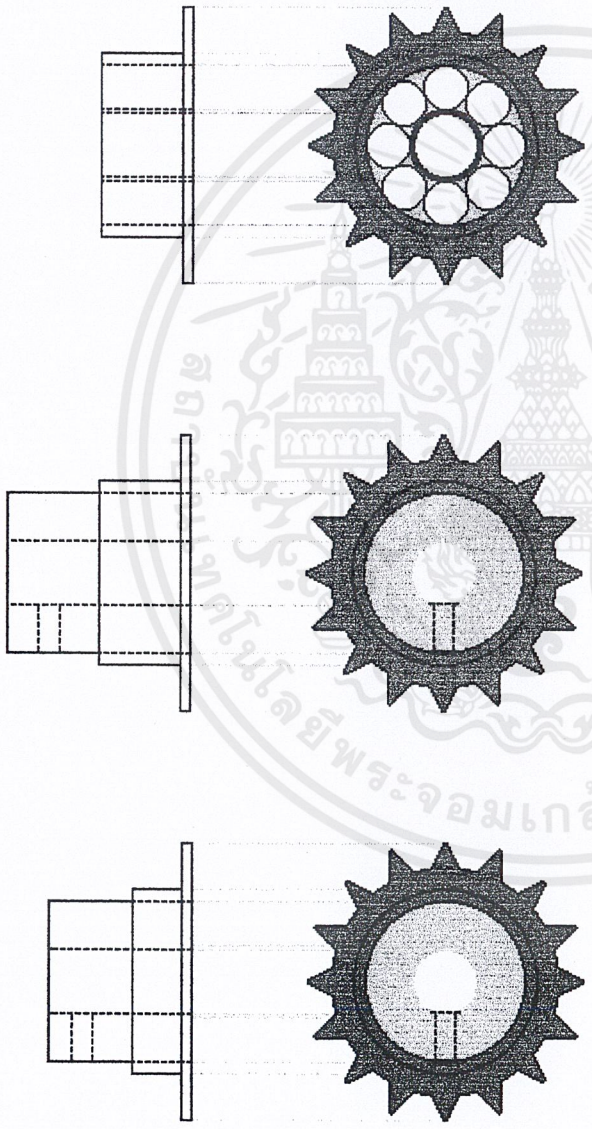
รูปที่ 3.6 : ชิ้นส่วนข้อมือเม่อเจาะรู
และด้านยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



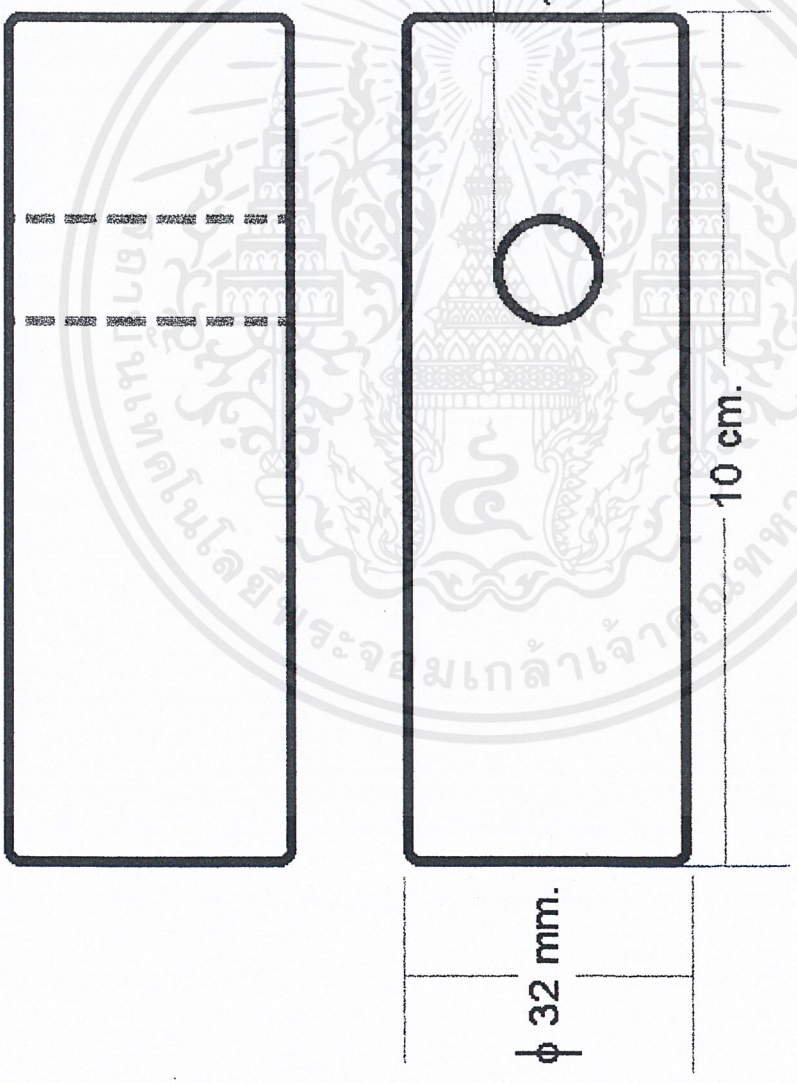
รูปที่ 3.7 : ชิ้นส่วนม่อลูกบิดและรูเสียบ
ก้านเนื่องจากชิ้นต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



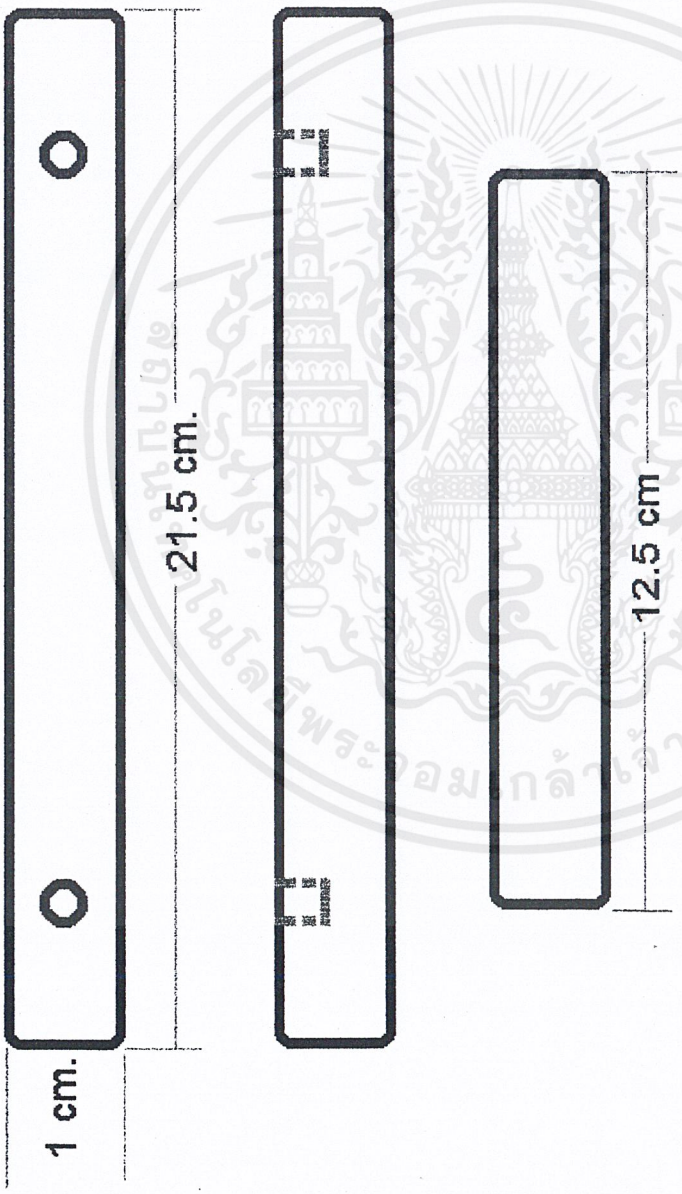
รูปที่ 3.8 : เฟือง (ก.) เฟืองเล็กใส่ Boot
(ข.) เฟืองใหญ่ใส่ Boot
(ค.) เฟืองใหญ่อัดลูกปืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



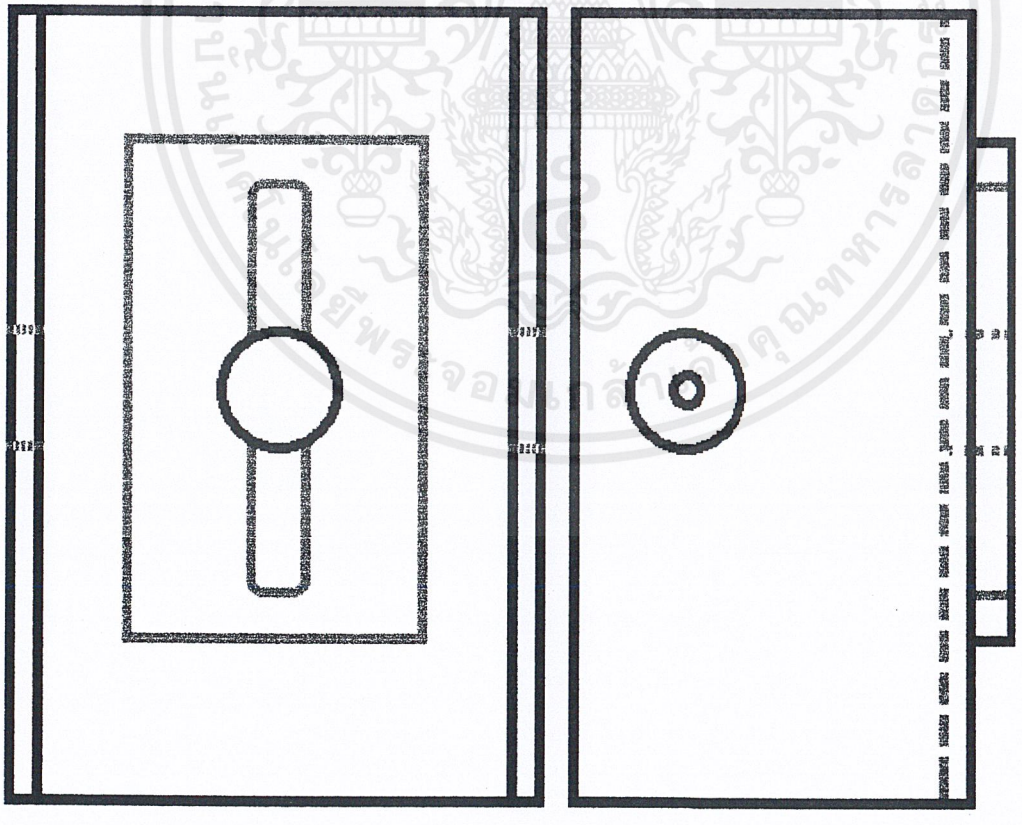
รูปที่ 3.9 : แกนหมุนส่วนล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



