

การเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์



นายยศ ด้านสกุล

รศ.  
ช. 125 17  
2547

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน... **61909**  
วัน,เดือน,ปี... **24 ก.ค. 2549**

b. **11605303**  
i. ....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 2D LASER PROJECTOR PROGRAMMING CONTROL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRSBANG  
ACADEMIC YEAR 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การเขียน โปรแกรมเพื่อควบคุมเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์  
2D LASER PROJECTOR PROGRAMMING CONTROL

นักศึกษา

นายชยศ ด่านสกุล รหัสประจำตัว 44010801

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

(อาจารย์พลชัย โชติปราชญ์กุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์
นักศึกษา	นายชยศ คำนสกุล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	อาจารย์พลชัย โชติปราชญกุล

### บทคัดย่อ

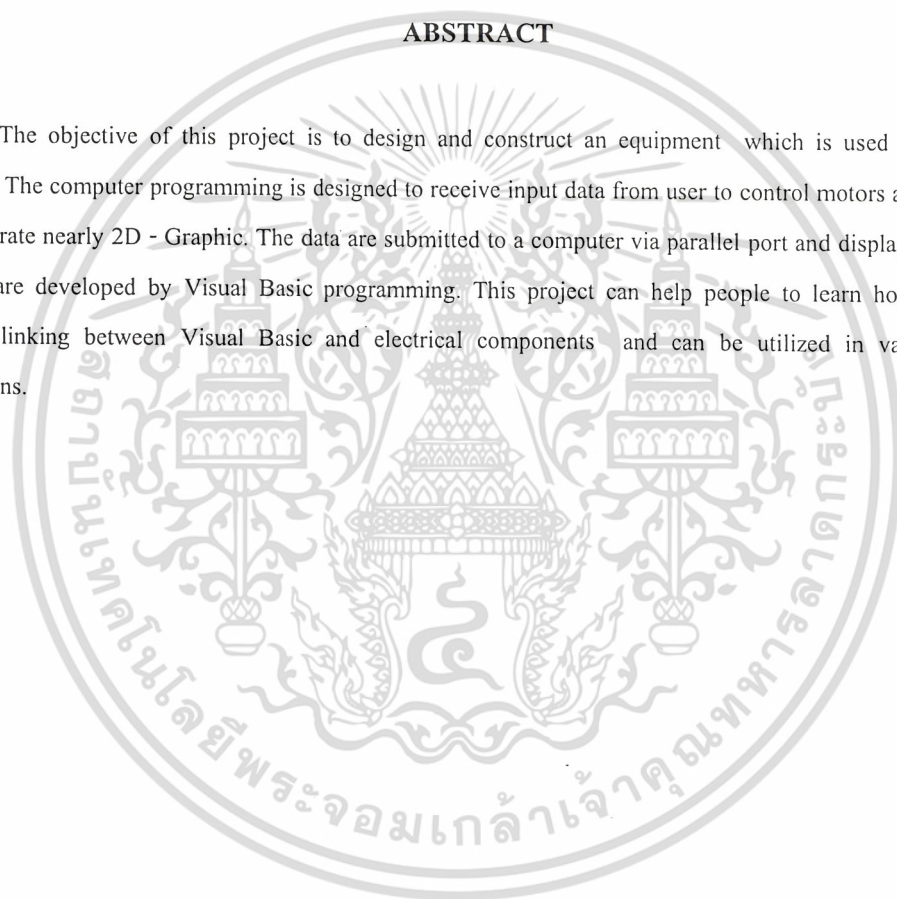
ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์ โดยอาศัยหลักการสะท้อนของแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิด ด้วยกระจกเงา 2 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะทำการติดตั้งไว้กับมอเตอร์สำหรับควบคุมทิศทางเพื่อควบคุมตำแหน่งของแสงเลเซอร์บนระนาบ มอเตอร์ที่ใช้นั้นกำหนดให้เป็นสเต็ปมอเตอร์ โดยคำนึงถึงความสามารถในการควบคุมการเคลื่อนที่เป็นจังหวะของมอเตอร์ และกระจกเงาทั้ง 2 ชั้นนี้จะแยกการทำงานเพื่อกำหนดตำแหน่งในแต่ละแกนบนระนาบการทำงาน ลักษณะของภาพที่แสดงบนระนาบการทำงานนั้น จะอยู่ในรูปแบบที่ใกล้เคียงกับภาพกราฟฟิกเชิงเส้น 2 มิติ เกิดจากการเคลื่อนที่ของจุด และทำการควบคุมการทำงานทั้งหมดด้วยคอมพิวเตอร์ การติดต่อระหว่างเครื่องฉายภาพกับโปรแกรมควบคุมทำได้โดยอาศัยการติดต่อผ่านทางพอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์และวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เข้าช่วยในการสั่งงาน ส่วนของโปรแกรมที่เลือกนำมาใช้ในการควบคุม ใช้โปรแกรม Visual Basic เขียนขึ้นมาทำการควบคุมอุปกรณ์ทุกชิ้นให้ทำงานโดยสัมพันธ์กันเพื่อให้ได้ลักษณะภาพตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Laser Projector Programming Control
<b>Student</b>	Mr. Yongyos Dansakun
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering in Industrial engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
<b>Academic Year</b>	2004
<b>Thesis Advisor</b>	Mr. Pholchai Chotiprayanakun

### ABSTRACT

The objective of this project is to design and construct an equipment which is used to control laser projector. The computer programming is designed to receive input data from user to control motors and laser pointer then generate nearly 2D - Graphic. The data are submitted to a computer via parallel port and display to the monitor by software developed by Visual Basic programming. This project can help people to learn how to develop a program linking between Visual Basic and electrical components and can be utilized in various industrial applications.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรเรื่อง การเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ส่งผลให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

อาจารย์พลชัย โชติปราชญกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาบัตรฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกๆด้านตลอดเวลาที่ผ่านมา

รศ.พรศักดิ์ อรรถวานิช หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำ ความเอาใจใส่และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดระยะเวลาของการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ผศ.ดร.สรพลทิพย์ ลิ้มนรินทร์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำ กำลังใจในการทำงาน ความเอาใจใส่ ความช่วยเหลือในทุกๆด้านและทุกสิ่งทุกอย่างตลอดระยะเวลาของการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือทุกๆด้านในการจัดทำปริญญาบัตรฉบับนี้

อาจารย์เชาวลิต หามนตรี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือทุกๆด้าน ตลอดระยะเวลาของการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ครอบครัวและเพื่อนๆทุกคน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับความช่วยเหลือ และคอยเป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่ง จนทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นายยงยศ ด่านสกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 สเต็ปมอเตอร์.....	2
2.1.1 คุณสมบัติของสเต็ปมอเตอร์.....	2
2.1.2 คุณลักษณะของสเต็ปมอเตอร์.....	2
2.1.3 แรงบิด.....	3
2.1.4 ชนิดของสเต็ปมอเตอร์และการทำงาน.....	3
2.1.5 โหมดการทำงานของสเต็ปมอเตอร์.....	8
2.1.6 วิธีการกระตุ้นเฟส.....	9
2.1.7 การควบคุมสเต็ปมอเตอร์.....	10
2.1.8 วงจรขับ (Drive Circuit).....	11
2.1.9 วงจรควบคุมมอเตอร์ (Motor Control Circuit).....	11
2.2 การติดต่อกับคอมพิวเตอร์.....	13
2.2.1 การติดต่อกับพอร์ตขนาน.....	13
2.2.2 วิธีการแก้ไขค่าแอดเดรสของการ์ด.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 เลเซอร์.....	15
2.3.1 ชนิดของเลเซอร์.....	16
2.3.2 ประโยชน์ของเลเซอร์ไดโอด.....	19
2.3.3 การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์.....	20
2.4 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่โดยวิธี Inverse Kinematics.....	24
2.4.1 การวิเคราะห์โดยวิธีทางเมทริกซ์ (Matrix Method of Analysis).....	24
2.4.2 การแปลงพิกัดร่วมโดยใช้เมทริกซ์แปลงค่า (Homogeneous Coordinate Transformer).....	25
<b>บทที่ 3</b> <b>วิธีการดำเนินงาน</b>	
3.1 การวางแผนการดำเนินงาน.....	28
3.2 แผนการทำงานและสร้างเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์พร้อมโปรแกรมควบคุมการทำงาน.....	28
3.2.1 การทำงานในส่วนของฮาร์ดแวร์.....	30
3.2.2 การทำงานในส่วนของวงจรควบคุม.....	32
3.2.3 การทำงานในส่วนของโปรแกรมที่ใช้ติดต่อและควบคุมการทำงาน.....	34
<b>บทที่ 4</b> <b>ผลการดำเนินงาน</b>	
4.1 ผลการดำเนินงานด้านฮาร์ดแวร์.....	35
4.2 ผลการดำเนินงานด้านวงจรควบคุมการทำงาน.....	36
4.3 ผลการดำเนินงานด้านโปรแกรมควบคุมการทำงาน.....	37
<b>บทที่ 5</b> <b>สรุปและวิเคราะห์การดำเนินงาน</b>	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	39
5.2 ข้อดีของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์และโปรแกรมควบคุมการทำงาน.....	39
5.3 ข้อจำกัดของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์และโปรแกรมควบคุมการทำงาน.....	39
5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	40
<b>หนังสืออ้างอิง</b> .....	41
<b>ภาคผนวก</b> .....	ผ1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของมุมสแต๊ป.....	3
ตารางที่ 2.2 แสดง Step Size ที่วงจร MA6410 สามารถควบคุมได้.....	12
ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะสัญญาณของพอร์ตขนานทั้งหมด.....	14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงภาพหน้าตัดและการพันขดลวดของสเต็ปมอเตอร์ 3 เฟส.....	4
รูปที่ 2.2 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กขณะกระตุ้นเฟสที่ 1.....	5
รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนการหมุนเมื่อมีการกระตุ้นเฟสจาก เฟส 1 ไปยัง เฟส 2.....	5
รูปที่ 2.4 แสดงภาพหน้าตัดของ PM มอเตอร์ แบบ 4 เฟส.....	6
รูปที่ 2.5 แสดงวงจรกระตุ้นเฟสขั้นพื้นฐาน สำหรับ PM มอเตอร์ 4 เฟส.....	6
รูปที่ 2.6 แสดงลำดับขั้นการหมุนในมอเตอร์ 4 เฟส.....	7
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงการหมุนในโหมดการทำงานแบบหมุนเป็นสเต็ป.....	8
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงสเต็ปการหมุนในโหมดการทำงานแบบหมุนแบบต่อเนื่อง.....	9
รูปที่ 2.9 แสดงการกระตุ้นแบบเฟสเดียว.....	9
รูปที่ 2.10 แสดงการกระตุ้นแบบเฟสคู่.....	10
รูปที่ 2.11 แสดงการกระตุ้นแบบครึ่งสเต็ป.....	10
รูปที่ 2.12 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมสเต็ปมอเตอร์.....	10
รูปที่ 2.13 แสดงการเชื่อมต่อวงจร MA6410 กับอุปกรณ์ภายนอกต่างๆ.....	12
รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์ของแข็ง.....	16
รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์แฮ็ค.....	17
รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ก๊าซ.....	18
รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์ของเหลว.....	18
รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอด.....	19
รูปที่ 2.19 แสดงการเชื่อมตัวถังรถยนต์ด้วยเลเซอร์.....	20
รูปที่ 2.20 แสดงการใช้เลเซอร์ช่วยในการผ่าตัด.....	21
รูปที่ 2.21 แสดงเส้นใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งเพื่อใช้งานด้านสื่อสารโทรคมนาคมด้วยแสงเลเซอร์.....	21
รูปที่ 2.22 แสดงการออกแบบระบบอ่านข้อมูลสามมิติใช้แทนบัตรประจำตัว.....	22
รูปที่ 2.23 แสดงการใช้เลเซอร์ในการวัดความหนาของชั้นฟิล์มบาง ระดับไมครอนด้วยเทคนิค Ellipsometer.....	22
รูปที่ 2.24 แสดงเครื่องเล่นเลเซอร์ดิสก์.....	23
รูปที่ 2.25 แสดงการใช้เลเซอร์ในงานนิทรรศการ.....	23
รูปที่ 2.26 แสดงตำแหน่งของจุด P ในแต่ละ โครงที่ต่างกัน.....	24
รูปที่ 2.27 แสดง โครง j มีการเลื่อนจากจุดกำเนิด จาก โครง i เป็นระยะเวกเตอร์ $\vec{r}_j$ .....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันการใช้เลเซอร์เข้ามาช่วยในกิจกรรมต่างๆกำลังเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายไม่ว่าในกระบวนการผลิต และการนำเสนอข้อมูลต่างๆ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการใช้งานและมีความแม่นยำสูง

ในการศึกษารั้วนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์ ที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวงจรสำหรับควบคุมมอเตอร์ เพื่อให้แสดงผลทางกราฟฟิกเชิงเส้นตามอินพุตที่กำหนด
2. เพื่อศึกษาการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์
3. เพื่อออกแบบการทำงานและ โครงสร้างของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์ ให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่างๆ ในงานอุตสาหกรรม
4. เพื่อนำเอาความรู้เข้ามาประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์เครื่องมือช่วยในงานอุตสาหกรรม

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ส่วนของฮาร์ดแวร์ ทำการออกแบบและสร้างแบบจำลองของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของชุดรีเฟลคเตอร์ เพื่อควบคุมทิศทางของเลเซอร์ในรูปแบบของการเคลื่อนที่เชิงเส้น 2 มิติ
2. ส่วนโปรแกรมควบคุมการทำงาน ทำการศึกษาการเขียนโปรแกรมด้วย โปรแกรม Visual Basic เพื่อเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์ โดยผ่านการ รับ - ส่ง ข้อมูลผ่านทางพอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถแสดงผลทางกราฟฟิกเชิงเส้นตามค่าที่ป้อน
2. สามารถพัฒนาและประยุกต์ใช้งานกับวัสดุอื่นๆเพื่อทดแทนและเกิดประโยชน์ที่ต่างกันในงานอุตสาหกรรมได้ เช่น งาน Laser Marking
3. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องจักรที่มีรูปแบบการทำงานใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สเต็ปมอเตอร์

สเต็ปมอเตอร์เป็นอุปกรณ์เชิงกลทางไฟฟ้าที่มีอินพุตเป็นกลุ่มของการหมุนเลขฐานสอง การเคลื่อนที่เป็นลักษณะของการเคลื่อนที่เชิงมุมหรือหมุนไปตามสเต็ป (แต่ละสเต็ปจะอยู่ในช่วง 0.1 – 90 องศา ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสเต็ปมอเตอร์) ตามสัญญาณพัลส์ที่ป้อนให้กับขั้วสเตเตอร์จึงเกิดแรงผลักดันต่อ โรเตอร์ ซึ่งจะส่งผลให้โรเตอร์หมุนไปจากตำแหน่งเดิม ลักษณะของสเต็ปมอเตอร์จะมีขั้วของสเตเตอร์อยู่หลายขดซึ่งเรียกว่า “เฟส” ดังนั้นเมื่อป้อนสัญญาณพัลส์ในลักษณะของลำดับของเลขฐานสอง โดยผ่านวงจรขับ จะทำให้โรเตอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่อง