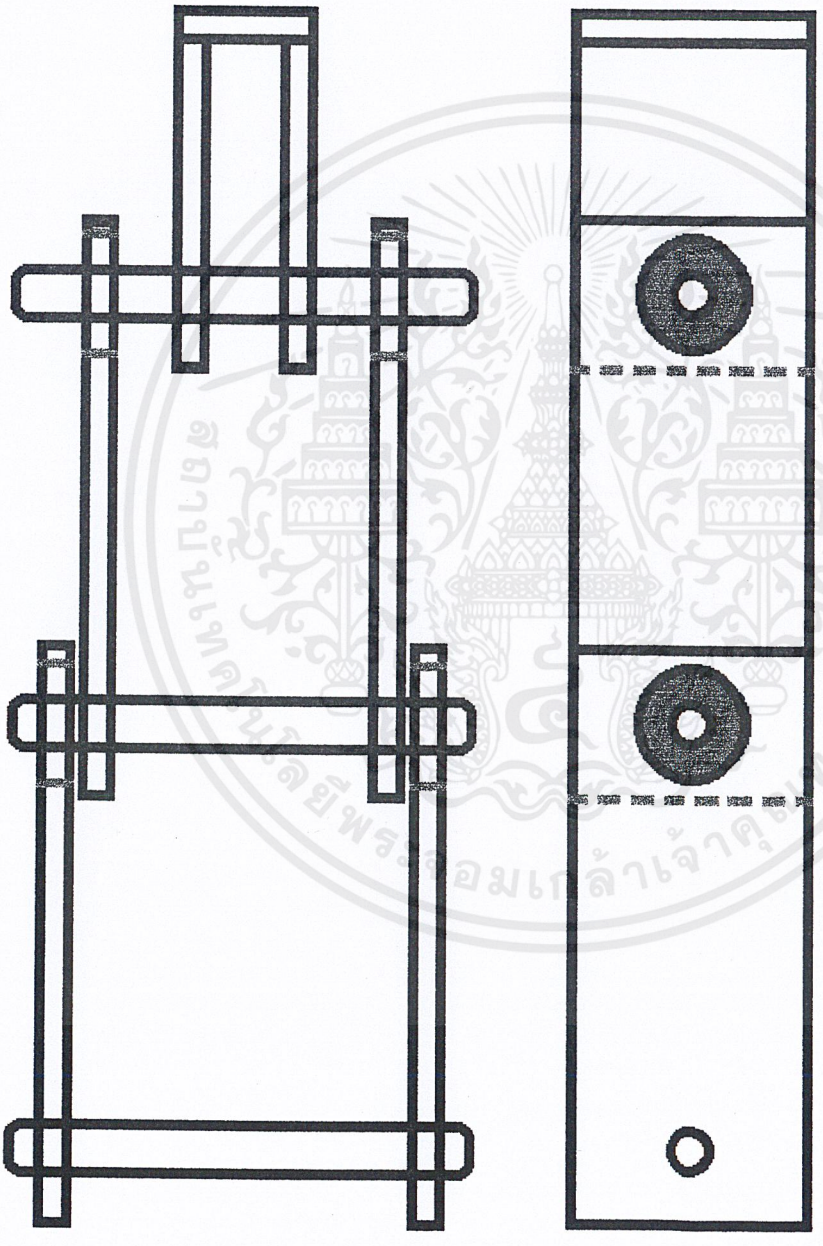
รูปที่ 3.10 : ชิ้นส่วนแกนหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



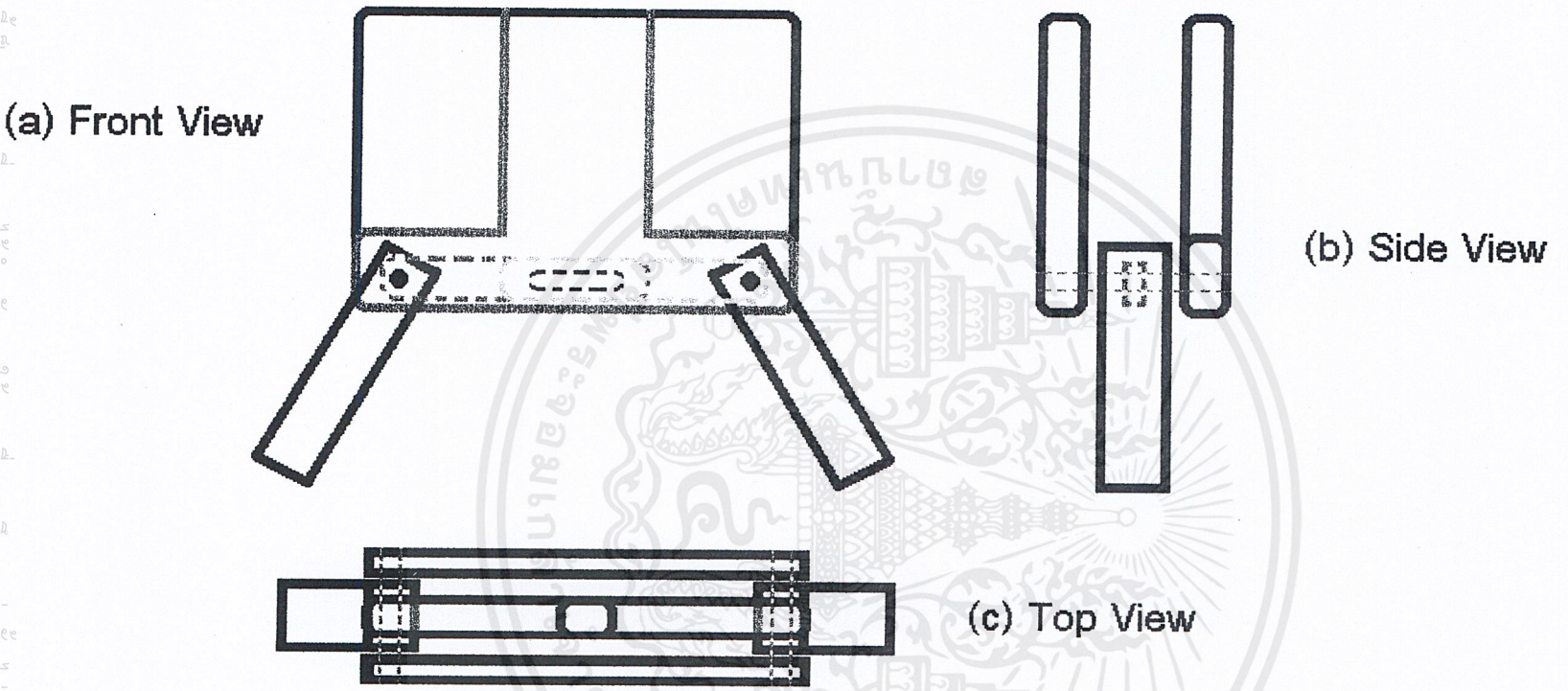
รูปที่ 3.11 : ส่วนหัวไหล่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

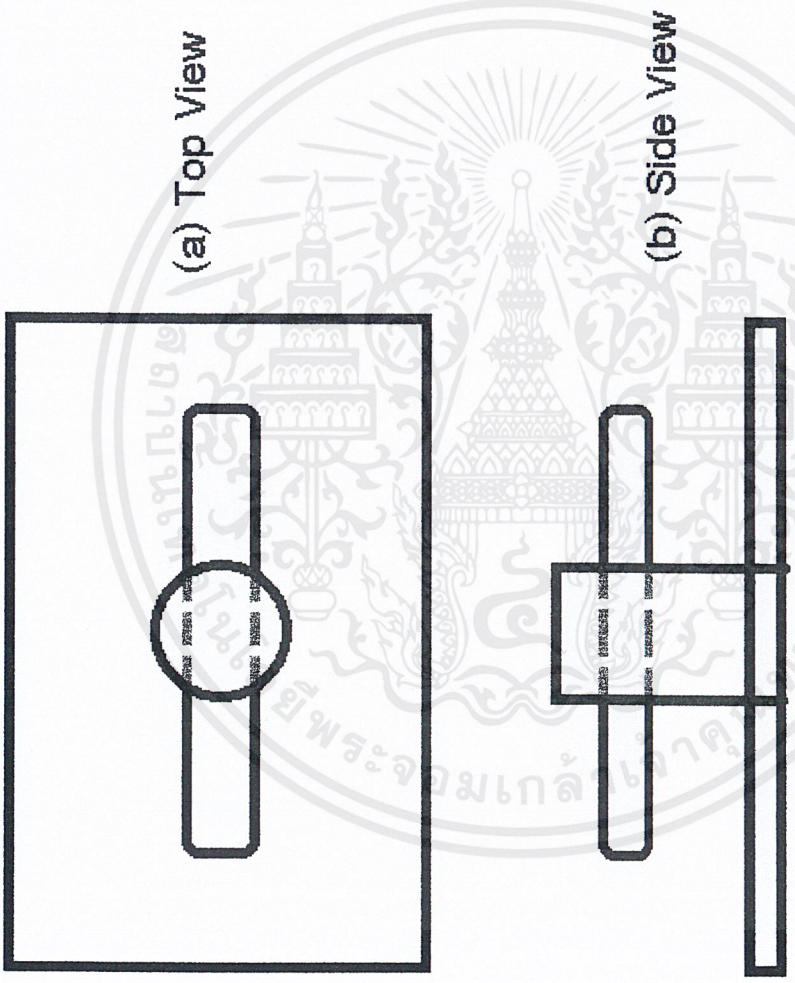


ภาพที่ 3.12 : ส่วนแขน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

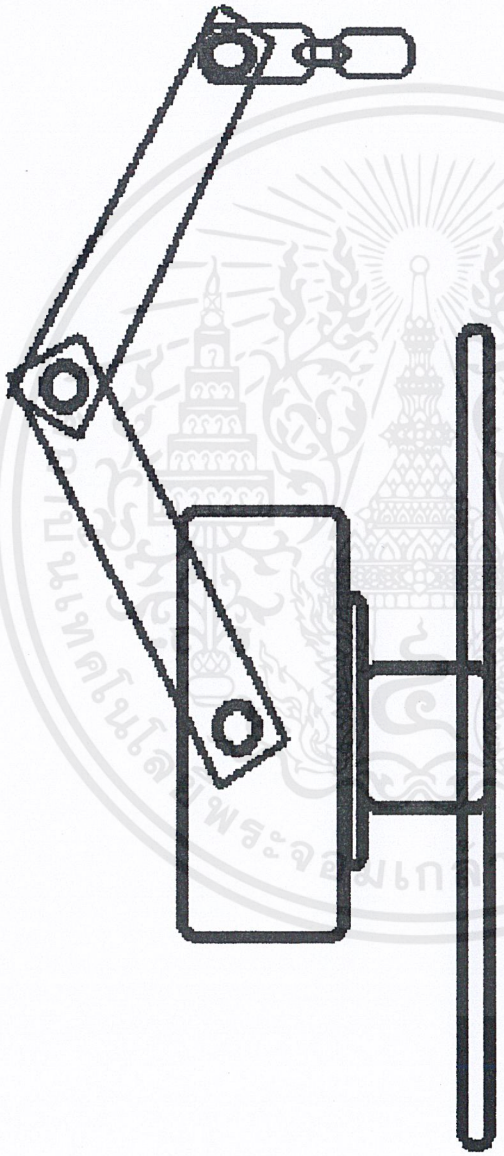


รูปที่ 3.13 : ส่วนมือจับวัตถุ



รูปที่ 3.14 : ฐานแผ่นเพลาขับช่วงล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



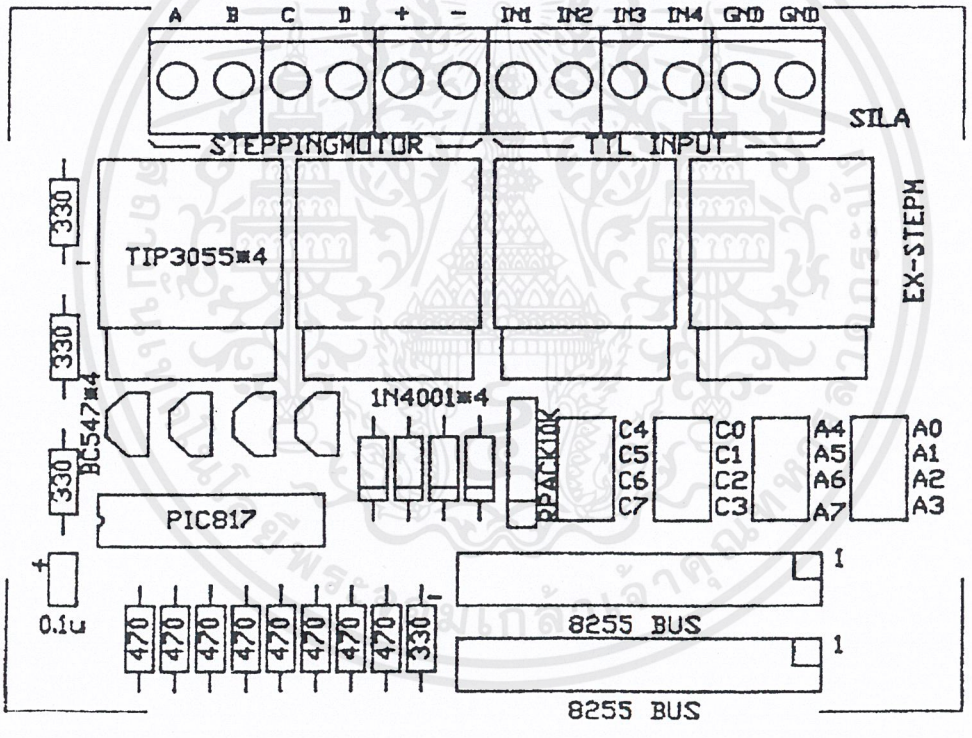
รูปที่ 3.15 : แขนกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วงจรขับมอเตอร์

เราจะทำการประยุกต์วงจรขับสเตปมอเตอร์มาใช้ในการขับมอเตอร์ดีซี โดยจะใช้บอร์ด EX-STEPM ของบริษัท ศิลารีเสิร์ช จำกัด

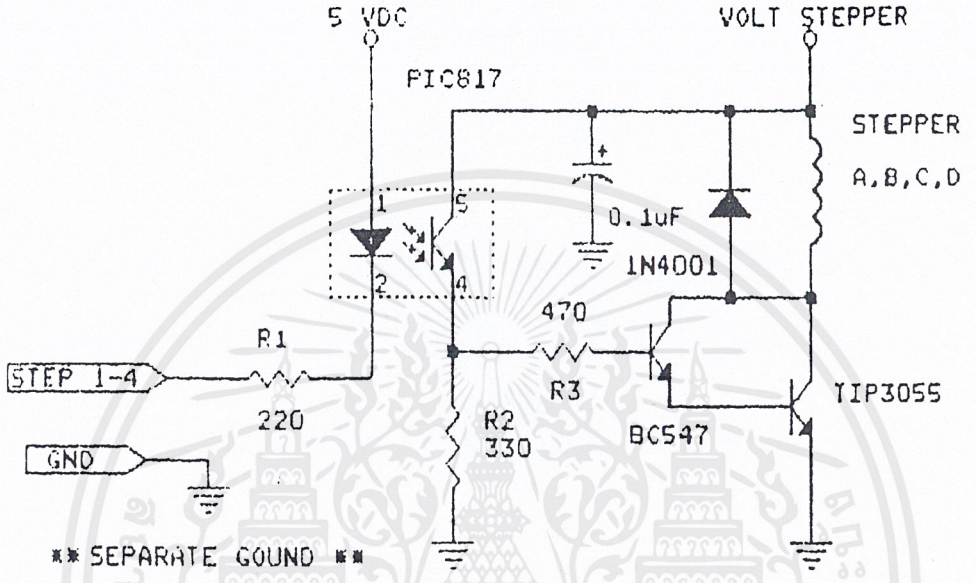
EX-STEPM เป็นบอร์ดที่ใช้ขับสเตปมอเตอร์ สามารถใช้กับมอเตอร์ที่ต้องการกระแสสูงสุดถึง 5 แอมแปร์ ภายในบอร์ดมีขั้วต่อสำหรับขับสเตปมอเตอร์ทั้ง 4 จุด(4 เฟส คือเฟส A,B,C และ D) และขั้วไฟบวกลบเพื่อป้อนแรงดันใช้งานของมอเตอร์ สำหรับชุดจ่ายไฟของสเตปมอเตอร์กับชุดจ่ายไฟของสวิทซ์อินพุท จะแยกอิสระจากกันจึงช่วยตัดปัญหาในเรื่องสัญญาณรบกวน และปัญหาอื่นๆ ที่จะเข้ามารบกวนกับระบบควบคุมของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูป 3.16 แผงวงจรของบอร์ด EX-STEPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของวงจรขับมอเตอร์นั้นจะใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BC547 ต่อดาร์ลิงตันกับทรานซิสเตอร์เบอร์ TIP3055 เพื่อขยายสัญญาณกระแสที่จะป้อนให้กับมอเตอร์

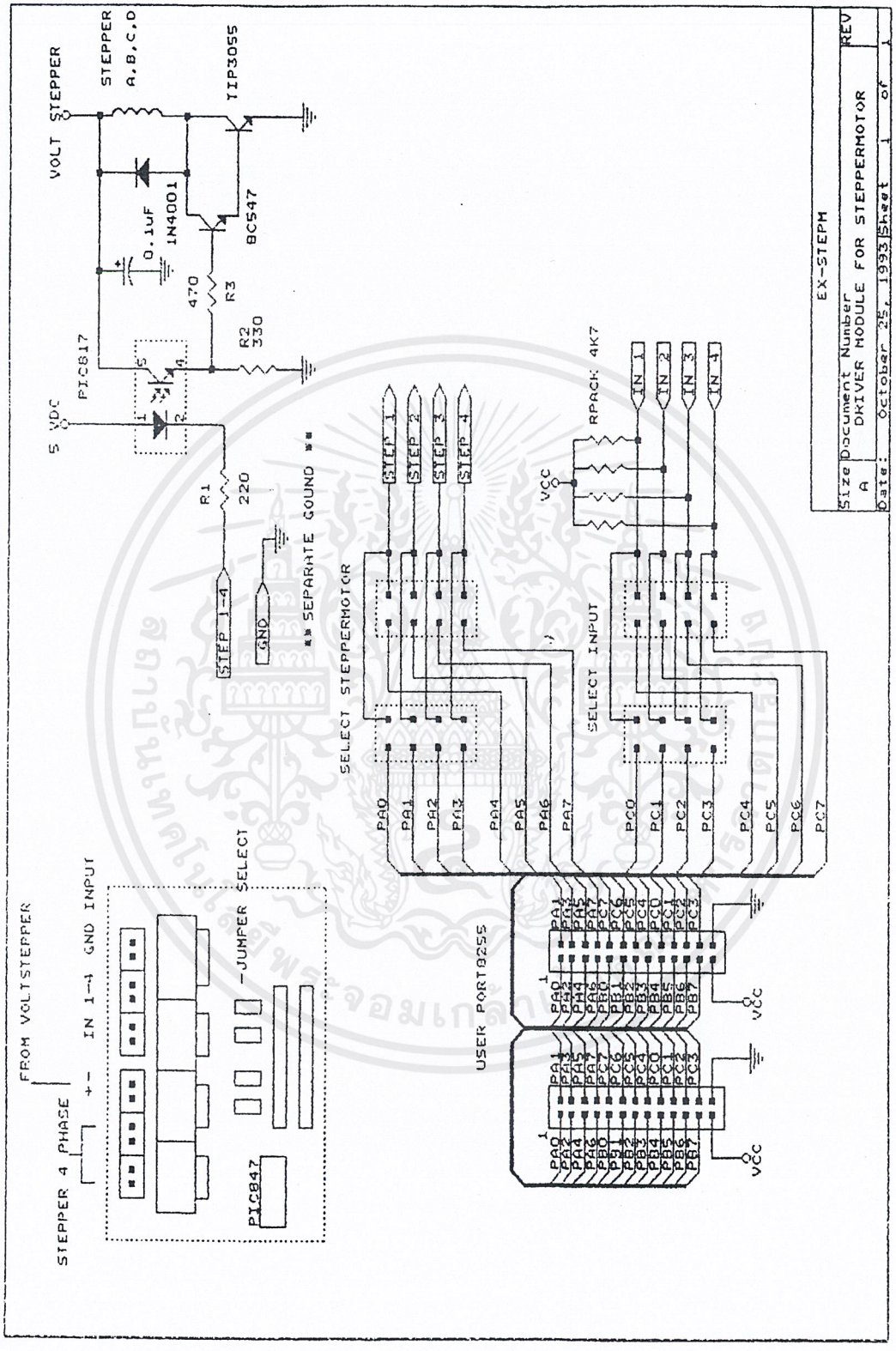


รูป 3.17 ส่วนของวงจรขับมอเตอร์บนบอร์ด EX-STEPM

การเลือกพอร์ทที่จะใช้งานของบอร์ด EX-STEPM สามารถเลือกได้โดยการปรับจั้มเปอร์ (Jumper) ตามรูปที่แสดงตำแหน่งต่างๆบนบอร์ด