##### 2.1.1 คุณประโยชน์ของสเต็ปมอเตอร์

เมื่อนำสเต็ปมอเตอร์ไปเปรียบเทียบกับมอเตอร์กระแสตรงแล้วนั้น จะเห็นได้ว่าการใช้สเต็ปมอเตอร์ในระบบการควบคุมตำแหน่งมีข้อได้เปรียบอยู่หลายประการ ดังนี้

1. เป็นลักษณะของการควบคุมแบบไม่ต้องการการป้อนกลับ ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งหรือความเร็ว นอกเสียจากในบางกรณีที่มีความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างแกนหมุนของมอเตอร์กับตำแหน่งของโหลดไม่ตรงกัน อันเกิดจากความผิดพลาดของเฟืองเกียร์ หรือในกรณีที่โหลดบางอย่างทำให้เกิดความผิดพลาดของสเต็ปขึ้น ก็จำเป็นต้องมีการใช้สัญญาณป้อนกลับเพื่อควบคุมตำแหน่งและความเร็วให้ถูกต้อง
2. ความผิดพลาดเกี่ยวกับตำแหน่งแทบจะไม่มีเลย เนื่องจากการเคลื่อนที่ของสเต็ปมอเตอร์นั้นจะเคลื่อนที่เป็นสเต็ปด้วยจำนวนองศาที่แน่นอน
3. สเต็ปมอเตอร์ถูกนำมาใช้กับเครื่องมือที่ต้องการความละเอียดแม่นยำ และใช้อยู่ในเครื่องมือประเภทดิจิทัล เช่น เครื่องวาดรูป
4. ไม่จำเป็นต้องใช้วงจรแปลงสัญญาณเพื่อติดต่อกับคอมพิวเตอร์
5. สเต็ปมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลไปเป็นการเคลื่อนที่ทางกล ดังนั้นการติดต่อกับอุปกรณ์ดิจิทัลก็จะเป็นไปโดยง่าย และวงจรรายจ่ายกำลังจากสัญญาณดิจิทัลที่ใช้ ก็มีราคาถูกกว่าวงจรรายจ่ายกำลังเชิงเส้น
6. การออกแบบวงจรควบคุมสเต็ปมอเตอร์สามารถทำได้ง่ายกว่าวงจรรวมเซอร์โวมอเตอร์ และยังสามารออกแบบวงจรในสเต็ปมอเตอร์ให้สามารถทำงานหรือหยุดได้แบบทันทีทันใด

##### 2.1.2 คุณลักษณะของสเต็ปมอเตอร์

ความถูกต้องเที่ยงตรงของมุมสเต็ปมอเตอร์ขณะไม่มีโหลด จะถูกระบุสำหรับมอเตอร์ทุกชนิดเช่น มอเตอร์ที่มี 7.5 องศา ขณะที่เคลื่อนที่ไปหนึ่งสเต็ปเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ที่มีจำนวนสเต็ปต่อรอบเท่ากับ 4 จะมีความผิดพลาดเท่ากับศูนย์เมื่อหมุนครบ 1 รอบ เพราะขณะที่หมุนมา ณ ตำแหน่งเดิมขณะเริ่มต้น ขั้วแม่เหล็กและทิศทางของสนามแม่เหล็ก (Flux) วงเดิม ด้วยเหตุนี้การเปลี่ยนตำแหน่งของสเต็ปมอเตอร์ที่ต้องการความถูกต้องสูงๆ จะต้องแบ่งจำนวนสเต็ปต่อรอบเป็นจำนวนเท่าของ 4 สเต็ป เพื่อลดการสะสมของค่าผิดพลาด (Step Angle Error) ซึ่งเป็นรูปแบบการทำงาน 4 สเต็ป

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของมุมสเต็ป

มุมสเต็ป (องศา)	จำนวนสเต็ปต่อรอบ
0.9	400
1.8	200
3.6	100
3.75	93
7.5	48
15	24

### 2.1.3 แรงบิด (Torque)

การทำงานของสเต็ปมอเตอร์มีแรงบิดเกี่ยวข้องอยู่ 3 ชนิดคือ

1. โฮลดิ้งทอร์ก (Holding Torque) คือแรงบิดที่ทำให้สเต็ปมอเตอร์หมุนไป 2 สเต็ปขณะหยุดนิ่ง ถ้าแรงบิดที่ให้สเต็ปมอเตอร์มีขนาดมากกว่าโฮลดิ้งทอร์ก จะทำให้สเต็ปมอเตอร์สูญเสียการหมุนแบบสเต็ป กลายเป็นการหมุนแบบต่อเนื่อง โดยปกติขณะการทำงานของมอเตอร์ Torque จะน้อยกว่าระดับ Holding

2. ดีเทนทอร์ก (Detent Torque) เป็นสเต็ปมอเตอร์แบบ Hybrid และแบบแม่เหล็กถาวร จะมีส่วนประกอบของโรเตอร์เป็นแม่เหล็ก ซึ่งจะสร้างแรงบิดมาเบรคการหมุนของมอเตอร์อย่างสม่ำเสมอในขณะที่ไม่มีการป้อนกระแสเข้าขดสเตเตอร์ แรงบิดดังกล่าวนี้เรียกว่า Detent Torque

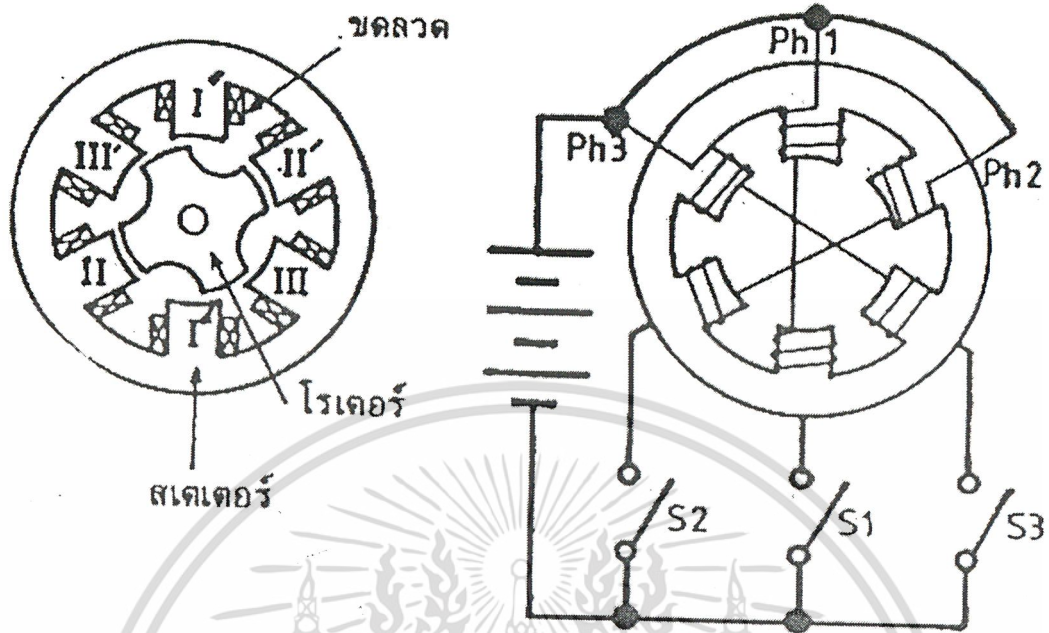
3. ไดนามิกทอร์ก (Dynamic or Working Torque) คือแรงบิดขณะทำงานซึ่งอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนอัตราเร็วของมอเตอร์ โดยปกติการเปลี่ยนอัตราเร็วของมอเตอร์จะอยู่ในย่านระหว่างเส้นโค้งพูลอิน (Pull-in Curve) และเส้นโค้งพูลเอาท์ (Pull-out Curve) เพราะถ้าปรับอัตราเร็ว ณ จุดนอกโค้งพูลเอาท์ มอเตอร์จะสูญเสียการหมุนแบบสเต็ปได้ เกิดเป็นการหมุนแบบต่อเนื่องนั่นเอง

### 2.1.4 ชนิดของสเต็ปมอเตอร์และการทำงาน

สเต็ปมอเตอร์แบ่งออกได้หลายชนิดด้วยกัน เช่น แบบแวลูเอเบิลรีลักแทนซ์ (Variable Reluctance), แบบไฮบริด (Hybrid), แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) เป็นต้น แต่ที่ใช้งานกันบ่อยๆคือแบบ แวลูเอเบิลรีลักแทนซ์ และแบบแม่เหล็กถาวร ดังนั้นจะอธิบายหลักการทำงานของมอเตอร์ 2 ชนิดนี้เท่านั้น

แวลูเอเบิลรีลักแทนซ์ (Variable Reluctant) หรือเรียกสั้นๆว่า VR มอเตอร์ จะเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการทำงานของสเต็ปมอเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจการทำงานของสเต็ปมอเตอร์ชนิดอื่นๆได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยสามารถพิจารณาส่วนประกอบของมอเตอร์ชนิดนี้ได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นภาพหน้าตัดของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงภาพหน้าตัดและการพันขดลวดของสเต็ปมอเตอร์ 3 เฟส

จากรูปแสดงถึงส่วนประกอบต่างๆของมอเตอร์ซึ่งเป็นมอเตอร์แบบ 3 เฟส และนอกจากนี้ยังแสดงถึงการพันขดลวดของมอเตอร์ด้วย โดยมอเตอร์นี้จะมีขั้วเหนือและขั้วใต้อยู่ตรงข้ามกัน 3 คู่ โดยจะพันขดลวดแบบอนุกรมกันในแต่ละขด

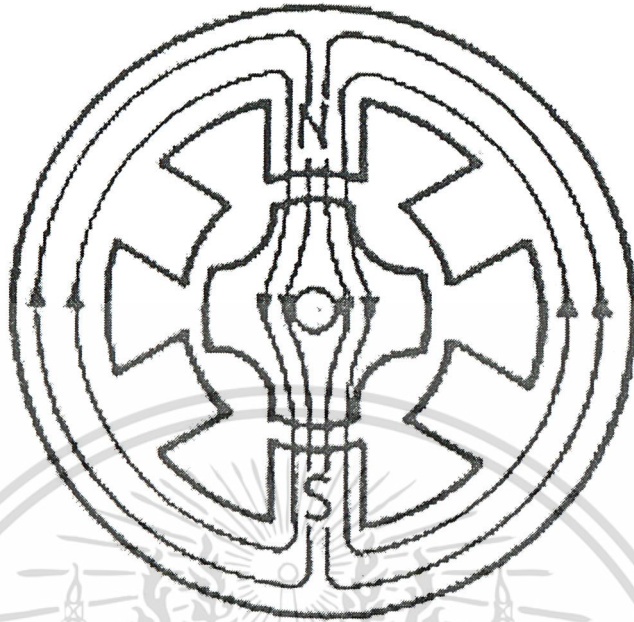
การทำงานจะเริ่มจากการกระตุ้นเฟส 1 ก่อน (S1 "ON") ซึ่งจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้น ตัวโรเตอร์จะพยายามวางตำแหน่งของตัวเองให้อยู่ในทิศทางที่ทำให้เกิดค่าความต้านทานแม่เหล็กน้อยที่สุด ดังรูปที่ 2.2

ในขณะที่เริ่มกระตุ้นที่เฟสที่ 2 (S1 "OFF", S2 "ON") ดังรูปที่ 2.3 เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่อยู่ในแนวทางเดินที่สะดวก จึงทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กมีค่าสูง ตัวโรเตอร์จะพยายามปรับตัวเองให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กมีค่าน้อยที่สุด ด้วยการหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งแรงบิดที่ใช้ในการหมุนเกิดจากแรงของเส้นแรงแม่เหล็ก แล้วจะไปหยุดที่ตำแหน่งที่ความต้านทานแม่เหล็กน้อยที่สุด นั่นคือจะหมุนไป 1 สเต็ป หรือ 30 องศาแน่นอน ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสเต็ปของการหมุนโรเตอร์ไป 1 รอบ แสดงได้ดังสมการดังนี้

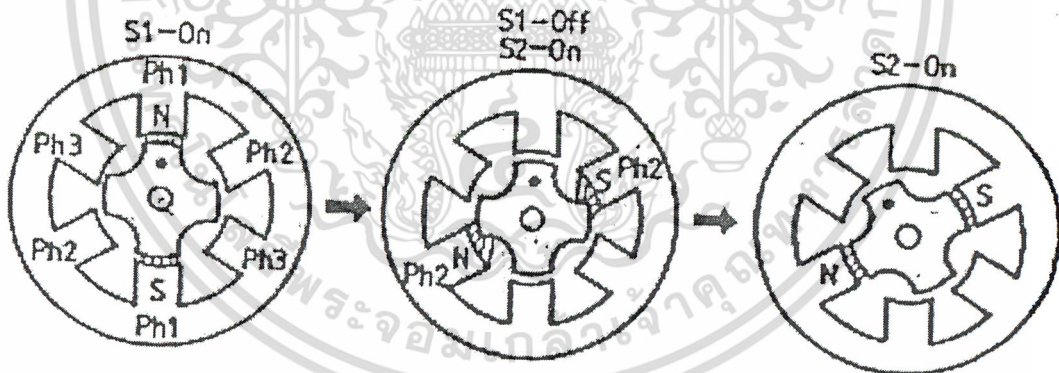
$$S = \frac{360}{\theta_s} = mN_r \quad (2.1)$$

- โดย
- $S$  : จำนวนสเต็ปของการหมุนโรเตอร์ 1 รอบ
  - $m$  : จำนวนของสเตเตอร์
  - $\theta_s$  : มุมที่เปลี่ยนไป 1 สเต็ป
  - $N_r$  : จำนวนฟันของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



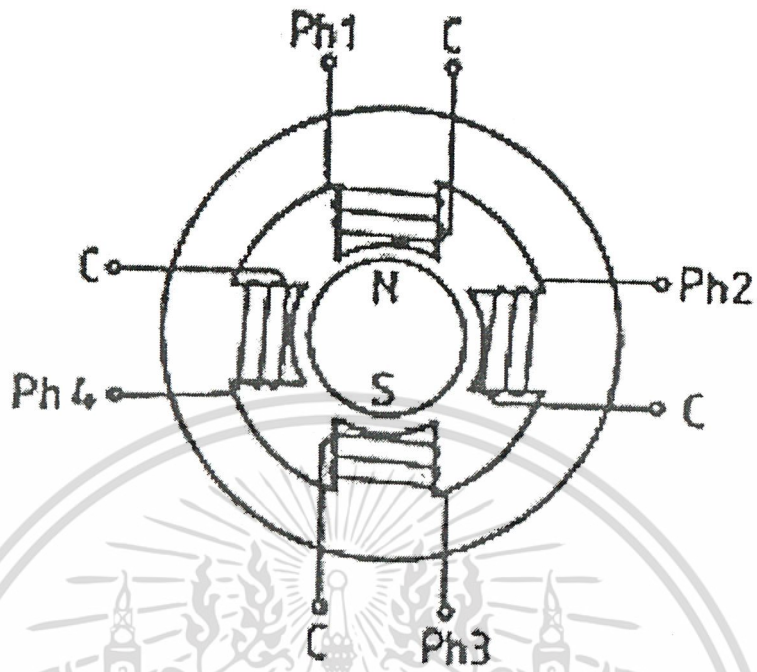
รูปที่ 2.2 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กขณะกระตุ้นเฟสที่ 1



รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนการหมุนเมื่อมีการกระตุ้นเฟสจาก เฟส 1 ไปยัง เฟส 2

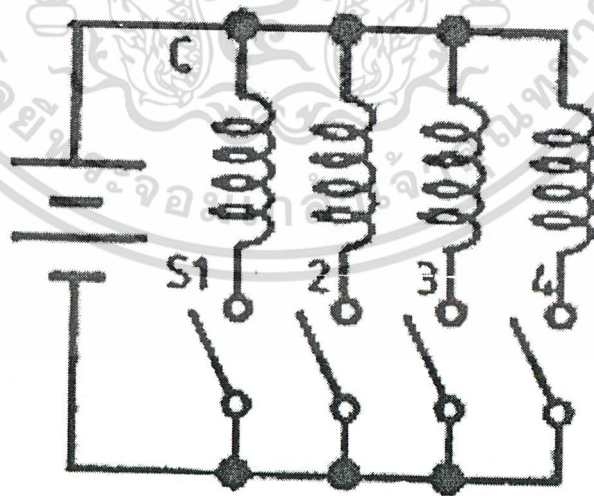
สำหรับสเต็ปมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) หรือเรียกสั้นๆว่า PM มอเตอร์ จะมีข้อแตกต่างที่สำคัญจาก VR มอเตอร์ คือ โรเตอร์จะเป็นแม่เหล็กถาวร จึงทำให้การพันขดลวดที่สเตเตอร์ต้องแตกต่างกันไปดังแสดงดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงภาพหน้าตัดของ PM มอเตอร์ แบบ 4 เฟส

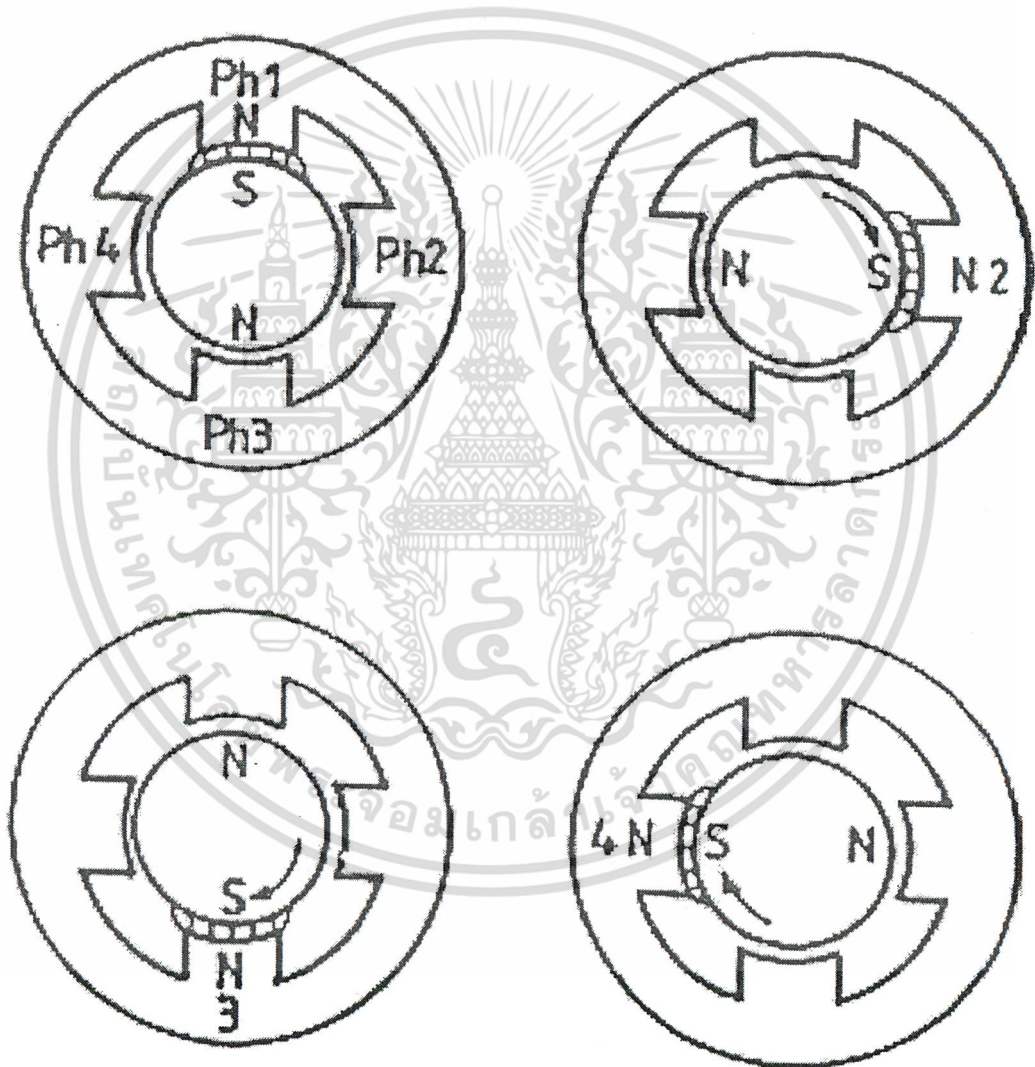
จะเห็นว่าสเตเตอร์ในแต่ละขั้วคือ 1 เฟส ดังนั้นจากรูปจึงมีทั้งหมด 4 เฟส ด้วยกัน สำหรับการต่อวงจร กระตุ้นเฟสมอเตอร์อย่างง่ายสแดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงวงจรกระตุ้นเฟสขั้นพื้นฐาน สำหรับ PM มอเตอร์ 4 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าปลายขดลวด (C) ของทุกเฟสจะต่อกันของขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ ดังนั้นเมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสใดแล้ว ขั้วสเตเตอร์ที่เฟสนั้นก็จะกลายเป็นขั้วเหนือ ดูได้จากรูปที่ 2.6 จะเป็นการแสดงตำแหน่งของโรเตอร์ในแต่ละสเต็ป หลังจากถูกกระตุ้นที่เฟส 1-2-3-4 ตามลำดับ และจะหมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ทุก 90 องศาต่อสเต็ป ถ้าต้องการจะให้มุมองศาต่อสเต็ปมีค่าลดลงหรือมีค่าความละเอียดในตำแหน่งมากขึ้น ก็จะต้องเพิ่มจำนวนเฟสของสเตเตอร์และจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ให้มากขึ้น ชื่อเสียของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร คือ มีราคาแพงมาก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกจำกัดโดยเส้นแรงแม่เหล็กภายในของแม่เหล็กถาวร ทำให้ไม่สามารถผลิตแรงบิดได้มาก



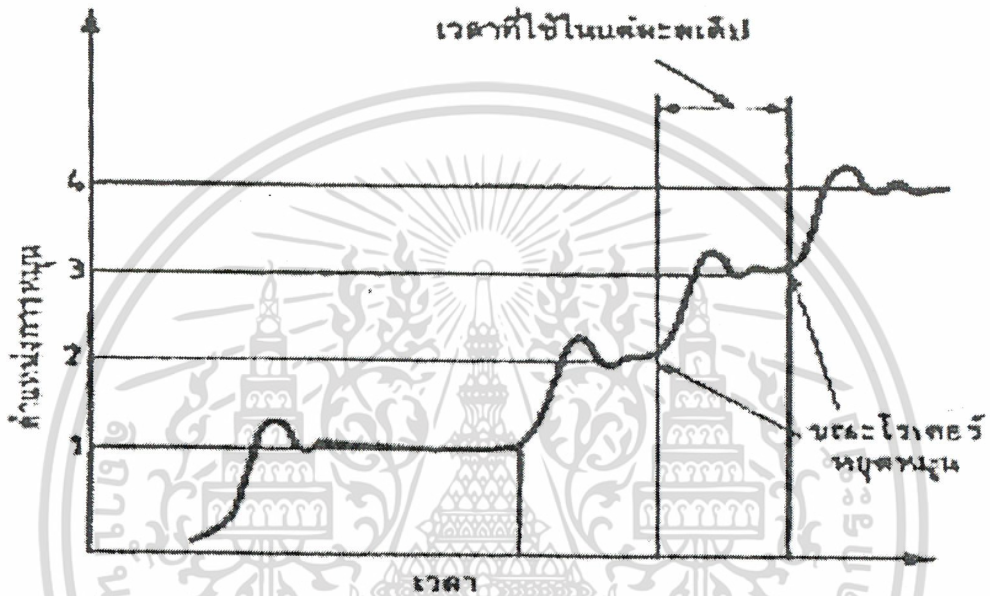
รูปที่ 2.6 แสดงลำดับขั้นการหมุนในมอเตอร์ 4 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 โหมดการทำงานของสตีปมอเตอร์

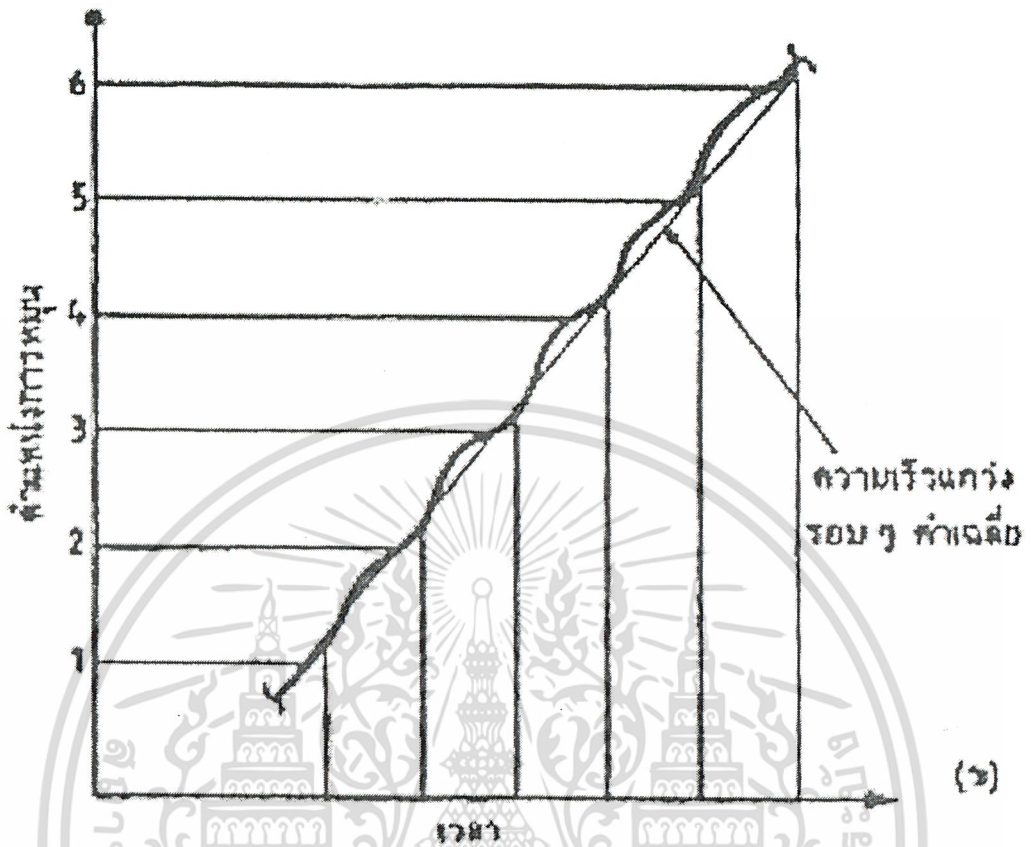
ถ้าจะแบ่งการทำงานของสตีปมอเตอร์ตามอัตราเร็วของมอเตอร์ของแต่ละสตีปจะแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ หมุนเป็นสตีป และหมุนอย่างต่อเนื่อง

โดยถ้าการหมุนเป็นแบบสตีปและมีเวลาหยุดนิ่งก่อนที่จะเปลี่ยนสตีปถัดไป จะเรียกการทำงานในโหมดนี้ว่าการหมุนเป็นสตีป ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงการหมุนในโหมดการทำงานแบบหมุนเป็นสตีป

ถ้าเพิ่มอัตราเร็วในแต่ละสตีปให้เร็วขึ้น และเป็นไปอย่างต่อเนื่องไม่มีการหยุดนิ่ง จะเรียกการหมุนแบบนี้ว่าการหมุนอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงสตีปการหมุนในโหมตการทำงานแบบหมุนแบบต่อเนื่อง

### 2.1.6 วิธีการกระตุ้นเฟส

การที่จะทำให้สตีปมอเตอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่องเหมือนกับกานหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้น ต้องมีการจ่ายพัลส์เป็นลำดับอย่างต่อเนื่อง วิธีการที่จะกระตุ้นเฟสมีด้วยกันหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมีดังนี้

#### 1. การกระตุ้นแบบเฟสเดียว (Single – Phase Excitation)

วิธีนี้เป็นการกระตุ้นเฟสเพียงเฟสเดียวเท่านั้นที่จังหวะสัญญาณนาฬิกาหนึ่งๆ

จังหวะสัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
เฟส 1	■			■			■			■	
เฟส 2		■			■			■			■
เฟส 3			■			■			■		

รูปที่ 2.9 แสดงการกระตุ้นแบบเฟสเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การกระตุ้นแบบเฟสคู่ (Two – Phase Excitation)

วิธีนี้เป็นการกระตุ้นเฟสสองเฟสพร้อมกันในจังหวะสัญญาณนาฬิกาหนึ่งๆ

จังหวะสัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
เฟส 1		■			■			■			
เฟส 2			■			■			■		
เฟส 3				■			■			■	

รูปที่ 2.10 แสดงการกระตุ้นแบบเฟสคู่

3. การกระตุ้นแบบครึ่งสเต็ป (Half – Step Excitation)

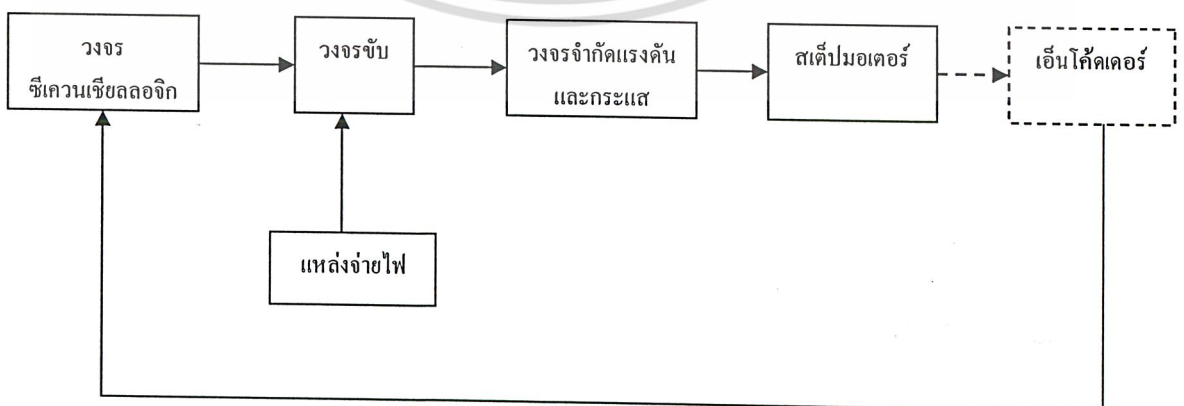
การกระตุ้นแบบนี้เป็นการรวมเอาการกระตุ้นทั้งสองแบบแรกเข้าด้วยกัน โดยจะกระตุ้นแบบเฟสเดี่ยวและจะกระตุ้นแบบเฟสคู่สลับกันไปอย่างต่อเนื่อง

จังหวะสัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
เฟส 1		■			■			■			
เฟส 2			■			■			■		
เฟส 3				■			■			■	

รูปที่ 2.11 แสดงการกระตุ้นแบบครึ่งสเต็ป

2.1.7 การควบคุมสเต็ปมอเตอร์

บล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมสเต็ปมอเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมสเต็ปมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากบล็อกไดอะแกรม วงจรที่ควบคุมความเร็วจะรับพัลส์อินพุทและคำสั่งควบคุมทิศทาง แล้วจึงจ่ายพัลส์ที่ใช้กระตุ้นเฟสของสเต็ปมอเตอร์ออกไป แต่จะมีระดับของสัญญาณต่ำจึงต้องนำสัญญาณนี้ไปผ่านวงจรขับ เพื่อให้ระดับของสัญญาณสูงขึ้น และจะมีวงจรจำกัดแรงดันและกระแสซึ่งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ให้กับวงจรขับและมอเตอร์ จากบล็อกไดอะแกรมจะเห็นว่าไม่จำเป็นต้องต่อวงจรเ็นโค้ดเดอร์ป้อนสัญญาณกลับมาเพื่อควบคุมตำแหน่งและความเร็ว แต่ในบางครั้งเช่นในกรณีที่มีความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างแกนหมุนของมอเตอร์กับตำแหน่งของโหลดไม่ตรงกัน อันเกิดจากความผิดพลาดของเฟืองเกียร์ หรือในกรณีที่โหลดบางอย่างทำให้เกิดความผิดพลาดของสเต็ปขึ้น ก็จำเป็นที่จะต้องมีการใช้สัญญาณป้อนกลับเพื่อควบคุมตำแหน่งและความเร็วให้ถูกต้อง

### 2.1.8 วงจรขับ (Drive Circuit)

สัญญาณควบคุมที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของสเต็ปมอเตอร์มักจะเป็นสัญญาณที่สร้างจากวงจรดิจิทัล เช่น จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์จำพวก TTL แรงดันที่ใช้มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ และสามารถจ่ายกระแสได้ไม่มากนัก แต่เนื่องจากการทำงานของสเต็ปมอเตอร์ต้องการแรงดันกระแสที่สูงกว่านั้น จึงจำเป็นต้องมีวงจรขับเพื่อทำหน้าที่จ่ายแรงดันและกระแสที่เพียงพอให้กับตัวมอเตอร์ โดยทั่วไปวงจรขับมักสร้างจากไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่นำมาต่อใช้งานเป็นสวิตช์เปิด-ปิด ให้กระแสไหลผ่านไปยังขดลวดในทิศทางเดียว เราเรียกวงจรขับแบบนี้ว่า ยูนิโพลาร์ ซึ่งมีการจ่ายกระแสในทิศทางเดียว แต่ถ้าใช้สเต็ปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์หรือแบบแม่เหล็กถาวรซึ่งมักจะมี 2 เฟส จะต้องใช้วงจรขับที่สามารถจ่ายกระแสตรงได้ 2 ทิศทาง เราเรียกวงจรขับแบบนี้ว่า ไบโพลาร์ ซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์หลายตัวต่อเป็นวงจรแบบบริดจ์

### 2.1.9 วงจรควบคุมมอเตอร์ (Motor Control Circuit)

ในการใช้งานมอเตอร์จำเป็นต้องมีการควบคุมข้อจำกัดของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่เกี่ยวข้องกับกราฟิกซึ่งต้องการความละเอียดสูงแล้วนั้น วงจรที่จะเลือกมาใช้ควรที่จะสามารถเพิ่มความละเอียดของมอเตอร์เพื่อการแสดงผลที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

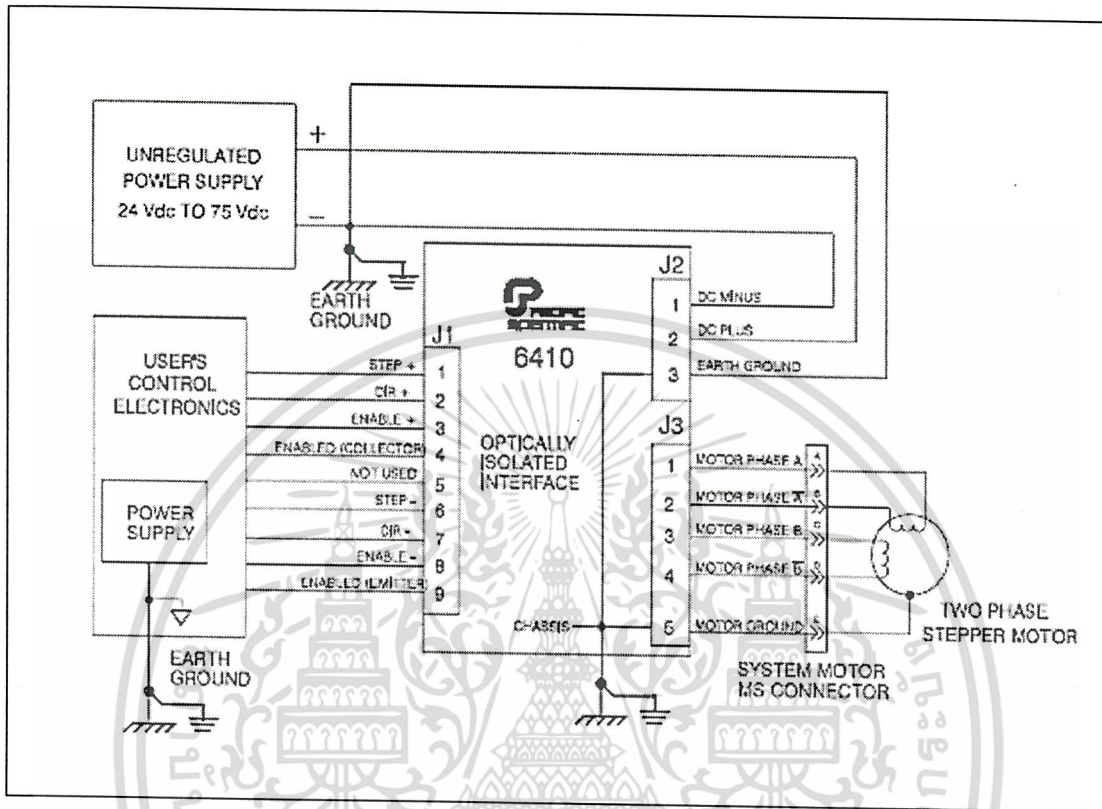
Pacific Scientific 6410 เป็นวงจรที่จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถของสเต็ปมอเตอร์ชนิด 2 เฟส โดยอาศัยการควบคุมกระแสที่จ่ายให้แก่สเต็ปมอเตอร์ ค่าความละเอียดสูงสุดที่ทำให้จะอยู่ที่ 50,000 สเต็ปต่อรอบ กระแสที่ออกจาก MA6410 สามารถปรับค่าได้โดย Dip Switch มีค่าอยู่ระหว่าง 5A rms (7.1A peak in microstep mode) จนถึง 0.625A rms (0.88A peak in microstep mode) แหล่งจ่ายไฟที่ใช้สำหรับวงจรมีจะถูกออกแบบมาโดยเฉพาะ มีค่าความต่างศักย์อยู่ระหว่าง 24 Vdc จนถึง 75 Vdc

ภายในวงจร MA6410 ประกอบไปด้วยวงจย่อยๆ ซึ่งจะทำงานพร้อมๆกันเพื่อควบคุมมอเตอร์ วงจรเหล่านั้นประกอบไปด้วย

1. Bipolar chopper drive
2. Microstepping
3. Digital Electronic Damping
4. Short circuit protection circuitry
5. MOSFET power devices
6. Optically isolated signal interface connection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. UL Recognized – 508C (Type R)



รูปที่ 2.13 แสดงการเชื่อมต่อวงจร MA6410 กับอุปกรณ์ภายนอกต่างๆ

ตารางที่ 2.2 แสดง Step Size ที่วงจร MA6410 สามารถควบคุมได้

Decimal		Binary	
Full	200	Half	400
Half	400	1/4	800
1/5	1,000	1/8	1,600
1/10	2,000	1/16	3,200
1/25	5,000	1/32	6,400
1/50	10,000	1/64	12,800
1/125	25,000	1/128	25,600
1/250	50,000	1/256	51,200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การติดต่อกับคอมพิวเตอร์

การอินเตอร์เฟซกับคอมพิวเตอร์ คือการทำงานติดต่อกันระหว่างซีพียูกับอุปกรณ์ภายนอกอื่นๆและการถ่ายข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ นอกเหนือจากจะต้องทำงานติดต่อกับหน่วยความจำ (RAM, ROM) แล้วยังต้องมีการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกที่มีการส่งข้อมูลอินพุต, เอาท์พุทอีกทางหนึ่ง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบสมบูรณ์ในระบบต่างๆของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะทำงานต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ ดังเช่นการรับส่งข้อมูลจากซีพียูไปยังส่วนอื่นๆ เป็นต้น

การที่จะโอนย้ายข้อมูลทุกตัวนั้นจะต้องมีแหล่งที่ส่งข้อมูล และแหล่งที่รับข้อมูล สำหรับขบวนการเหล่านี้จะมีส่วนสำคัญที่ว่า ข้อมูลนั้นเป็นแอดเดรสหรือว่าเป็นค่าที่จะส่งไปยังจุดไหน ตัวอย่างเช่น ส่งไปยังหน่วยความจำ อุปกรณ์อินพุต / เอาท์พุท และจะส่งเมื่อไร การทำงานเหล่านี้โดยทั่วไปจะต้องมีสัญญาณในการตรวจสอบอุปกรณ์ว่าพร้อมที่จะรับ / ส่ง ข้อมูลหรือยังก่อนเสมอ เนื่องจากจุดที่รับหรือส่งข้อมูลจะต้องมีสัญญาณตรวจสอบความพร้อมเสมอเพื่อที่จะให้ข้อมูลที่เรากำลังใช้นั้นๆเป็นระเบียบ ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูลจากซีพียูไปที่อุปกรณ์รอบข้าง เป็นต้น ซึ่งจุดรับส่งข้อมูลคู่หนึ่งๆอาจจะเป็นระหว่างซีพียูด้วยกัน หรือซีพียูกับหน่วยความจำก็ได้ สำหรับข้อมูลที่โอนย้ายไปมานั้นจะอยู่ในลักษณะของเลขฐานสอง ตัวอย่างเช่น 01101100<sub>2</sub> ซึ่งแต่ละตัวจะแทนด้วย 8 Bit หรือ 16 Bit ก็ขึ้นอยู่กับการใช้งานของระบบนั้นๆ ถ้าหากเป็นการต่อจากพอร์ตซีพียู ไม่ว่าจะเป็น Parallel หรือ Serial ในสัญญาณที่ส่งมาจะมีระบบแรงดันไฟฟ้า สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. พอร์ตขนาน (Printer Port) ใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 0 ถึง +5 VDC
2. พอร์ตอนุกรม (RS-232) ใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ +3 ถึง +25 VDC

### 2.2.1 การติดต่อกับพอร์ตขนาน

ในการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Interface) นั้นเรามีการใช้งานพอร์ตขนาน หรือ Parallel Port อย่างแพร่หลาย โดยจุดเริ่มต้นคือการนำมาใช้งานกับพริ้นเตอร์ จนทำให้บางคนเรียกว่า Printer Port ก็มี ซึ่งพอร์ตขนานนั้นมีความสามารถและความน่าเชื่อถืออยู่หลายประการ จึงน่าจะทำความเข้าใจการทำงานพื้นฐานเพื่อให้การสร้างแอปพลิเคชันภายหลังทำได้อย่างเข้าใจและรวดเร็ว

เราสามารถใช้พอร์ตขนานเป็นตัวรับสัญญาณอินพุตและเอาท์พุทแบบดิจิทัล เพื่อที่จะใช้ในการอินเตอร์เฟซกับอุปกรณ์อื่นๆ พอร์ตนี้ประกอบไปด้วยรีจิสเตอร์อยู่หลายแบบ ได้แก่ 1) รีจิสเตอร์เอาท์พุทขนาด 8 บิต ซึ่งเราสามารถอ่านข้อมูลที่ส่งออกไปกลับเข้ามาตรวจสอบได้ 2) รีจิสเตอร์ขนาด 4 บิต ซึ่งสามารถอ่านข้อมูลกลับมาตรวจสอบและใช้เป็นรีจิสเตอร์อินพุตได้ 3) รีจิสเตอร์อินพุทขนาด 5 บิต และ 4) รีจิสเตอร์ขนาด 1 บิต ซึ่งสามารถใช้ส่งสัญญาณในระดับที่ 7 ได้ นอกจากนี้ค่าแอดเดรสของรีจิสเตอร์แต่ละตัวในการ์ด มีค่าแอดเดรสกำกับอยู่ 2 ค่า ดังนั้นสมมติว่าถ้าในระบบของเรามีการ์ดอยู่ 2 แผ่น เราสามารถกำหนดแอดเดรสที่ต่างกันให้แก่รีจิสเตอร์แต่ละตัวในการ์ดแต่ละแผ่น เพื่อกันไม่ให้รีจิสเตอร์เดียวกันในการ์ดทั้ง 2 แผ่นทำงานขึ้นพร้อมกัน ซึ่งจะก่อให้เกิดจุดขัดแย้งขึ้น ซึ่งอาจทำให้ข้อมูลที่ส่งผิดพลาดไป อินพุตและเอาท์พุทของรีจิสเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น จะต่อเข้ากับขาของคอนเนคเตอร์ 25 ขา แบบ D ที่อยู่ด้านหลังการ์ดทำให้การใช้งานทำได้สะดวก

ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะสัญญาณของพอร์ตขนานทั้งหมด

Pin No. (D-Type 25)	Signal Name	Bit	Direction (In / Out)
1	nStrobe	-Co	Output
2	Data 0 (Bit 0)	Do	Output
3	Data 0 (Bit 0)	D1	Output
4	Data 0 (Bit 0)	D2	Output
5	Data 0 (Bit 0)	D3	Output
6	Data 0 (Bit 0)	D4	Output
7	Data 0 (Bit 0)	D5	Output
8	Data 6 (Bit 6)	D6	Output
9	Data 7 (Bit 7)	D7	Output
10	nAck	S6	Input
11	Busy	-S7	Input
12	PaperEnd	S5	Input
13	Select	S4	Input
14	nAutoFeed	-C1	Output
15	nError	S3	Input
16	nInitialize	C2	Output
17	nSelectPrinter	-C3	Output
18 - 25	Ground		-