จากคุณสมบัติต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถนำบอร์ดนี้มาประยุกต์ใช้ในการขับมอเตอร์ดีซีได้ โดยขั้วต่อสเตป 1 เฟส จะขับมอเตอร์ดีซีได้ 1 ตัว โดยนำขั้วไฟบวกของมอเตอร์ต่อเข้ากับเฟสใดเฟสหนึ่งของบอร์ด(เช่นเฟส A)และขั้วไฟลบของมอเตอร์ต่อเข้ากับขั้วไฟลบของบอร์ด จากนั้นนำแหล่งจ่ายไฟตรงต่อเข้ากับขั้วบวกและลบของบอร์ด
จากวิธีที่กล่าวมาจะพบว่าเราสามารถใช้บอร์ดนี้ขับมอเตอร์ได้ถึง 4 ตัว(1 ตัวต่อ 1 เฟส) จากนั้นก็ป้อนสัญญาณดิจิตอลผ่านพอร์ต 8255 เราจะสามารถกำหนดระยะเวลาที่จะให้มอเตอร์ตัวนั้นๆ ทำงานโดยกำหนดที่ความยาวของพัลซ์ที่ส่งให้กับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

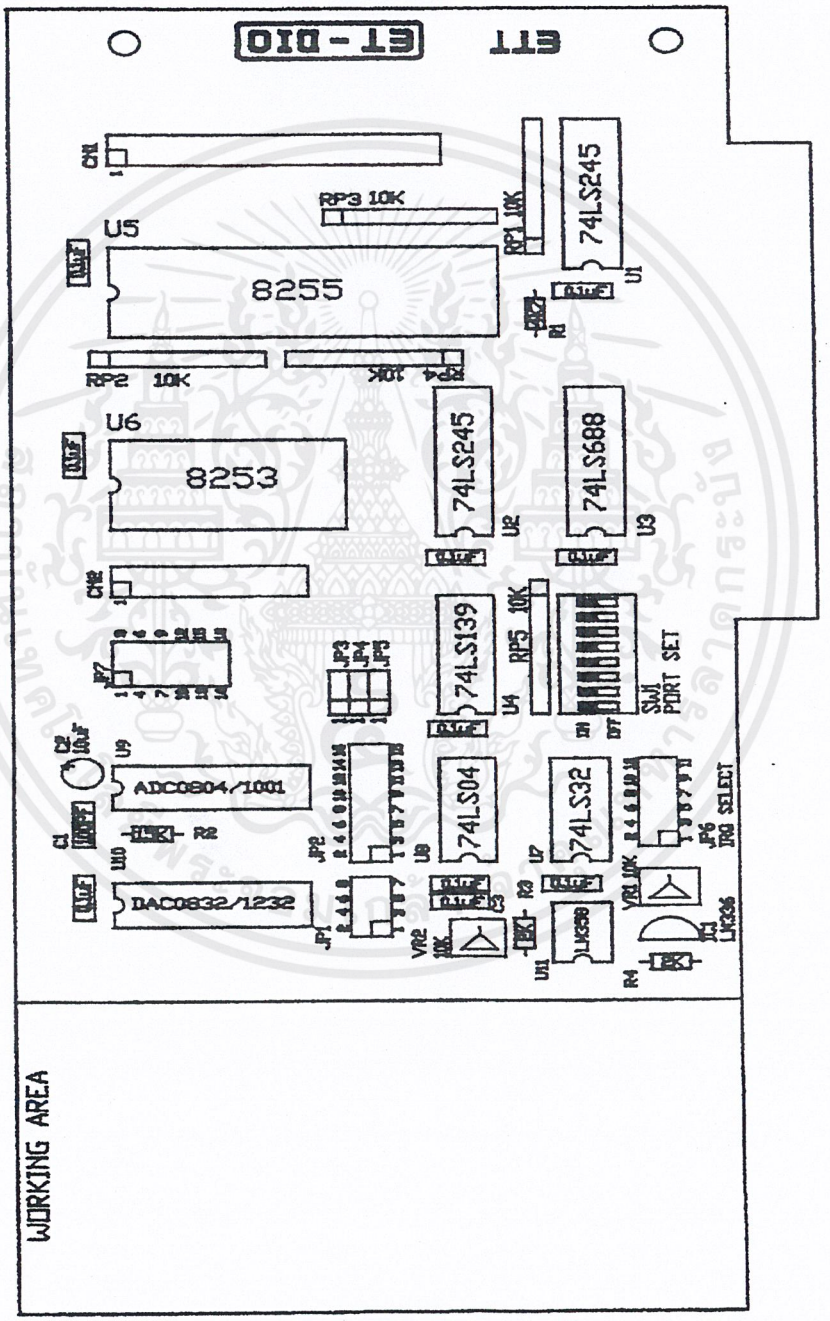


รูป 3.18 แผงวงจรของบอร์ด EX-STEPM (Schemetics)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 บอร์ดอินเตอร์เฟส

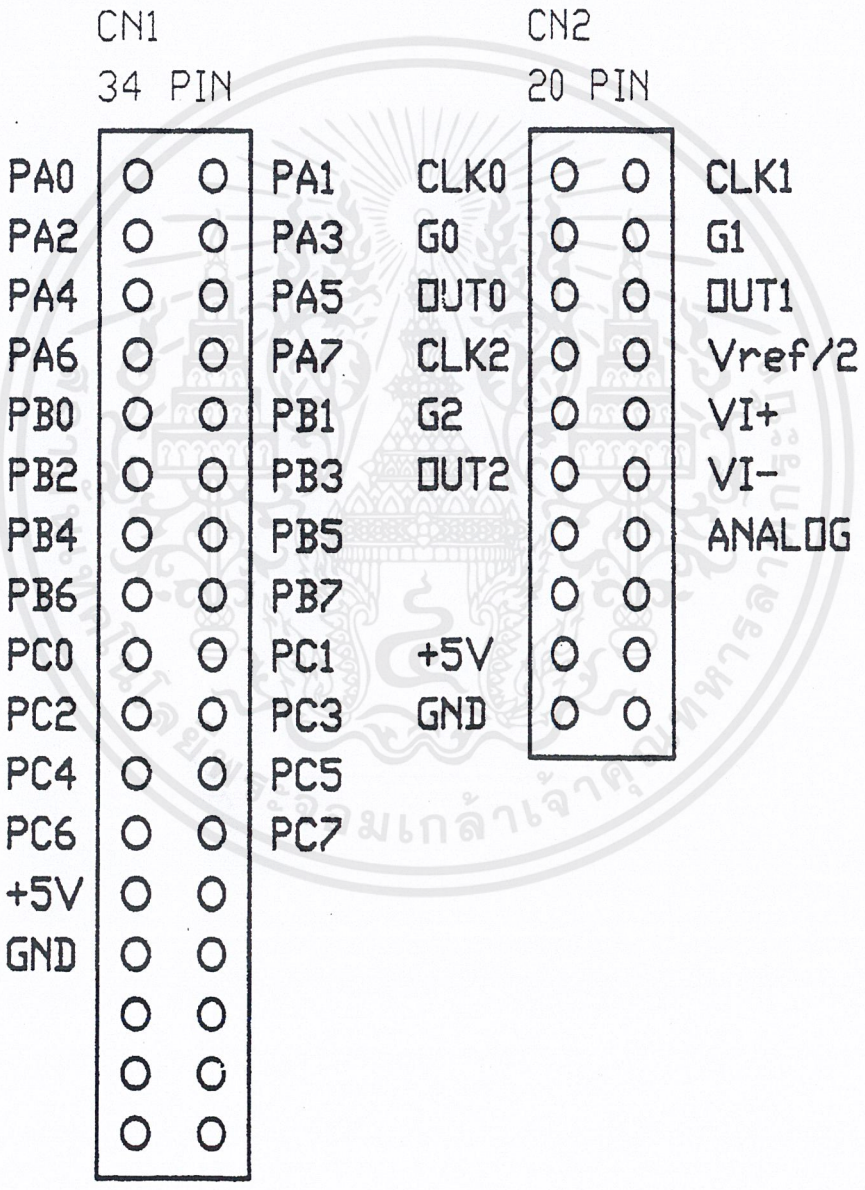
บอร์ดอินเตอร์เฟสที่จะนำมาใช้ในการเชื่อมต่อการส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์พีซี(ที่เราจะใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์กับวงจรขับมอเตอร์ เราจะใช้การ์ดอินเตอร์เฟส ET-PCDIO ของบริษัท อีทีที จำกัด



รูปที่ 3.19 แผงวงจรของบอร์ด ET-PCDIO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่อบอร์ดทำได้โดยเสียบบอร์ดอินเตอร์เฟสนี้เข้ากับสล็อต ISA ของคอมพิวเตอร์พีซี จากนั้นต่อสายแพร์จากพอร์ท 8255 ของบอร์ดวงจรขับมอเตอร์มายังพอร์ท CN1 บนบอร์ดอินเตอร์เฟส จากนั้นก็ให้โปรแกรมทำหน้าที่ประมวลผลตำแหน่งของวัตถุบนพื้นจากไฟล์ภาพ .JPG แล้วส่งสัญญาณไปที่พอร์ต P_0-P_3 เพื่อส่งสัญญาณให้วงจรขับมอเตอร์ไปขับมอเตอร์ตามเฟสต่างๆ ของวงจรขับมอเตอร์นั่นคือ เฟส A-D นั่นเอง ส่วนการใช้งานและส่วนประกอบอื่นๆของบอร์ดอินเตอร์เฟสแสดงอยู่ในภาคผนวก



รูปที่ 3.20 ขาต่างๆของพอร์ทเอาท์พุทของบอร์ดอินเตอร์เฟส ET-PCDIO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กล้องวีดีโอ(เซนเซอร์)

กล้องวีดีโอที่ใช้จะเป็นกล้องวีดีโอที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์พีซีผ่านพอร์ทยูเอสบี (USB Port) กล้องวีดีโอนี้เป็นกล้องวีดีโอที่สามารถจับภาพเคลื่อนที่และแคปเจอร์ภาพนิ่ง(capture) ได้

ในการทดลองเราจะให้กล้องวีดีโอสแกนภาพบนระนาบพื้นที่ต้องการแล้วทำการแคปเจอร์ภาพนิ่งนั้น แล้วแปลงเป็นไฟล์ภาพ .JPG เพื่อส่งให้กับโปรแกรมปาสคาลทำการประมวลผลต่อไป

3.5 การโปรแกรม

เราจะใช้โปรแกรมภาษาปาสคาลในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของแขนกล โดยเขียนโปรแกรมส่งสัญญาณในการขับมอเตอร์ผ่านออกทางพอร์ต P_0-P_3 ของพอร์ตเอาท์พุทของการ์ดอินเตอร์เฟส ส่วนความยาวของช่วงเวลาของพัลซ์จะเป็นตัวกำหนดความยาวของการทำงานของดีซีมอเตอร์ ตัวอย่างของการเขียนโปรแกรมปาสคาลแสดงอยู่ในภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลอง

4.1.1. <u>การเชื่อมต่อและการติดตั้งอุปกรณ์</u>

เริ่มจากการเชื่อมต่อต่างๆเข้าด้วยกันตามรูปที่ 1(หน้า 1) เริ่มจากการเชื่อมต่อแขนกลเข้ากับวงจรขับมอเตอร์ก่อน โดยต่อขั้วไฟบวกของมอเตอร์ทั้ง 3 ตัวและของโซลินอยด์อีกหนึ่งตัวกับเข้าเฟส A,B,C และ D ของวงจรขับมอเตอร์ โดยให้มอเตอร์หมุนไหล่ต่อเข้ากับเฟส A มอเตอร์ตัวที่หมุนข้อศอกต่อกับเฟส B มอเตอร์ตัวที่หมุนข้อมือต่อกับเฟส C และโซลินอยด์ต่อกับเฟส D แล้วต่อขั้วไฟลบของมอเตอร์เข้ากับขั้วไฟลบบนวงจรขับมอเตอร์ จากนั้นนำแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงปรับแรงดันเอาท์พุทเป็น 24 โวลท์ ต่อเข้ากับขั้วบวกและลบของวงจรขับมอเตอร์

จากนั้นทำการเชื่อมต่อบอร์ดอินเตอร์เฟสกับคอมพิวเตอร์พีซีที่เราจะใช้ในการโปรแกรมและประมวลผล โดยเสียบบอร์ดอินเตอร์เฟสเข้ากับสล็อต ISA บนเมนบอร์ดของคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการติดตั้งซอฟแวร์และตั้งค่าของเครื่องเพื่อเตรียมใช้งานต่อไป โดยปรับสวิทซ์บนบอร์ดให้ A8 กับ A9 อยู่ในตำแหน่ง ON ส่วน A0,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A10,A11 อยู่ในตำแหน่ง OFF เช่นนี้จะเป็นการกำหนดตำแหน่งแอดเดรสพอร์ทเอาท์พุท 8255 เริ่มที่ตำแหน่งแอดเดรส 300H

300H = Port A

301H = Port B

302H = Port C

303H = Control Port

ต่อไปก็ทำการต่อบอร์ดอินเตอร์เฟสกับวงจรขับมอเตอร์ โดยใช้สายแพร์เสียบจากพอร์ท 8255 บนวงจรขับมอเตอร์แล้วไปเสียบยังพอร์ท CN1 บนบอร์ดอินเตอร์เฟส

ทำการต่อกล้องวีดีโอเข้ากับพอร์ทยูเอสบี บนคอมพิวเตอร์พีซี

เตรียมฉากที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยระนาบพื้นซึ่งกำหนดให้เป็นสีขาวและวัตถุซึ่งกำหนดให้เป็นสีดำ

จากนั้นทำการเซ็ทค่าเริ่มต้นของโปรแกรม โดยเซ็ทคอนโทรลเวิร์ดให้กับบอร์ดอินเตอร์เฟส เช่น Port[$303]:=$80; เป็นการเซ็ทให้พอร์ทเอาท์พุทของ 8255 (Port A,Port B,Port C) ทำงานเป็นพอร์ทเอาท์พุททั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การทดลอง

เริ่มจากนำกล้องวีดีโอที่ใช้เป็นเซนเซอร์สแกนบนพื้นระนาบที่ต้องการเพื่อหาตำแหน่งวัตถุ โดยวัตถุเป็นสีดำพื้นเป็นสีขาว แล้วแคปเจอร์ภาพนิ่งเป็นไฟล์ .JPG จากนั้นใช้โปรแกรมปาสคาล ทำการเปิดไฟล์ภาพนี้(ใช้คำสั่งAssign)ซึ่งไฟล์ภาพจะเก็บค่าของสี 1 pixel ต่อ 1 บิท แล้วให้โปรแกรมทำการสแกนไฟล์ภาพนี้ทีละไบท์ไล่ไปเรื่อยๆ จากด้านซ้ายของภาพไปยังด้านขวาของภาพจนกว่าจะพบจุดที่เป็นวัตถุ เมื่อโปรแกรมสแกนจนพบส่วนที่เป็นพื้นจะแสดงเลข 1 ออกมาในแต่ละบิท ซึ่งหมายถึงเลข 255 ในระบบไบท์ เมื่อสแกนถึงตำแหน่งวัตถุ ก็จะแสดงเลข 0 ออกมา เมื่อทราบตำแหน่งวัตถุก็ให้โปรแกรมทำการส่งเอาท์พุทพัลซ์ไปยังพอร์ท P_0-P_3 (โดยใช้คำสั่งPort) ซึ่งเป็นพอร์ทเอาท์พุทของบอร์ดอินเตอร์เฟสที่เชื่อมต่อไปยังวงจรขับมอเตอร์ โดยเซ็ทบิทที่ต้องการส่งออกเป็น 0 เช่น จะส่งสัญญาณให้มอเตอร์ที่ต่อกับเฟส A ทำงานก็ต้องเซ็ทบิทดังนี้

```
Port[$300]:=$0E;
```

วงจรขับมอเตอร์ก็จะสั่งให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยใช้คำสั่งดีเลย์ (DELAY)ในการกำหนดความยาวของพัลซ์ที่จะส่งไป ซึ่งความยาวของพัลซ์ก็คือความยาวของเวลาที่จะทำให้มอเตอร์ทำงาน แขนกลจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งวัตถุตามต้องการ

4.2 ผลการทดลอง

เนื่องจากการควบคุมตำแหน่งของ มอเตอร์ทำได้โดยใช้การกำหนดความยาวของพัลซ์ที่ส่งออกไปให้กับพอร์ทเอาท์พุทของบอร์ดอินเตอร์เฟส ดังนั้นผลการทดลองจึงอยู่ในรูปของผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ไปตามความยาวของพัลซ์ซึ่งได้ว่า 1 รอบของมอเตอร์ จะมีความยาวของดีเลย์เท่ากับ 925(925 มิลลิวินาที) ถ้าต้องให้มอเตอร์หมุนไป 1 รอบ ก็ให้ใช้คำสั่ง

```
Port[$300]:=0E;
Delay(925);
```

ก็จะทำให้มอเตอร์ตัวที่ต่อกับเฟส A ของวงจรขับมอเตอร์หมุนไป 1 รอบ

โดยโปรแกรมจะแบ่งความละเอียดของระยะห่างระหว่างวัตถุกับจุดเริ่มต้นเป็น 3 ระดับคือ ระยะใกล้ ระยะกลาง และระยะไกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 ภาพตัวอย่างแสดงภาพวัตถุที่อยู่ระยะใกล้