อย่างไรก็ตามพอร์ตขนานมีข้อเสียที่ไม่สามารถทำงานได้ในระยะทางไกลๆ เพราะจะเกิดความผิดพลาดของข้อมูลได้ง่ายเนื่องจากแรงดันไม่สม่ำเสมอ และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในเรื่องของสายสัญญาณที่ต้องใช้สายสัญญาณจำนวนมาก

### 2.2.2 วิธีการแก้ไขค่าแอดเดรสของการ์ด

ค่าแอดเดรสของรีจิสเตอร์ต่างๆในการ์ด Parallel Port มีค่าเท่ากับ  $0378_{16}$ ,  $0379_{16}$  และ  $037A_{16}$  เราสามารถแก้ไขค่าแอดเดรสนี้ให้มีค่าเป็น  $0278_{16}$ ,  $0279_{16}$  และ  $027A_{16}$  สำหรับรายละเอียดของการ์ดและวงจรจากคู่มือของการ์ด การแก้ไขค่าแอดเดรสให้เป็นค่าใหม่ทำได้โดยตัดทางเดินสัญญาณออกหนึ่งเส้น ตำแหน่งของทางเดินสัญญาณนี้อยู่ระหว่างขาทั้งสองขา จัมเปอร์ (Jumper) สองขา ซึ่งบนการ์ดระบุไว้ด้วยอักษร J1 เมื่อเราตัดทางเดินระหว่างขาทั้งสองนี้ในการถอดรหัสการเลือกใช้งานรีจิสเตอร์ต่างๆต้องใช้ค่าแอดเดรสใหม่ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เลเซอร์

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ทรงพลังและมีคุณสมบัติพิเศษที่มีประโยชน์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ผู้ที่คิดค้นเลเซอร์ได้คือ ซี. เอช.ทาวน์ส์ (C.H. Townes) ในปี ค.ศ. 1954 โดยได้เสนอเป็นหลักการหรือทฤษฎีเลเซอร์ไว้ ซี.เอช.ทาวน์ส์ ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1964 สำหรับการคิดค้นเรื่องเลเซอร์นี้เอง เมเมน (Maiman) เป็นผู้พิชิตงานทฤษฎีเลเซอร์ของ C.H. Townes ได้สำเร็จ โดยการประดิษฐ์เลเซอร์ตัวแรกของโลกขึ้น เป็นเลเซอร์ที่ทำทับทิม (Ruby Laser) ซึ่งเป็นของแข็งในปี ค.ศ. 1960 ในปีเดียวกันนั้นเอง จาเวน (Javan) ก็ได้ประดิษฐ์เลเซอร์ที่ทำจากก๊าซฮีเลียม-นีออนได้เป็นผลสำเร็จ จากนั้นจึงมีการพัฒนาเลเซอร์ ชนิดต่าง ๆ อีกมากมาย ทั้งที่ทำจากของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และสารกึ่งตัวนำ คำว่า "เลเซอร์" เป็นคำทับศัพท์ จากภาษาอังกฤษ คือ "LASER" ซึ่งเป็นคำย่อของ "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" จึงหมายถึง การแผ่รังสีของการเปล่งแสงแบบถูกเร้าด้วยการขยายสัญญาณแสง ดังนั้นกลไกพื้นฐานของเลเซอร์จึงได้แก่ การเปล่งแสงแบบถูกเร้า และการขยายสัญญาณแสง กลไกทั้งสองนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เลเซอร์มีคุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ เช่น เป็นลำแสงขนานที่มีความเข้มสูง และมีคลื่นแสงที่เป็นระเบียบด้วยค่าความยาวคลื่นที่ตายตัว องค์ประกอบของเลเซอร์ เลเซอร์โดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่

1. เนื้อวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์ (Laser Medium)
2. การปั๊มพลังงานให้แก่เนื้อวัสดุที่เป็นตัวกลางเลเซอร์ให้มีสภาพถูกกระตุ้น (Energy Pumping)
3. แคววี่แสงเพื่อขยายสัญญาณแสง

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบโคฮีเร้นท์ กล่าวคือ คลื่นแสงเลเซอร์มีความพร้อมเพรียง เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้แสงเลเซอร์มีลักษณะเป็นลำแสงพุ่งไปได้ไกล มีความเข้มสูง มีสีเดียว เพราะมีค่าความยาวคลื่นคงที่สำหรับเลเซอร์ชนิดหนึ่ง ๆ คุณสมบัติเหล่านี้ เกิดขึ้นจากกลไกการเกิดแสงเลเซอร์ ซึ่งอาศัยการเร้าให้เกิดจากการเปล่งแสงด้วยโฟตอนที่มิพลังงานตายตัว และเกิดการป้อนกลับ เพื่อขยายจำนวนโฟตอนนั้นให้มีมากขึ้นด้วยแคววี่แสงที่ทำจากกระจกสะท้อนแสงที่วางขนานกัน ทำให้โฟตอนมีการสะท้อนกลับไปกลับมา และเร้าให้เกิดโฟตอนเพิ่ม ขึ้นจนสามารถเอาชนะความสูญเสียในระบบพุ่งออก เป็นแสงเลเซอร์ที่ทรงพลังในที่สุด

เลเซอร์มีคุณสมบัติเด่นหลัก ๆ 4 ประการ คือ

1. เป็นแสงสีเดียว (มีค่าความยาวคลื่นเดียว)
2. มีเฟสเดียวกัน (มีหน้าคลื่น)
3. มีทิศทางแน่นอน (เป็นลำแสง)
4. มีความเข้มสูง (จำนวนโฟตอนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สูง)

คุณสมบัติทั้ง 4 นี้เรียกรวม ๆ กันว่า คุณสมบัติโคฮีเร้นท์ (Coherent) เลเซอร์จึงเป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบโคฮีเร้นท์ (Coherent Light Source) นั่นเอง จุดเด่นทั้ง 4 นี้มีส่วนสำคัญที่ทำให้แสงเลเซอร์เกิดประโยชน์ในด้านประยุกต์ เช่น การที่แสงเลเซอร์มีค่าความยาวคลื่นที่แน่นอนจึงทำให้เลเซอร์ถูกใช้เป็นมาตรฐาน และใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูงได้แก่ การวัดระยะทางหน้าคลื่นที่เป็นระเบียบของแสงเลเซอร์ถูกนำมาใช้เพื่อบันทึกข้อมูลของภาพสามมิติ ลักษณะเป็นลำแสงมีประโยชน์ต่อการนำร่อง การสื่อสารและความ เข้มสูงของแสงเลเซอร์ มีที่ใช้งานด้าน เจาะตัดและเชื่อมวัสดุได้ อีกทั้งยังรวมถึงการผ่าตัดด้วยแสงเลเซอร์ในด้านการแพทย์อีกด้วย

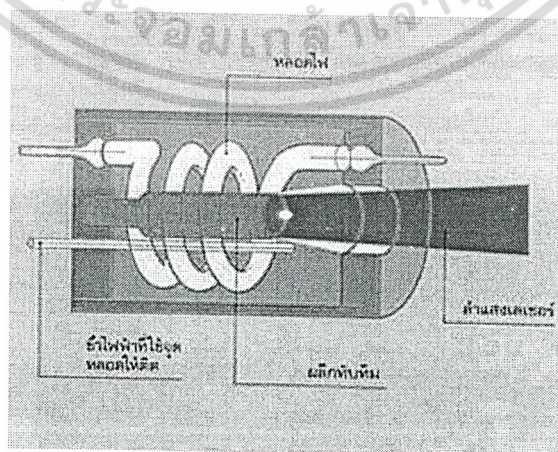
เลเซอร์มีหลายชนิด ทั้งที่มีขนาดใหญ่ เช่น เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ จนถึงเลเซอร์ขนาดเล็กจิ๋ว เช่น เลเซอร์ไดโอดที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ กำลังแสงของเลเซอร์จึงมีตั้งแต่รุนแรงมากเป็นเทราวัตต์ (10<sup>12</sup> วัตต์ = ล้านล้านวัตต์) ใช้เป็นอาวุธ หรือตัวกระตุ่นให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิวชั่นได้ จนถึงกำลังแสงต่ำไม่เป็นอันตราย มีหน่วยเป็นไมโครวัตต์ (10<sup>-6</sup> วัตต์ = 1 ในล้านวัตต์) ซึ่งมีในเครื่องใช้ไฟฟ้าสมัยใหม่หลายชนิดแสงเลเซอร์มีสีต่าง ๆ กัน ตามชนิดของเลเซอร์ บางครั้งเป็นแสงที่ตามองไม่เห็น เช่น แสงอินฟราเรด และแสงอัลตราไวโอเล็ต วัสดุที่ใช้ทำตัวกลางเลเซอร์นั้นอาจเป็น ได้ทั้งของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และสารกึ่งตัวนำ

เลเซอร์มีประโยชน์ใช้งานกว้าง ได้แก่ ใช้เจาะตัด เชื่อมวัสดุที่ต้องการความแม่นยำ และคมชัด ใช้ผ่าตัดทั้งทางการแพทย์ทั่วไปและจักษุแพทย์ ใช้ในงานสื่อสารโทรคมนาคมผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ใช้ทำภาพสามมิติ ใช้ในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าทั้งที่ใช้ในบ้านและ สำนักงาน เช่น เครื่องเสียงคอมแพคดิสก์ เครื่องเล่นวีดีโอเลเซอร์ดิสก์ เครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์ และเครื่องพิมพ์แบบเลเซอร์ ตลอดจนการใช้แสงเลเซอร์เพื่อใช้อ่านบาร์โค้ดในร้านสรรพสินค้า อาหาร และศูนย์การค้าต่าง ๆ เลเซอร์ยังมีการใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทาง ปฏิบัติงานด้านการสำรวจ ตลอดจนงานก่อสร้าง และเครื่องมือวัดนานาชนิดทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ด้วย

### 2.3.1 ชนิดของเลเซอร์

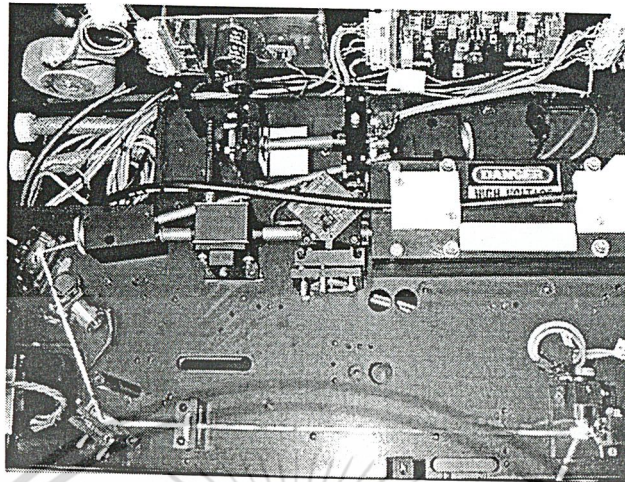
#### 2.3.1.1 เลเซอร์ของแข็ง

เลเซอร์ของแข็ง ได้แก่ เลเซอร์ที่ใช้ตัวกลางเป็นของแข็ง เช่น เลเซอร์ทับทิม เลเซอร์แย็ค เลเซอร์แก้ว ฯลฯ ทับทิมและแย็คเป็นผลึกส่วนแก้วเป็นอะมอร์ฟัส ตัวกลางเหล่านี้ทำหน้าที่เป็น เนื้อวัสดุเจ้าบ้าน (Host Materials) เท่านั้น เพราะตัวที่ทำให้เกิดการเปล่งแสงนั้นกำหนดจากสารเจือปนที่เติมในเนื้อสารเหล่านี้ เช่น ทับทิมจะใช้โครเมียมเป็นสารเจือปน จึงให้สี แดงที่มีความยาวคลื่น 6493 อังสตรอม (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Cr<sup>3+</sup>) แย็คและแก้วจะใช้นีโอไดเนียมเป็นสารเจือปน จึงให้แสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 1.06 ไมครอน (YAG : Nd<sup>3+</sup> Glass : Nd<sup>3+</sup>) ในการปั๊มพลังงานแก่ของแข็งเหล่านี้ ต้องใช้วิธีการทางแสงคือใช้หลอดไฟซีนอนหรือหลอดไฟทั้งสแตนด์บาย โดยมีตัวสะท้อนแสงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการปั๊มพลังงาน ตัวสะท้อนแสงนี้มีลักษณะเป็นกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรี และมีการวางหลอดไฟและตัวกลางเลเซอร์ไว้ที่ตำแหน่งของจุดโฟกัสของวงรี



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์ของแข็ง

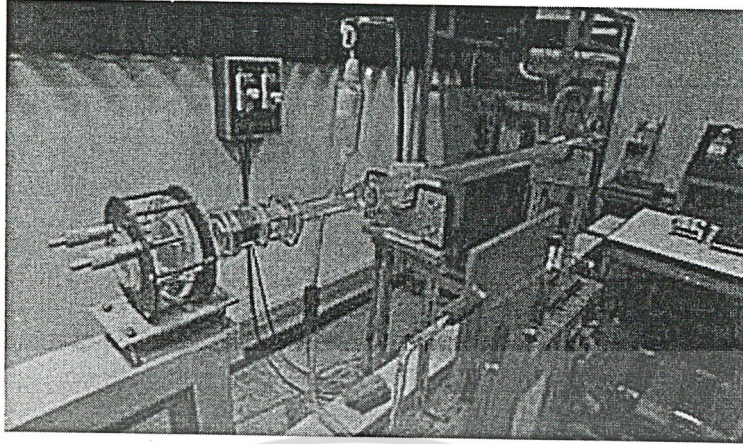
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์แยก