รูปที่ 4.2 ภาพตัวอย่างแสดงภาพวัตถุที่อยู่ระยะกลาง

รูปที่ 4.3 ภาพตัวอย่างแสดงภาพวัตถุที่อยู่ระยะไกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ภาพวัตถุแล้ว นำมาสแกนในโปรแกรมปาสคาลโดยมีโปรแกรมดังนี้

```
PROGRAM SCAN;
USES CRT;
VAR  FILVAR:TEXT;
      C:CHAR;
      B:INTEGER;
      A:LONGINT;
      D:STRING;
      E:INTEGER;
BEGIN
   CLRSCR;
   ASSIGN(FILVAR,'C:\test1.BMP');
   RESET(FILVAR);
   WHILE NOT EOF(FILVAR) DO
    BEGIN
    READ(FILVAR,C);
    B:=ORD(C);
    A:=A+1;
    WRITE(A,':',B,' ');
    IF WHEREX >70 THEN WRITELN;
    IF WHEREY =25 THEN
     BEGIN
      READKEY;
      CLRSCR;
     END;
    END;
   CLOSE(FILVAR);
   READLN;
END.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมจะทำการสแกนจากซ้ายไปขวาของภาพ จะได้ผลที่แสดงบนหน้าจอดังนี้

1:66 2:77 3:222 4:0 5:0 6:0 7:0 8:0 9:0 10:0 11:62 12:0 13:0 14:0 15:4016:0 17:0 18:0 19:252 20:0 21:0 22:0 23:5 24:0 25:0 26:0 27:1 28:0 29:130:0 31:0 32:0 33:0 34:0 35:160 36:0 37:0 38:0 39:196 40:14 41:0 42:0 43:196 44:14 45:0 46:0 47:0 48:0 49:0 50:0 51:0 52:0 53:0 54:0 55:0 56:0 57:0 58:0 59:255 60:255 61:255 62:0 63:255 64:255 65:255 66:255 67:255 68:255 69:255 70:255 71:255 72:255 73:255 74:248 75:0 76:0 77:0 78:0 79:127 80:255 81:255 82:255 83:255 84:255 85:255 86:255 87:255 88:255 89:255 90:255 91:255 92:255 93:255 94:240 95:255 96:255 97:255 98:255 99:255 100:255 101:255 102:255 103:255 104:255 105:255 106:248 107:0 108:0 109:0 110:0 111:127 112:255 113:255 114:255 115:255 116:255 117:255 118:255 119:255 120:255 121:255 122:255 123:255 124:255 125:255 126:240 127:255 128:255 129:255 130:255 131:255 132:255 133:255 134:255 135:255 136:255 137:255 138:248 139:0 140:0 141:0 142:0 143:127 144:255 145:255 146:255 147:255 148:255 149:255 150:255 151:255 152:255 153:255 154:255 155:255 156:255 157:255 158:240 159:255 160:255 161:255 162:255 163:255 164:255 165:255 166:255 167:255 168:255 169:255 170:248 171:0 172:0 173:0 174:0 175:127 176:255 177:255 178:255 179:255 180:255 181:255 182:255 183:255 184:255 185:255 186:255 187:255 188:255 189:255 190:240 191:255 192:255 193:255 194:255 195:255 196:255 197:255 198:255 199:255 200:255 201:255 202:248 203:0 204:0 205:0 206:0 207:127 208:255 209:255 210:255 211:255 212:255 213:255 214:255 215:255 216:255 217:255 218:255 219:255 220:255 221:255 222:240

<u>หมายเหตุ</u> แสดงในลักษณะ ไบท์ที่ : ค่าของสี {255 คือสีพื้น(ขาว) และ 0 คือสีวัตถุ(ดำ)}

จากผลที่ได้จะพบว่าจุดสิ้นสุดของภาพทางด้านซ้ายมีค่าเป็น 240 แล้วนับจำนวนไบท์ที่เป็นตำแหน่งพื้นคือ 255 ว่ามีจำนวนเท่าใด จนไปถึงไบท์ที่เป็น 0 ซึ่งเป็นตำแหน่งวัตถุ จำนวนไบท์ที่นับได้ คือ จำนวนที่บอกว่าตำแหน่งวัตถุห่างจากขอบภาพด้านซ้ายเป็นจำนวนกี่ไบท์ ซึ่งในภาพตัวอย่างนี้จะพบว่าเป็น 13 ไบท์ จากนั้นทำการเขียนโปรแกรมให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังวัตถุตามต้องการ โดยมีโปรแกรมที่สมบูรณ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
PROGRAM CONTROL ARM;
USES CRT;
VAR  FILVAR:TEXT;
       C,D,F:CHAR;
       G,A,B,E:INTEGER;
BEGIN
   CLRSCR;
   ASSIGN(FILVAR,'C:\TEST1.BMP');  {ส่วนสแกนภาพ}
   RESET(FILVAR);
   REPEAT
     BEGIN
       READ(FILVAR,C);
       B:=ORD(C);
     END;
   UNTIL B=240;
   REPEAT
     BEGIN
        READ(FILVAR,D);
        E:=ORD(D);
        A:=A+1;
     END;
   UNTIL E=0;
   WRITELN('VALUE FROM LEFT SIDE OF PICTURE:',A);
   CLOSE(FILVAR);
   {ส่วนควบคุมแขนกล}
   IF A>=17 THEN  {เมื่อสแกนภาพได้ค่าไกล}
   BEGIN
   PORT[$303]:=$80;
   PORT[$300]:=$0F;
   port[$300]:=$0D;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
DELAY(1500);
PORT[$300]:=$0F;
port[$300]:=$0E;
DELAY(1000);
PORT[$300]:=$0F;
port[$300]:=$0B;
DELAY(750);
PORT[$300]:=$0F;
PORT[$300]:=$07;
READLN;

PORT[$300]:=$03;  {เคลื่อนที่กลับ}
DELAY(750);
PORT[$300]:=$07;
PORT[$300]:=$06;
DELAY(1000);
PORT[$300]:=$07;
PORT[$300]:=$05;
DELAY(1500);
PORT[$300]:=$07;
READLN;
PORT[$300]:=$03;
DELAY(250);
PORT[$300]:=$07;
READLN;
PORT[$300]:=$0F;
READLN;
PORT[$300]:=$0B;
DELAY(750);
PORT[$300]:=$0F;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
READLN;
END;
IF (17>A) AND (A>8) THEN ...{เมื่อสแกนภาพได้ค่ากลาง}
BEGIN
PORT[$303]:=$80;
PORT[$300]:=$0F;
port[$300]:=$0E;
DELAY(750);
PORT[$300]:=$0F;
port[$300]:=$0D;
DELAY(780);
PORT[$300]:=$0F;
port[$300]:=$0B;
DELAY(900);
PORT[$300]:=$0F;
PORT[$300]:=$07;
READLN;

PORT[$300]:=$03; {เคลื่อนที่กลับ}
DELAY(900);
PORT[$300]:=$07;
PORT[$300]:=$06;
DELAY(750);
PORT[$300]:=$07;
PORT[$300]:=$05;
DELAY(780);
PORT[$300]:=$07;
READLN;
PORT[$300]:=$03;
DELAY(250);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
PORT[$300]:=$07;
READLN;
PORT[$300]:=$0F;
READLN;
PORT[$300]:=$0B;
DELAY(750);
PORT[$300]:=$0F;
READLN;
END;
IF A<=8 THEN    {เมื่อสแกนภาพได้ค่าใกล้}
BEGIN
PORT[$303]:=$80;
PORT[$300]:=$0F;
port[$300]:=$0E;
DELAY(600);
PORT[$300]:=$0F;
port[$300]:=$0D;
DELAY(700);
PORT[$300]:=$0F;
port[$300]:=$0B;
DELAY(900);
PORT[$300]:=$0F;
PORT[$300]:=$07;
READLN;

PORT[$300]:=$03;   {เคลื่อนที่กลับ}
DELAY(900);
PORT[$300]:=$07;
PORT[$300]:=$06;
DELAY(600);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    PORT[$300]:=$07;
    PORT[$300]:=$05;
    DELAY(700);
    PORT[$300]:=$07;
    READLN;
    PORT[$300]:=$03;
    DELAY(250);
    PORT[$300]:=$07;
    READLN;
    PORT[$300]:=$0F;
    READLN;
    PORT[$300]:=$0B;
    DELAY(750);
    PORT[$300]:=$0F;
    READLN;
    END;
END.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ1. ลักษณะทั่วไปและการใช้งาน ET – DIO CARD

ET – DIO CARD เป็นลักษณะของ PC CARD ใช้เชื่อมต่อจากเครื่อง PC เพื่อขยายระบบอินพุทและเอาท์พุท ให้ใช้งานได้มากยิ่งขึ้น ET – DIO CARD สามารถที่จะรับสัญญาณอินพุทและให้สัญญาณเอาท์พุทออกมาได้ทั้งในรูปของ Analog และ Digital ทำให้มีความอ่อนตัวในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้นซึ่ง ET – DIO CARD มีอุปกรณ์ร่วมและมีจุดเด่นๆ ของตัวมันเองดังนี้

- มี ไอซี 8255 (Programmable Pheripheral Interface) จำนวน 1 ตัว ซึ่งสามารถที่จะใช้โปรแกรมให้เป็นได้ทั้งอินพุทและเอาท์พุทตามความต้องการของผู้ใช้เองได้ทั้งหมด 3 พอร์ต หรือ 24 บิต I/O ในรูปของสัญญาณ Digital นั่นเอง

- มีไอซี 8253 (Programmable Interval Timer) จำนวน 1 ตัว ทำให้ ET – DIO CARD สามารถที่จะประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับระบบฐานเวลาต่างๆ ได้มากมายเช่น

1. โปรแกรมให้ทำงานเป็นวงจรสร้างฐานเวลาแบบต่างๆ
2. โปรแกรมให้เป็นวงจรนับแบบต่างๆ
3. โปรแกรมให้เป็นวงจรสร้างสัญญาณ Interrupt ให้เครื่อง PC
4. โปรแกรมให้เป็นวงจรสร้างสัญญาณ Square Wave
5. โปรแกรมให้เป็นวงจรสร้างความถี่

ซึ่งใน IC 8253 นี้ มีโครงสร้างภายในให้ใช้งานถึง 3 แชนแนล และแต่ละแชนแนล ทำงานแยกจากกันอย่างอิสระ