#### 2.3.1.2 เลเซอร์ก๊าซ

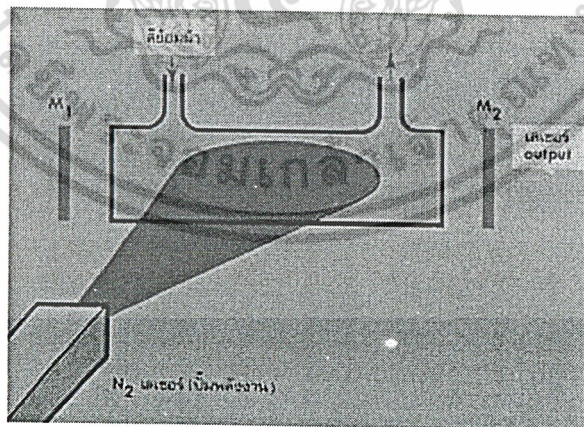
เมื่อใช้ก๊าซเป็นตัวกลางเลเซอร์ การปั๊มพลังงานก็จะใช้วิธีการปล่อยประจุในก๊าซด้วยไฟฟ้าแรงสูง กล่าวคือนำก๊าซเหล่านั้นบรรจุในหลอดเลเซอร์ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าที่ปลายทั้งสอง เมื่อป้อนไฟฟ้าแรงสูงให้แก่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองอิเล็กตรอนจะวิ่งจากขั้ว แคโทด (ขั้วลบ) ไปยังขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ด้วยพลังงานสูง อิเล็กตรอนจะวิ่งชนอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซเหล่านั้น จนแตกตัวเป็นไอออนมีประจุไฟฟ้าขึ้น เรียกว่า พลาสมา (Plasma) ก๊าซที่เป็นพลาสมาเหล่านี้จะพร้อมปล่อยโฟตอน หากมีโฟตอนที่มีลักษณะเหมือนกันมาเร็ว จึงเกิด เป็นแสงเลเซอร์ขึ้นเมื่อมีการขยายสัญญาณแสงด้วยแคววิตี้แสง ที่ทำจากกระจกสะท้อนที่ปลายทั้งสองข้างของหลอดเลเซอร์ ก๊าซที่ใช้ทำเลเซอร์มีหลายชนิดเช่น ก๊าซผสมฮีเลียม - นีออน (He - Ne) ก๊าซผสมคาร์บอนไดออกไซด์ - ไนโตรเจน - ฮีเลียม (CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He) ก๊าซผสมฮีเลียม - แคดเมียม (He - Cd) ก๊าซอาร์กอน (Ar<sup>+</sup>) ซึ่งจะให้สีต่าง ๆ ตามชนิดของก๊าซเลเซอร์ฮีเลียม - นีออน เป็นเลเซอร์กำลังแสงต่ำ (1~10 mW) เลเซอร์ฮีเลียม - แคดเมียมและเลเซอร์อาร์กอน เป็นเลเซอร์กำลังแสงปานกลาง (10~100 mW) ส่วนเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์เป็นเลเซอร์กำลังแสงสูง (1~100 W) จึงมีการใช้งานที่แตกต่างกันไป แต่เลเซอร์ทุกชนิดมีอันตราย เพราะแสงเลเซอร์ที่มีกำลังแสงเพียง 1 mW จะมีความเข้มแสงสูงกว่าพระอาทิตย์ จึงสามารถทำให้ตาบอดได้หาก แสงเลเซอร์พุ่งเข้าหาหน้าตาโดยตรง



รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ก๊าซ

### 2.1.3.3 เลเซอร์ของเหลว

เราสามารถใช้ตัวกลางเลเซอร์ที่ทำจากของเหลวได้ เช่น ใช้สีย้อมผ้า (Dye) ผสมน้ำหรือแอลกอฮอล์ บรรจุใส่ภาชนะใส การปั๊มพลังงานแก่ ของเหลวเหล่านี้ใช้วิธีทางแสงเช่นเดียวกับตัวกลางเลเซอร์ที่เป็นของแข็ง เช่น ใช้หลอดซินอนหรือเลเซอร์ในโตรเจน เลเซอร์ของเหลวเหล่านี้จะมีจุดเด่นที่สำคัญคือเป็นเลเซอร์ที่ให้สีที่ตามองเห็น ค่าความยาวคลื่นของแสงสามารถปรับได้จึงเป็น Tunable Laser เพราะโมเลกุลของสีย้อมผ้ามีขนาดโตเนื่องจากเป็นสารอินทรีย์เคมีระดับพลังงานที่ซ้อนหลายชั้น มิได้เป็นชั้น เดียว ๆ เหมือนกรณีของก๊าซหรือของแข็ง ตัวอย่างของสีย้อมผ้าที่นิยมใช้ได้แก่ โรดามีน 6 จี (Rhodamine 6 G) ซึ่งให้แสงเลเซอร์ ตั้งแต่สีเหลืองไปถึงสีส้ม (570-610 nm) โรดามีน บี (Rhodamine B) ให้แสงเลเซอร์ช่วงสีแดง (605-635 nm) และ ดิคลอโรฟลูออเรสซีน (Dichloro fluore scein) ให้แสงเลเซอร์สีเขียว (530-560 nm)



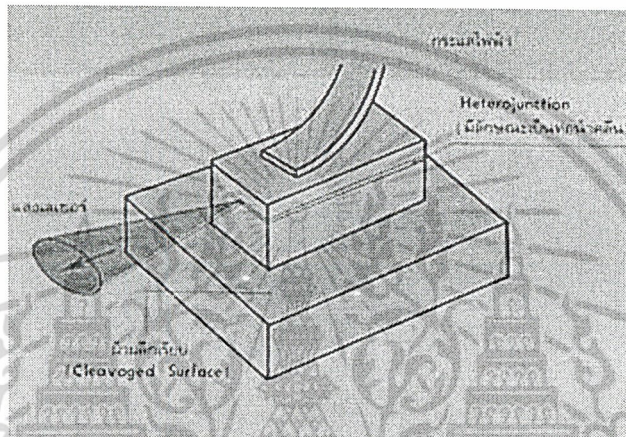
รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์ของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.3.4 เลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำจากสารประกอบ เช่น GaAs (แกเลียมอาร์เซไนด์) GaAlAs (แกเลียมอะลูมิเนียมอาร์เซไนด์) InGaAsP อินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์) ซึ่งมีค่าแถบพลังงานต่างๆ กัน จึงเป็นตัวกำหนดค่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ เช่น

- GaAs ให้แสงเลเซอร์ที่ค่าความยาวคลื่น 0.8  $\mu\text{m}$  (อินฟราเรด)
- GaAlAs ให้แสงเลเซอร์ที่ค่าความยาวคลื่น 0.7  $\mu\text{m}$  (สีแดง)
- InGaAsP ให้แสงเลเซอร์ที่ค่าความยาวคลื่น 1.3 และ 1.55  $\mu\text{m}$  (อินฟราเรด)



รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอด

#### 2.3.2 ประโยชน์ของเลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอดแต่ละชนิดจะมีการใช้งานที่แตกต่างกันตามลักษณะ และคุณสมบัติของค่าความยาวคลื่นนั้นๆ เช่น เลเซอร์ไดโอดที่ให้สีแดงจะใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่วนเลเซอร์ไดโอดที่ให้แสงอินฟราเรดที่ค่าความยาวคลื่น 1.55  $\mu\text{m}$  จะใช้ในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง เป็นต้น โครงสร้างของเลเซอร์ไดโอด ได้แก่ หัวต่อพีเอ็นแบบเฮเทอโรจังก์ชัน (Heterojunction) เช่น GaAlAs/GaAs ทำให้ประสิทธิภาพของเลเซอร์ไดโอดเริ่มทำงานน้อยลง การฉีดกระแสไฟฟ้าผ่านหัวต่อพีเอ็นของเลเซอร์ไดโอดเป็นวิธีการปั๊มพลังงาน เพื่อให้เกิดการรวมตัวของพาหะนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำและนำมาสู่การเปล่งแสง แสงที่เปล่งออกมาจะถูกขยายสัญญาณให้มีความเข้มสูงขึ้น ด้วยแควิตี้แสงที่เกิดจากผิวมันสะท้อนแสงของผิวผลึกที่ทำให้แตกโดยธรรมชาติ (Cleaved Surface)

เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ที่มีขนาดเล็กจิ๋วกินไฟน้อย สามารถผลิตได้จำนวนมากๆ ด้วยเทคโนโลยีด้านสารกึ่งตัวนำ เลเซอร์ไดโอดถูกใช้งาน อย่างกว้างขวางตั้งแต่การใช้เป็นเลเซอร์พอยน์เตอร์ (Laser Pointer) ใช้ในการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ใช้เป็นหัวอ่านของเครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องวีดีโอเลเซอร์ดิสก์ และเครื่องถ่ายภาพเอกสารประเภทเลเซอร์ ปริ้นเตอร์ (Laser Printer) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ศึกษาวิจัยการสร้างเลเซอร์ไดโอดด้วยเทคโนโลยีด้านการปลูกผลึกจากของเหลว (Liquid Phase Epitaxy : LPE) และเทคโนโลยีการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy : MBE) เลเซอร์ไดโอดมีกำลังแสงต่ำตั้งแต่ระดับไมโครวัตต์ ( $\mu\text{W}$ ) จนสูงถึงวัตต์ (W) และเป็นเลเซอร์ที่มีจุดเด่นคือ สามารถโมดูลเลตสัญญาณได้ โดยตรง โดยผ่านเข้าไปทางด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

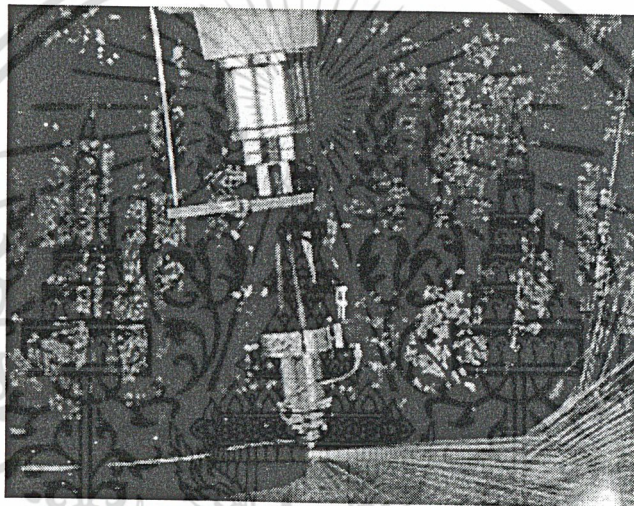
กระแสไฟฟ้าที่ฉีดผ่านตัวถึงประจักษ์ จึงสะดวกต่อการใช้งาน โดยเฉพาะการสื่อสารทางด้านแสง

### 2.3.3 การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีคุณสมบัติเด่น คือเป็นคลื่นแสงที่มีระเบียบ มีลักษณะเป็นลำแสง ความเข้มแสงสูง จึงมีศักยภาพในด้านประยุกต์มากมาย ได้แก่

#### 1. การใช้เลเซอร์เพื่อเจาะ ตัด เชื่อม

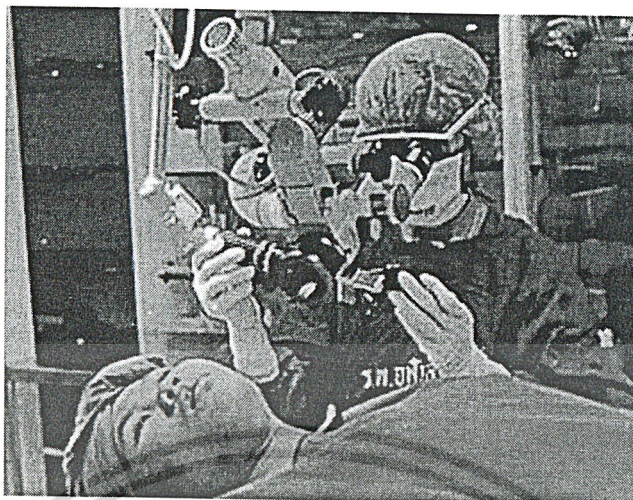
เลเซอร์เป็นแสงที่มีความเข้มสูง และเป็นลำแสง เมื่อโฟกัสมีขนาดเล็กจะสามารถ เจาะ ตัด เชื่อม วัสดุต่าง ๆ ได้ รูปที่เจาะ รอยตัด รอยเชื่อม จะมีขนาดเล็กและคมชัดมาก ทำให้สามารถทำงานที่มีความละเอียดสูงได้ เลเซอร์ที่ใช้ งานต้องมีกำลังสูง เช่น เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ และเลเซอร์แฮ็ค



รูปที่ 2.19 แสดงการเชื่อมตัวถังรถยนต์ด้วยเลเซอร์

#### 2. การใช้เลเซอร์ด้านการแพทย์

เลเซอร์ถูกนำมาใช้ในการผ่าตัดและรักษาทางการแพทย์และจักษุแพทย์ เช่น การผ่าตัดที่มีขนาดเล็ก (Microsurgery) การผ่าตัดต้อ เป็นต้น เลเซอร์ที่ใช้ ได้แก่ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์อาร์กอน



รูปที่ 2.20 แสดงการใช้เลเซอร์ช่วยในการผ่าตัด

### 3. การใช้เลเซอร์ด้านสื่อสารโทรคมนาคม

เลเซอร์โคโอดถูกนำมาใช้เป็นตัวส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง เพื่อใช้ถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์ โทรศัพท์ ข้อมูลคอมพิวเตอร์ อย่างกว้างขวาง สื่อสาร โทรคมนาคมด้วยแสงเลเซอร์นี้มีจุดเด่นที่จะไม่มีสัญญาณรบกวน เพราะเป็นคลื่นแสง มีความจุข้อมูลสูงมากเพราะมีความถี่สูงกว่าคลื่นวิทยุ ทำให้เส้นใยแก้วนำแสงเส้นหนึ่งสามารถจุข้อมูลสายโทรศัพท์ได้เป็นพัน ๆ คู่สาย

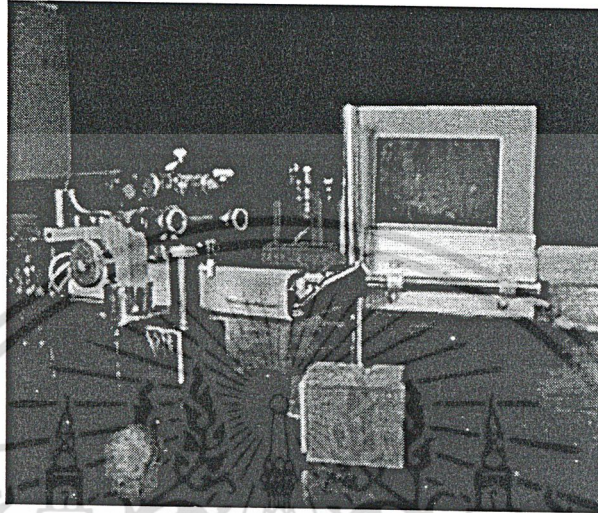


รูปที่ 2.21 แสดงเส้นใยแก้วนำแสงที่ติดตั้งเพื่อใช้งานด้านสื่อสารโทรคมนาคมด้วยแสงเลเซอร์

### 4. การใช้เลเซอร์ทางด้านสร้างภาพสามมิติ

เลเซอร์มีความเป็นระเบียบของคลื่นแสง ดังนั้นจึงสามารถบันทึกข้อมูลของภาพสามมิติได้เพราะบันทึกทั้งความเข้มแสงและเฟส (หน้าคลื่น) ของแสงด้วย ภาพที่บันทึกจึงมีข้อมูลเกี่ยวกับความลึกของภาพด้วย ทำให้ได้ภาพสามมิติเรียกว่า โฮโลกราฟี (Holography) การบันทึกภาพสามมิตินี้ต้องกระทำบน โต๊ะแสง (Optical Bench) เพื่อขจัดปัญหาการสั่นสะเทือน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้พัฒนา เทคนิคการบันทึกภาพสามมิติเชิงซ้อน และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาเห็น ใบเขียวระยิบระยับนั้นใจก็ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