- มีไอซี ADC (Analog to Digital) จำนวน 1 ตัว ซึ่งสามารถที่จะเลือกใช้ได้ถึง 2 เบอร์ คือ ADCO804 (8 บิต) หรือ ADC1001 (10 บิต) ซึ่งทำให้ ET – DIO CARD สามารถที่จะประยุกต์ใช้งานในการตรวจจับ หรือการวัดสัญญาณหรือรับสัญญาณอินพุทในรูปของสัญญาณ Analog ได้ 1 channal ซึ่งขนาดของสัญญาณ Analog ที่รับเข้ามาสามารถที่จะรับได้โดยตรงสูงถึง 5VDC หรือมากกว่าโดยเพิ่มวงจรขยายย่านวัดเข้าไปอีกเล็กน้อย ทำให้ ET – DIO CARD สามารถประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัดสัญญาณต่างๆ ได้มากมายเช่น

1. เครื่องวัดแรงดัน
2. เครื่องวัดกระแส
3. เครื่องวัดอุณหภูมิ
4. เครื่องวัดความต้านทาน
5. เครื่องวัดความจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลการวัดแบบต่างๆ สามารถที่จะนำมาเก็บเป็นแฟ้มข้อมูลหรือแสดงผลในรูปแบบอื่นๆ ได้ตามต้องการ โดยผู้ใช้เขียนโปรแกรมควบคุมเอง

- มีไอซี DAC (Digital to Analog Converter) จำนวน 1 ตัว ซึ่งสามารถเลือกได้ใช้ถึง 2 เบอร์ คือ DACO832 (8 บิต) หรือ DAC1232 (12 บิต) ซึ่งเลือกได้โดยการ Set Jumper JP1 (ดูรายละเอียดเรื่องการ Setup Jumper) ทำให้ ET – DIO CARD สามารถที่จะประยุกต์ใช้ในงานควบคุมต่างๆ โดยส่งสัญญาณในรูปของ Analog ออกไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งขนาดของสัญญาณ Analog มีวงจร OP – AMP เพื่อขยายขนาดของสัญญาณอยู่แล้วซึ่งผู้ใช้สามารถปรับขนาดของสัญญาณได้ตั้งแต่ 0 V – 10.66 VDC

- มีวงจรถอดรหัสตำแหน่งของพอร์ตที่จะใช้งาน ทำให้สะดวกในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพอร์ต ที่จะใช้งานได้ง่ายโดยการ SET DIP – SWITCH ทำให้มีความอ่อนตัวในการใช้งาน และสามารถที่จะนำ ET – DIO CARD ต่อร่วมกับเครื่อง PC ได้มากกว่า 1 CARD โดยกำหนดพอร์ตใช้งานที่แตกต่างกัน (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมเรื่องการ DECODE PORT)

- มี Working Areer มากถึง 5 CM x 9CM ทำให้มีพื้นที่ว่างใช้งานมากยิ่งขึ้น ทำให้ผู้ใช้สามารถที่จะประยุกต์ใช้งานต่อวงจรหรือเพิ่มเติมอุปกรณ์ต่างๆ ได้มากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ DECODE PORT

ตำแหน่งของพอร์ต บน ET – DIO CARD จะใช้ IC TTL 74LS688 (U3) 74LS139 (U4) 74LS32 (U7) SWITCH DIP – 8 (SW1) ต่อร่วมกันเป็นวงจร DECODE PORT โดยใช้ SWITCH1 เป็นตัวกำหนดเบอร์ พอร์ต ตามความต้องการของผู้ใช้ โดยใน ET – DIO CARD จะใช้ตำแหน่งของพอร์ต ทั้งหมด 12 พอร์ต คือ

XXOH	=	Port PA ของ 8255
XX1H	=	Port PB ของ 8255
XX2H	=	Port PC ของ 8255
XX3H	=	Port Control ของ 8255
XX4H	=	Port Counter 0 ของ 8253
XX5H	=	Port Counter 1 ของ 8253
XX6H	=	Port Counter 2 ของ 8253
XX7H	=	Port Control ของ 8253
XX8H	=	Port Control ของ DAC
XX9H	=	Port Control ของ DAC
XXAH	=	Port Control ของ ADC
XXBH	=	Port Control ของ ADC

เราสามารถที่จะกำหนดเบอร์พอร์ต ได้โดยการกำหนดระบบ Logic ให้กับตำแหน่ง ADDRESS นั้นๆ ตามความต้องการ ซึ่งบน ET – DIO CARD สามารถที่จะกำหนดระดับของ Logic ให้กับตำแหน่ง ADDRESS ใดๆ โดยใช้ SWITCH1 ซึ่งหาก ON SWITCH จะได้ระดับ Logic “0” หาก OFF SWITCH จะได้ระดับ Logic

ตัวอย่างเช่น ถ้าเราต้องการกำหนดตำแหน่ง Port ADDRESS เป็น 300H สามารถที่จะทำได้ดังนี้คือ

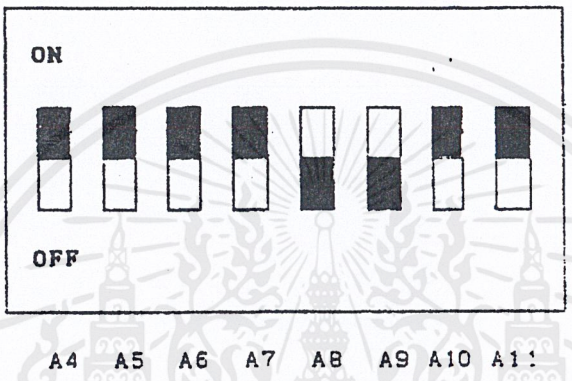
1. กำหนดระดับ Logic ให้กับ ADDRESS ต่างๆ ให้เท่ากับ 300H คือ

A11	A10	A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0
0	0	1	1	0	0	0	0	X	X	X	X
		3			**0**				**0**		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง Port 300H เราต้องให้ Logic "1" กับตำแหน่ง ADDRESS A8, A9 และต้องให้ Logic "0" กับ ADDRESS A11 , A10 , A7 , A6 , A5 , A4 (ซึ่ง A4 – A11 ถูกต่อไว้กับ Dip – Switch SW1) ส่วน A0 – A3 ถูก DECODE ด้วยไอซี 74LS139 อีกทีหนึ่ง ดังนั้น SW1 จึงมีหน้าเลือก ADDRESS เพียงสองหลักเท่านั้น

2. SET SWITCH เพื่อกำหนด Logic ให้ตำแหน่ง ADDRESS ตามข้อ 1



ซึ่งเมื่อเรากำหนดให้ ET – DIO CARD มีค่าตำแหน่งเท่าใดแล้วการใช้งานอุปกรณ์ใดๆ บน ET – DIO CARD ต้องอ้างตำแหน่งนั้นๆ เสมอ เช่น เรากำหนดให้ ET – DIO CARD ทำงานที่ตำแหน่ง 300H (ON SWITCH ที่ตำแหน่ง 1, 2 , 3 , 4 , 7 , 8 และ OFF SWITCH ที่ตำแหน่ง 5 , 6) จะมีผลทำให้เบอร์ Port เป็นดังนี้คือ

300H	=	Port PA ของ 8255
301H	=	Port PB ของ 8255
302H	=	Port PC ของ 8255
303H	=	Port Control ของ 8255
304H	=	Port Counter 0 ของ 8253
305H	=	Port Counter 1 ของ 8253
306H	=	Port Counter 2 ของ 8253
307H	=	Port Control ของ 8253
308H	=	Port Control ของ DAC
309H	=	Port Control ของ DAC
30AH	=	Port Control ของ ADC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30BH = Port Control ของ ADC

<u>การใช้งาน 8255 (Programmable Pheripheral Interface)</u>

ไอซี 8255 (Programmable Pheripheral Interface) เป็นไอซี ประกอบด้วยพอร์ตใช้งานถึง 3 พอร์ต และพอร์ตควบคุม (CONTROL PORT) อีก 1 พอร์ต รวมเป็น 4 พอร์ต ซึ่งไอซี 8255 สามารถที่จะโปรแกรมให้เป็นได้ทั้งอินพุทและเอาท์พุทได้ทั้ง 3 พอร์ต หรือ 24 บิต 1/0 โดยการกำหนดที่พอร์ตควบคุมเพื่อกำหนดการทำงาน 8255 ซึ่งมีรายละเอียดและตัวอย่างการโปรแกรมดังนี้คือ

DO ใช้สำหรับกำหนดการทำงานของพอร์ต C ล่าง (PC0 – PC3) คือ

ถ้าเป็น 1 หมายถึงให้เป็น Input

ถ้าเป็น 0 หมายถึงให้เป็น Output

D1 ใช้สำหรับกำหนดการทำงานของพอร์ต B (PB0 – PB7) คือ

ถ้าเป็น 1 หมายถึงให้เป็น Input

ถ้าเป็น 0 หมายถึงให้เป็น Output

D2 ใช้สำหรับกำหนดการทำงานของพอร์ต C ล่าง และพอร์ต B คือ

ถ้าเป็น 0 หมายถึงให้พอร์ต C ล่างและพอร์ต B ทำงานในโหมด 0

ถ้าเป็น 1 หมายถึงให้พอร์ต C ล่างและพอร์ต B ทำงานในโหมด 1

D3 ใช้สำหรับกำหนดการทำงานของพอร์ต C บน (PC4 – PC7) คือ

ถ้าเป็น 1 หมายถึงให้เป็น Input

ถ้าเป็น 0 หมายถึงให้เป็น Output

D4 ใช้สำหรับกำหนดการทำงานของพอร์ต A (PA0 – PA7) คือ

ถ้าเป็น 1 หมายถึงให้เป็น Input

ถ้าเป็น 0 หมายถึงให้เป็น Output

D6 , D5 ใช้สำหรับกำหนดโหมดการทำงานของพอร์ต C บนและพอร์ต A คือ

ถ้าเป็น 00 หมายถึงให้พอร์ต C บนและพอร์ต A ทำงานในโหมด 0

ถ้าเป็น 01 หมายถึงให้พอร์ต C บนและพอร์ต A ทำงานในโหมด 1

ถ้าเป็น 1X หมายถึงให้พอร์ต C บนและพอร์ต A ทำงานในโหมด 2

D7 ใช้สำหรับกำหนด MODE SET FLAG คือ

ถ้าเป็น 1 หมายถึง ACTIVE ซึ่งต้องกำหนดให้บิทนี้เป็น 1 เสมอ

ถ้าเป็น 0 หมายถึง NON – ACTIVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่น เราต้องการให้ทั้ง 3 พอร์ต ของ 8255 (PA , PB , PC) เป็นเอาท์พุททั้งหมดจะได้ Control Word Code ดังนี้คือ

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
1	0	0	0	0	0	0	0
8				**0**			

ดังนั้นจะได้ Control Word Code = 80H

เมื่อได้ Control Word Code แล้วการโปรแกรมให้ 8255 ทำงานตาม Control Word Code ก็เพียงแต่ส่งค่า Control Word Code ไปยังพอร์ตควบคุม (Control Port) การโปรแกรมจะทำเพียงครั้งเดียวเท่านั้น

ตัวอย่างเช่น เราเลือกแอดเดรสของ ED – DI0 CARD ไว้ที่ 300H จะได้ตำแหน่งพอร์ต ดังนี้คือ

300H = Port PA ของ 8255
301H = Port PB ของ 8255
302H = Port PC ของ 8255
303H = Port Control ของ 8255
(ดูรายละเอียดเพิ่มเติมเรื่องการ DECODE PORT)

การโปรแกรมได้โดยการส่งค่า Control Word Code (ในที่นี้คือ 80H) ให้พอร์ตควบคุม (ในที่นี้คือ 303H)

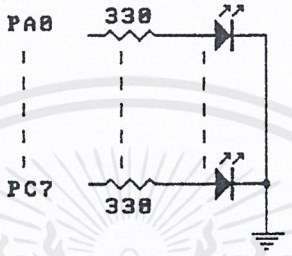
ตัวอย่างการโปรแกรมด้วยภาษา PASCAL คือ

```
Port [S303] : = S80;          Port [S303] : = S80;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างโปรแกรม

โปรแกรมที่ 1 เป็นตัวอย่างโปรแกรมทดสอบการทำงานของไอซี 8255 โดยกำหนดให้ไอซี 8255 ทำงานในโหมด 0 และกำหนดให้ทุกพอร์ต (PA , PB และ PC) เป็นเอาท์พุททั้งหมดทุกบิท การขับเอาท์พุทของไอซี 8255 ในโปรแกรมนี้ให้แสดงผลโดยหลอดแสดงผล LED ในรูปลักษณะของไฟวิ่งการทดสอบโปรแกรมผู้ใช้ต้องต่อหลอดแสดงผล LED และตัวต้านทานตามวงจร

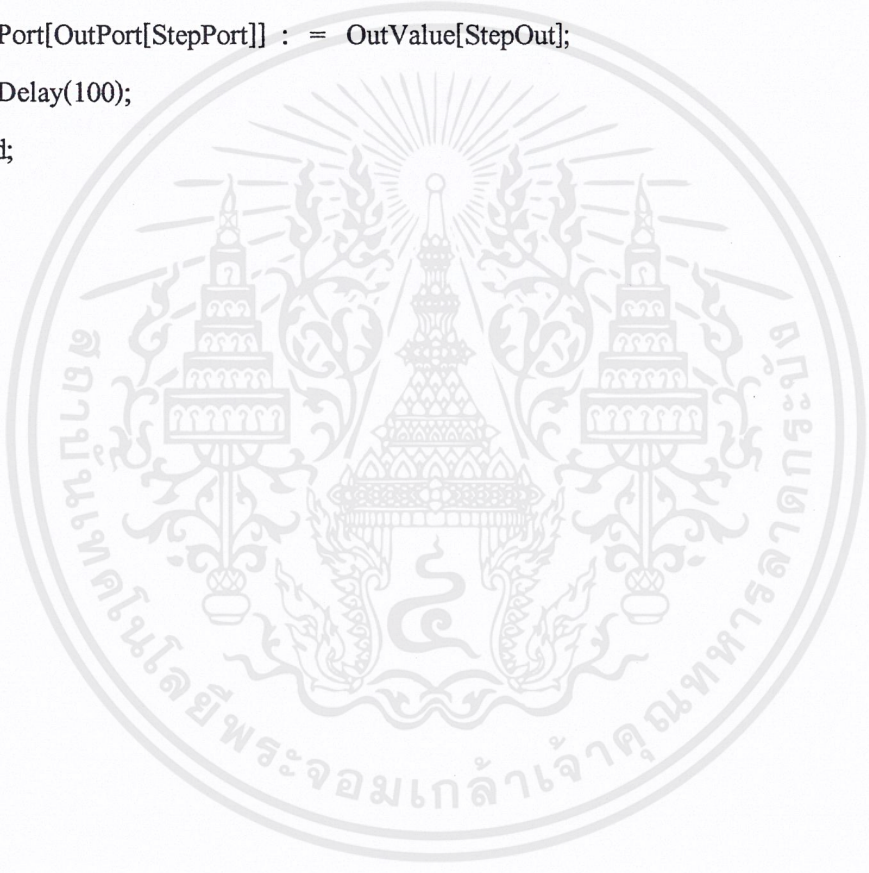


การทำงานของโปรแกรม เริ่มจากการควบคุมให้หลอดแสดงผล LED ติด – ดับ ในลักษณะของไฟวิ่งแบบต่างๆ โดยทำทีละพอร์ต คือ เริ่มจากพอร์ต PA ก่อน เมื่อเสร็จแล้วจึงเปลี่ยนไปพอร์ต PB และพอร์ต PC ตามลำดับ

```
Program TestOut8255;
{ทดสอบการทำงานของ Ic 8255 โดยให้ Ic 8255 ขับหลอดแสดงผล LED เป็นโปรแกรมไฟวิ่ง ทั้ง
3 Port โดยให้ ET – DIO CARD ทำงานที่ Port 300H}
Uses Crt;

Var         StepPort    : integer;
            StepOut     : interger;

Type        DataOut     = Array [1 . . 24] of interger;
            PortNo      = Array [1 . . 3] of interfer;

Const       OutValue : DataOut = ($01,$02,$04,$08,$10,$20,$40,$80,
                                  $C0,$E0,$F0,$F8,$FC,$FE,$FF,$7E,
                                  $3C,$18,$00,$18,$3C,S7E,$FF,$00);
                                 {กำหนดการ ติด – ดับ ของ LED ทั้ง 8 Bits}
            OutPort  : PortNo   = ($300,$301,$302};

Begin
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Port [$303] : =   {กำหนด Control Word Code ให้ Control Port
                       ของ 8255 โดยกำหนดให้เป็น OUTPUT ทั้ง 3 Port}

For StepPort : =  1 to 3 do
    Begin
        For StepOut : = 1 to 24 do
        Begin
            Port[OutPort[StepPort]] : = OutValue[StepOut];
            Delay(100);
        End;
    End;
End.
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ2. โปรแกรมตัวอย่างของบอร์ด EX-STEPM

```
;FILENAME ..... EXSTEPM.ASM
;DESCRIPTION      DEMO  PROGRAM
;HARDWARE         JAZZ – 31  +  EX – STEPM BOARD
USER        EQU          OFCOOH
UBEEP       EQU          OOA5H                    ;UBEEP SUB
;# ######### COMMENT ############
; THIS EXAMPLE PROGRAM ROTATE TYPE SINGLE – STEP
; DEFAULT SETTING POINT :-
; PORT SELECT
;       INPUT     = PCO – 3
;       OUTPUT    = PAO – 3
            ORG         8000H
            MOV         DPTR , #USER + 3
            MOV         A, #89H                  ;A=I  B=I  C=I
            MOVX        @DPTR , A
MAIN:       MOV         DPTR , #USER + 2
            LCALL       KEYP
            CJNE        A , #OEH , $ + 6
            LCALL       DRVL
            CJNE        A , #ODH , $ + 6
            LCALL       DRVR
            CJNE        A , #OBH , $ + 6
            LCALL       DRVL
            CJNE        A , #O7H , $ + 6
            LCALL       DRVR
            LJMP        MAIN


DRVL:       LCALL       UBEEP
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
DRVL1:  MOV     DPTR , #USER
        MOV     RO , #4
        MOV     R1 , #1
        LCALL   DELAY
        DJNZ    RO , DRVL2
        MOV     DPTR , #USER + 2
        MOVX    A , @DPTR
        ANL     A , #OFH
        CJNE    A , #OFH , DRVL3
        LJMP    DRVL1
DRVL3:  RET
DEVR:   LCALL   UBEEP
DRVR1:  MOV     DPTR , #USER
        MOV     RO , #4
        MOV     R1 , #8
DRVR2:  MOV     A , R1
        MOVX    @DPTR , A
        RR      A
        MOV     R1 , A
        LCALL   DELAY
        DJNZ    RO , DRVR2
        MOV     DPTR , #USER+2
        MOVX    A , @DPTR
        ANL     A , #OFH
        CJNE    A , #OFH , DRVR3
        LPJM    DRVR1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
DRVR3:      RET
KEYP:       MOVX        A , @DPTR
            ANL         A , #OFH
            CJNE        A , #OFH , KEYP1
            SJMP        KEYP
KEYP1:      MOV         R1 , #0
            DJNZ        R1 , $
            MOVX        A , @DPTR
            ANL         A , #OFH
            CJNE        A , #OFH , KEYP2
            SJMP        KEYP
KRYP2:      RET
; ######## DELAY SUB ########
DELAY:      MOV         R7 , #O
            MOV         R6 , #O
            DJNZ        R6 , $
            DJNZ        R7 , $-4
            RET
            END
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้กำเนิดเราทั้งสองคนมาและคอยเป็นกำลังใจให้เสมอ

ขอบพระคุณอาจารย์ที่ภาคทุกท่านที่สอนวิชาพวกเรามาจนมีความรู้ทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอบพระคุณ อ. สุมิตร พนาอุดมทรัพย์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา สำหรับคำปรึกษาและความคิดที่ใช้ทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณน้องแก้ว ที่ช่วยวาดรูปและให้กำลังใจ

ขอขอบคุณดิ๊ง อร บิ๊ก และเพื่อนๆในภาค สำหรับคำแนะนำ ข้อมูล และแรงเชียร์

ขอขอบคุณพี่เอก รุ่น 35 สำหรับคำปรึกษาเรื่องมอเตอร์

ขอขอบคุณพี่จิ๋ม พี่เล็ก พี่แหลม และน้าหมวย ที่ช่วยพิมพ์และสแกนรูปให้

ขอขอบคุณพี่ที่สโตร์ ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องเครื่องมือ

ขอขอบคุณพี่โก้ ที่ภาคเครื่องกล สำหรับคำปรึกษาและช่วยแนะนำอุปกรณ์ในการทำฮาร์ดแวร์

ขอขอบคุณช้อปภาคเครื่องกล ที่ทำให้ฮาร์ดแวร์เสร็จได้

ขอขอบคุณน้องๆชุมนุมประชาสัมพันธ์ ที่คอยเตือนให้พวกเราทำวิทยานิพนธ์และให้กำลังใจ

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้พวกเราเรียน ได้รับความรู้ และได้สำเร็จการศึกษาจากที่นี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. รศ.ดร. โยธิน เปรมปราณีรัชต์, " ระบบเซอร์โวและอิเลคทรอนิกส์คอนโทรลมอเตอร์ ", สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , พ.ศ. 2533 , หน้า 1-17 , 355-386

2. รศ.ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ, " เครื่องจักรกลไฟฟ้า", บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, หน้า 117-161

3. คู่มือการใช้บอร์ด "EX-SERIES", บริษัท ศิลารีเสิร์ช จำกัด

4. คู่มือการใช้บอร์ด "ET-PCDIO" , บริษัท อีทีที จำกัด

5. Robert J. Schilling , " Fundamental of Robotics Analysis & Control " , Prentice Hall , 1990 , P.1-90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้