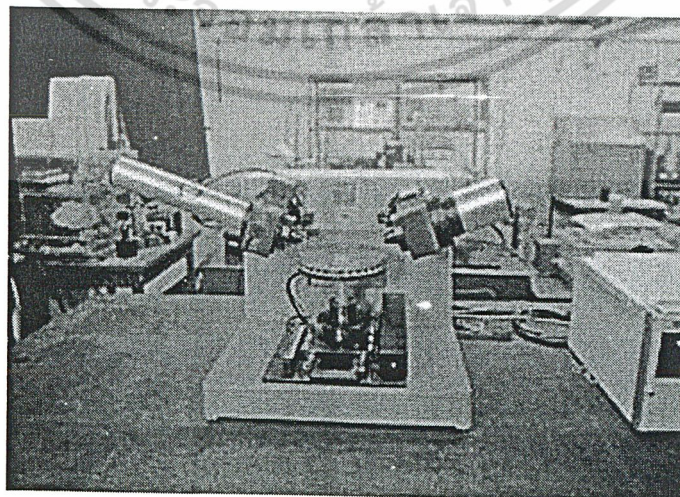
นำภาพสามมิติเชิงซ้อนดังกล่าวมาประยุกต์เป็นกุญแจแสง (Optical key) และบัตรประจำตัว (Holographic Identification) ซึ่งเป็นผลงานที่จดสิทธิบัตร



รูปที่ 2.22 แสดงการออกแบบระบบอ่านข้อมูลสามมิติใช้แทนบัตรประจำตัว

#### 5. การใช้เลเซอร์ในการวัด

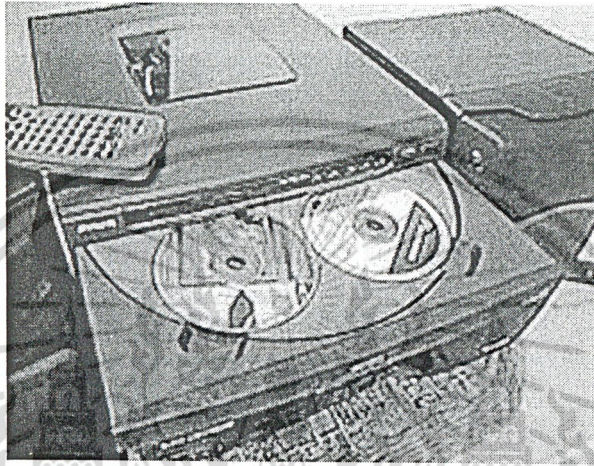
เลเซอร์มีค่าความยาวคลื่นคงที่ และเป็นลำแสงขนาน จึงถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานการวัดที่ละเอียดแม่นยำ เช่น การวัดขนาดของสิ่งของการวัดระยะทางทั้งใกล้และไกล โดยอาศัยหลักการของการสอดแทรก เช่น อินเทอร์เฟโรเมตรี (Interferometry) หลักการการสะท้อนของ คลื่น แสงที่เป็นพัลส์ และหลักการเกิดการเคลื่อนของเฟส (Phase Shift) ของ คลื่นแสงที่ถูกโมดูเลตแล้ว



รูปที่ 2.23 แสดงการใช้เลเซอร์ในการวัดความหนาของชั้นฟิล์มบาง ระดับไมครอนด้วยเทคนิค Ellipsometer เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้มาใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การใช้เลเซอร์ในอุปกรณ์สำนักงานและใช้ในบ้าน

เลเซอร์ไดโอดเป็นเลเซอร์ที่มีขนาดเล็กจิ๋วไม่กินไฟ จึงเหมาะนำมาประยุกต์กับอุปกรณ์สำนักงานและใช้ในบ้าน ได้แก่ การใช้เลเซอร์เป็นเลเซอร์พอยน์เตอร์ ใช้ในเครื่องถ่ายเอกสาร และเครื่องพิมพ์เอกสารแบบ เลเซอร์พรีนเตอร์ ใช้ในเครื่องเสียงคอมพิวเตอร์ ใช้ในเครื่องวิดีโอเลเซอร์ดิสก์ ฯลฯ



รูปที่ 2.24 แสดงเครื่องเล่นเลเซอร์ดิสก์

7. การใช้เลเซอร์ในงานด้านนิทรรศการ

แสงเลเซอร์มีลักษณะเด่น คือ มีลำแสงที่ระยิบระยับเนื่องจากการเกิดการสอดแทรกของแสงเลเซอร์ เมื่อฉายกระทบฝุ่นละอองในอากาศที่แขวนลอย ทำให้การแสดงผลการมีชีวิตชีวาเราจึงเห็นมีการนำเลเซอร์ไปใช้งานโฆษณา งานแสดงละคร งานบนเวที คอนเสิร์ต ฯลฯ ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.25 แสดงการใช้เลเซอร์ในงานนิทรรศการให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 8. การใช้เลเซอร์ในด้านเลเซอร์ฟิวชัน (Laser Fusion)

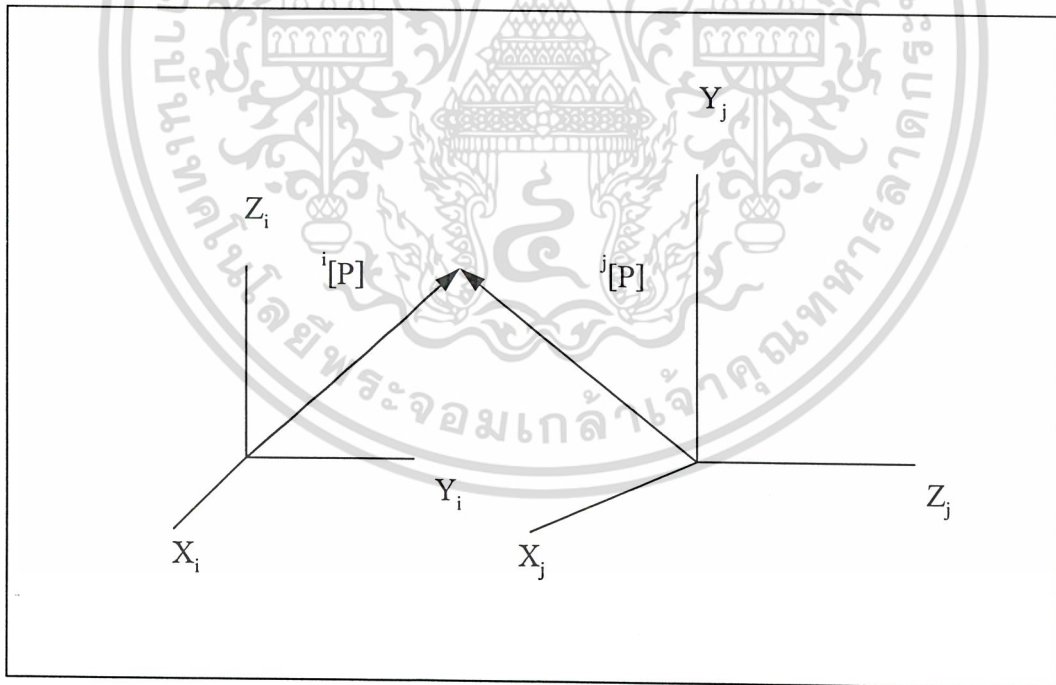
ฟิวชันเป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากการหลอมธาตุเบา เช่น ไฮโดรเจน หรือไอโซโทป ของไฮโดรเจน ให้กลายเป็นธาตุหนัก เช่น ฮีเลียมและมีพลังงานความร้อนเป็นผลพลอยได้จำนวนมาก จึงสามารถนำพลังงานดังกล่าวไปผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ปฏิกิริยาฟิวชันนี้สามารถชักนำให้เกิดและควบคุมด้วยแสงเลเซอร์ที่มีกำลังสูงมาก ๆ (มีขนาดเทรวาวัตต์ : TW หรือ 10<sup>12</sup> วัตต์) เลเซอร์ที่มีกำลังสูงนี้ ได้แก่ เลเซอร์แก้ว และเลเซอร์เอกไซเมอร์ เป็นเทคโนโลยีการประยุกต์เลเซอร์ที่กำลังวิจัยพัฒนาและหากทำได้สำเร็จจะทำให้สังคมโลกเรามีพลังงานที่สะอาดใช้เพราะปฏิกิริยาฟิวชันนี้ก็มีกัมมันตภาพรังสีน้อยมาก

### 2.4 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่โดยวิธี Inverse Kinematics

การเคลื่อนไหว (Kinematics) ของอุปกรณ์ คือการหาสมการเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถอธิบายในรูปแบบของเมตริกซ์ ที่เรียกกันว่า เมตริกซ์แปลงค่า (Transformation Matrices)

#### 2.4.1 การวิเคราะห์โดยวิธีทางเมตริกซ์ (Matrix Method of Analysis)

พิจารณาจากรูปที่ 2.26 เป็นการบอกตำแหน่งของจุดในโครง (Frame) ที่แตกต่างกัน 2 โครง คือ โครง  $i$  และโครง  $j$  ในแต่ละโครงจะมีระบบพิกัดคาร์ทีเซียน  $x, y, z$  ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.26 แสดงตำแหน่งของจุด P ในแต่ละ โครงที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อธิบายจุด P ในโครง i ในรูปเวกเตอร์ คือ

$${}^i[P] = \begin{bmatrix} P_{xi} \\ P_{yi} \\ P_{zi} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

อธิบายจุด P ในโครง j ในรูปเวกเตอร์ คือ

$${}^j[P] = \begin{bmatrix} P_{xj} \\ P_{yj} \\ P_{zj} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

ความสัมพันธ์ของเมตริกซ์  ${}^i[P]$  และ  ${}^j[P]$  กำหนดโดย

$${}^i[P] = {}^i_j[T] + {}^j[P] \quad (2.4)$$

โดยเมตริกซ์  $[T]$  มีมิติ  $3 \times 3$  ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ทั้งการหมุนและตำแหน่งของโครงสร้างทั้งสองที่ถูกเรียกว่า เมตริกซ์แปลงค่า การแปลงจากจุดในโครง i ไปสู่โครง j ก็เช่นเดียวกัน

$${}^j[P] = {}^j_i[T] {}^i[P] \quad (2.5)$$

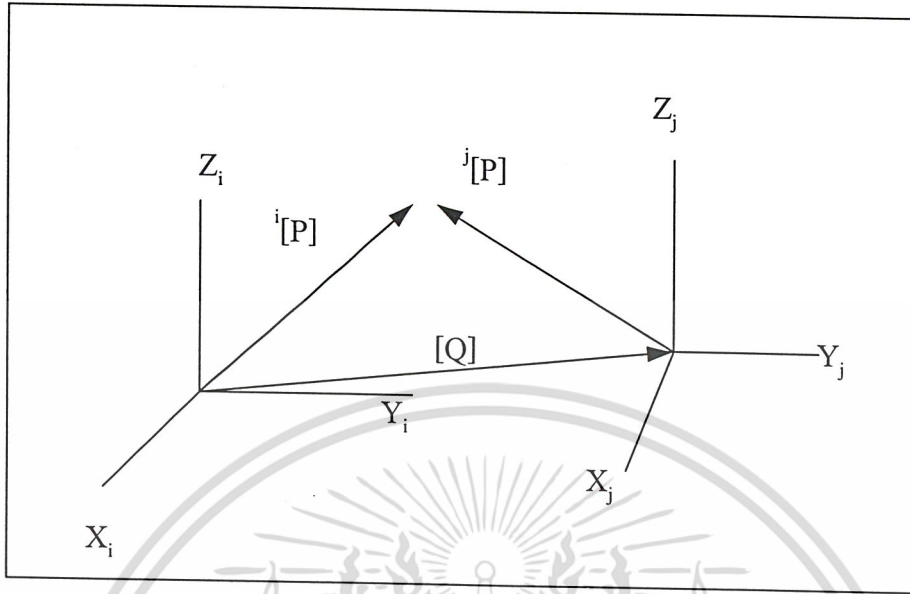
โดยที่

$${}^j_i[T] = {}^i_j[T]^{-1} \quad (2.6)$$

#### 2.4.2 การแปลงพิกัดรวมโดยใช้เมตริกซ์แปลงค่า (Homogeneous Coordinate Transformer)

การแปลงพิกัดรวมโดยใช้เมตริกซ์แปลงค่าด้วยวิธีการเคลื่อนย้ายจากจุดกำเนิดโดยไม่เปลี่ยนทิศแกน (Pure Translation and Homogeneous Coordinate)

จากรูปที่ 2.27 แสดงการเคลื่อนย้ายโครง j ที่สัมพันธ์กับโครง i โดยแกนทั้ง 3 เคลื่อนที่เป็นเวกเตอร์  ${}^i[P]$  จากจุดกำเนิด



รูปที่ 2.27 แสดงโครงง มี การเลื่อนจากจุดกำเนิด จากโครงง i เป็นระยะเวกเตอร์  ${}^i[Q]$

โดยแสดงเวกเตอร์ได้ดังนี้

$${}^i[Q] = \begin{bmatrix} Q_{xi} \\ Q_{yi} \\ Q_{zi} \end{bmatrix}$$

(2.7)

ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของจุด P จาก โครงง j เป็นจุด P ในโครงง i ได้ดังนี้

$$P_{xi} = P_{xi} + Q_{xi}$$

$$P_{yi} = P_{yi} + Q_{yi}$$

$$P_{zi} = P_{zi} + Q_{zi}$$

หรือ

$${}^i[P] = {}^j[P] + {}^i[Q]$$

(2.8)

พิจารณาโดยอาศัยเมตริกซ์แปลงค่า

$${}^i[P] = {}^j[T] + {}^j[P]$$

(2.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนด

$${}^i[P] = \begin{bmatrix} P_{xi} \\ P_{yi} \\ P_{zi} \\ 1 \end{bmatrix}$$

และ

$${}^j[P] = \begin{bmatrix} P_{xj} \\ P_{yj} \\ P_{zj} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

สามารถเขียนความสัมพันธ์ของ  ${}^i[P]$  และ  ${}^j[P]$  ในรูปของเมตริกซ์แปลงค่า  $4 \times 4$  กำหนดโดย

$${}^i_j[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Q_{xi} \\ 0 & 1 & 0 & Q_{xi} \\ 0 & 0 & 1 & Q_{xi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

จากหลักการในการสร้างเมตริกซ์แปลงค่า ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนพิกัดของจุดเชื่อมต่อต่างๆมาสู่ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน โดยยึดจุดกำเนิดที่ตำแหน่งปลาย

ทั่วไปแล้วนั้น วิธีการแก้ปัญหาด้วยการวิเคราะห์แบบ Inverse Kinematics สามารถกระทำได้หลากหลายวิธีการ เช่น Inverse Transform (Paul et al. [1981]), Screw Algebra (Kohli and Soni [1975]), Dual Matrices (Denavit [1956]), Dual Quaternion (Yang and Freudenstein [1964]), Iterative (Uicker et al. [1964]), and Geometric Approaches (Lee and Ziegler [1984]) โดยทั้งหมดนี้จะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาองศาการเคลื่อนที่ของจุดเชื่อมต่อ โดยอาศัยตำแหน่งปลายในการอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงาน

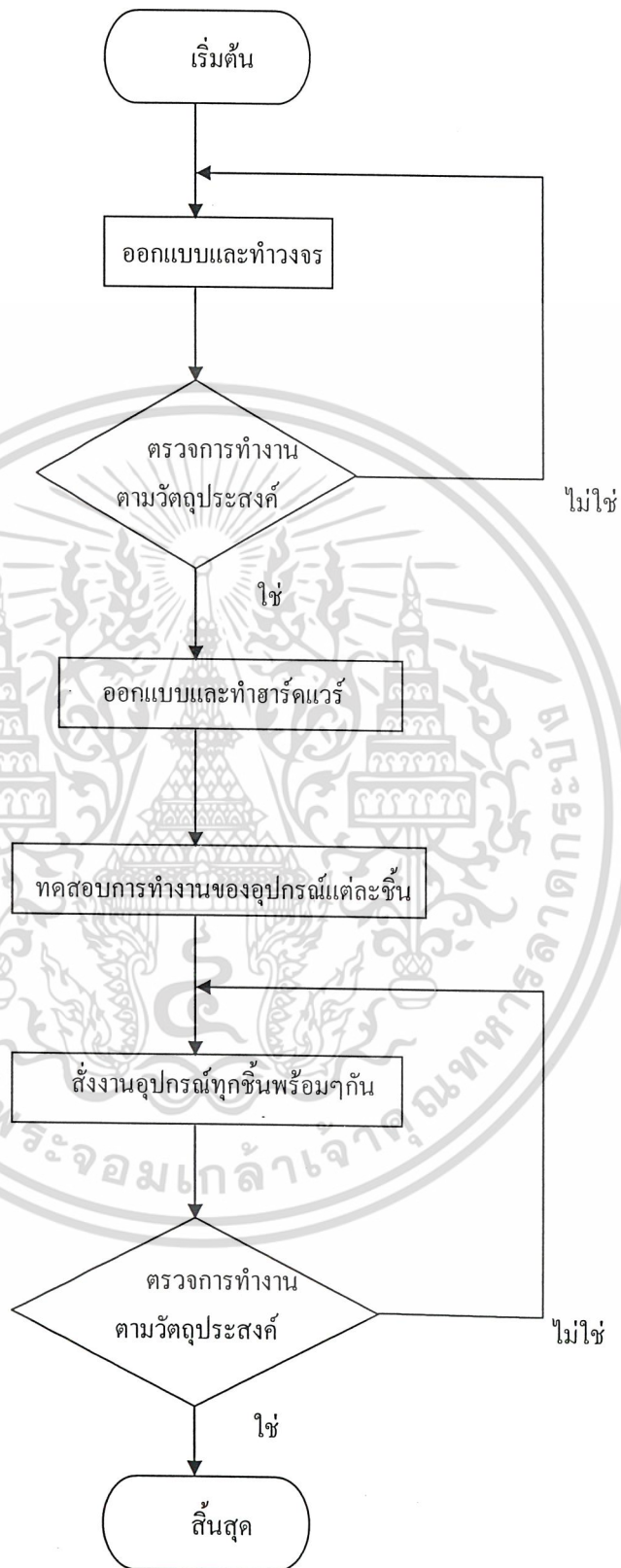
### 3.1 การวางแผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน ประกอบด้วย 10 ขั้นตอน ดังนี้

1. วางแผนการทำงาน
2. ศึกษาวิธีการทำงาน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
3. ทำการออกแบบ
4. ปรับปรุงแก้ไขในจุดที่บกพร่อง
5. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับวงจรควบคุม
6. ศึกษาเกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมด้วย Visual Basic
7. วางแผนและสร้างฮาร์ดแวร์
8. วางแผนและสร้างวงจรควบคุม
9. ทดสอบการทำงาน
10. สรุปและจัดทำปริญญานิพนธ์

### 3.2 แผนการทำงานและสร้างเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์พร้อมโปรแกรมควบคุมการทำงาน

ในการสร้างเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์และโปรแกรมควบคุมการทำงาน ได้ทำการวางแผนการทำงาน ออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของฮาร์ดแวร์ ส่วนของวงจรควบคุม และส่วนของโปรแกรมที่ใช้ติดต่อและควบคุมการทำงาน ในการทำงานจะเน้นไปในส่วนของการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงาน ซึ่งจะเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานที่สุด เนื่องจากต้องมีการทดสอบการทำงานของโปรแกรม และทำการแก้ไขจนกระทั่งสามารถควบคุมการทำงานได้ตามวัตถุประสงค์



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1 การทำงานในส่วนของฮาร์ดแวร์

ขั้นตอนที่สำคัญมีดังนี้

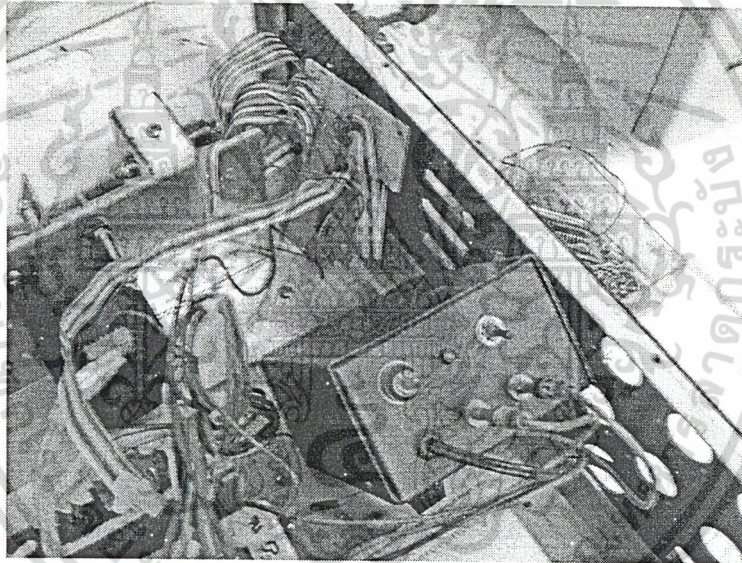
1. ทำการศึกษากลไกที่จะใช้ในการควบคุมชิ้นส่วนต่างๆ ให้สามารถแสดงผลออกมาในรูปของกราฟฟิก
2. จัดหาชิ้นส่วนที่จำเป็นในการสร้างเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์
3. ประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทดสอบโปรแกรมควบคุมการทำงาน
4. ทดสอบและแก้ไขในส่วนที่บกพร่อง

อุปกรณ์ที่จำเป็นในการสร้างเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์มีดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟสำหรับเลเซอร์ไดโอด

I/P 230 Vac

O/P 5.35 Vdc



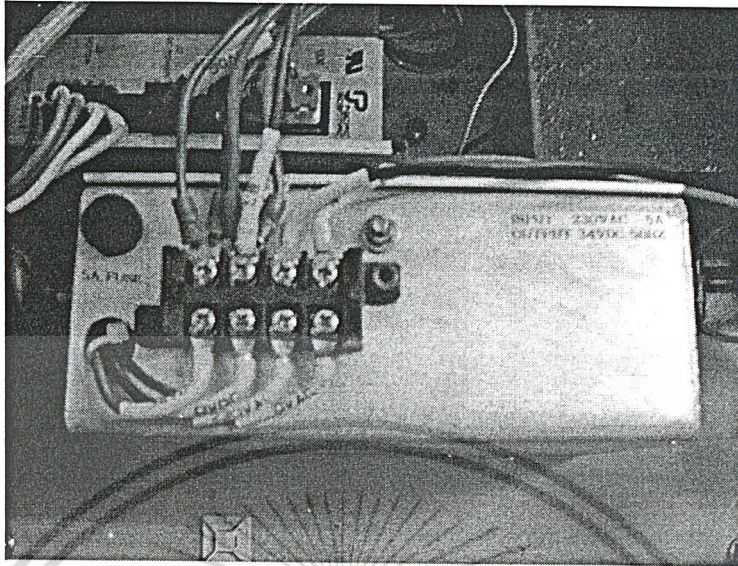
รูปที่ 3.2 แสดงแหล่งจ่ายไฟสำหรับเลเซอร์ไดโอด

2. แหล่งจ่ายไฟสำหรับมอเตอร์

I/P 230 Vac

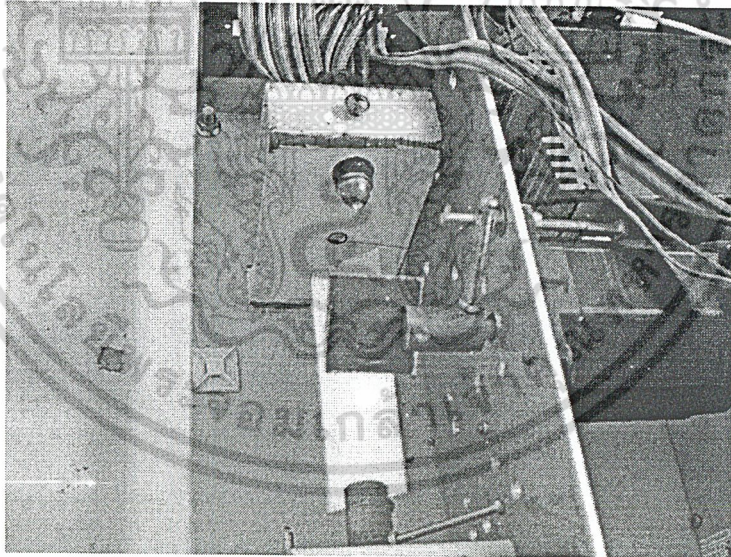
O/P 34 Vdc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงแหล่งจ่ายไฟสำหรับมอเตอร์

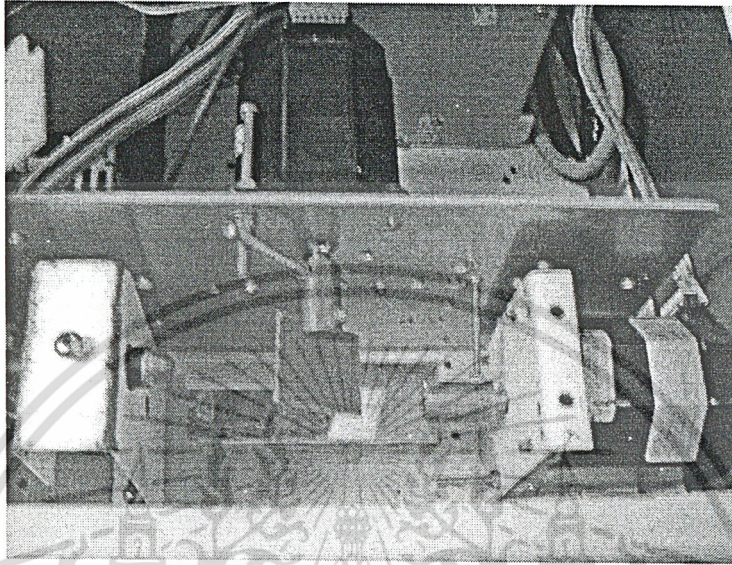
3. หลอดเลเซอร์ไดโอด



รูปที่ 3.4 แสดงหลอดเลเซอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. สเต็ปมอเตอร์พร้อมติดตั้งกระจกสะท้อนแสง

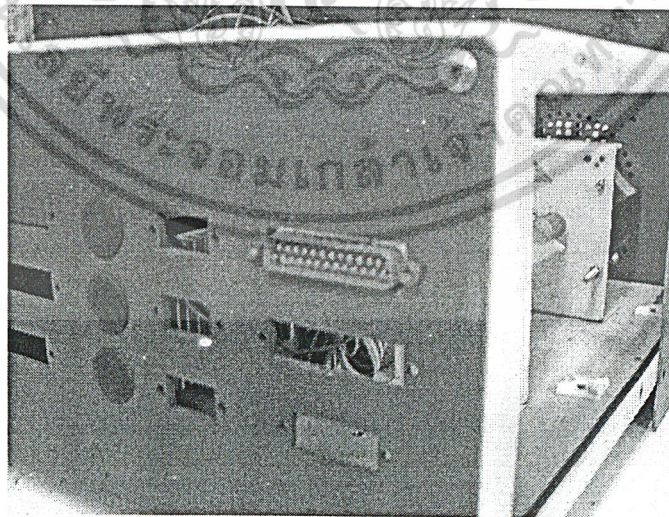


รูปที่ 3.5 แสดงสเต็ปมอเตอร์พร้อมติดตั้งกระจกสะท้อนแสง

#### 3.2.2 การทำงานในส่วนของวงจรควบคุม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานประกอบด้วย

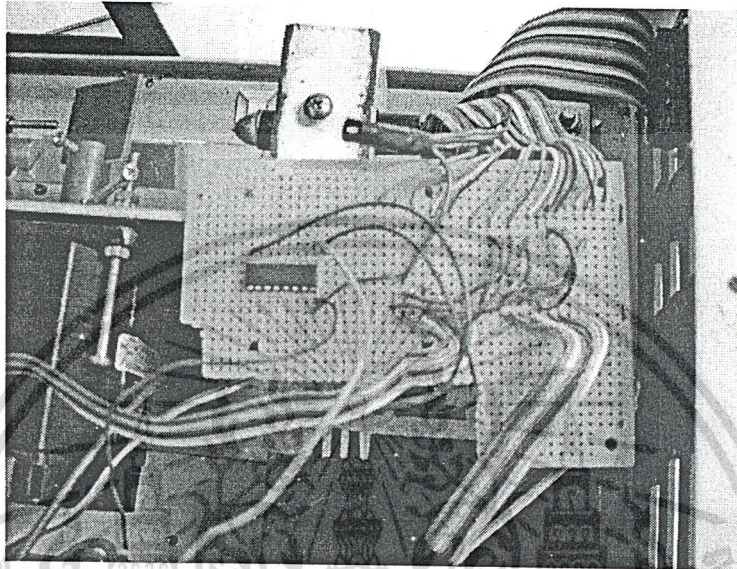
1. จุดต่อพอร์ตขนานและขั้วต่อสาย



รูปที่ 3.6 แสดงจุดต่อพอร์ตขนานและขั้วต่อสาย

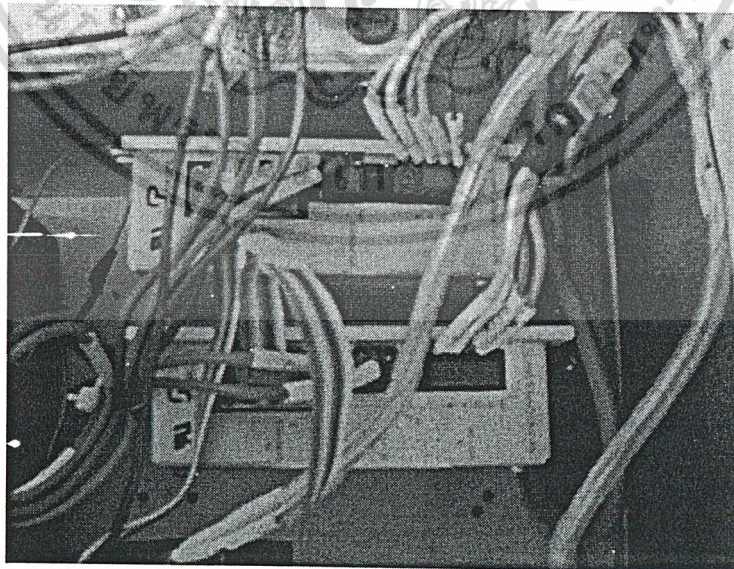
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. IC ULN2003



รูปที่ 3.7 แสดง IC ULN2003

## 3. ชุดควบคุมสเต็ปมอเตอร์แบบไมโครสเต็ปของแปซิฟิก (Pacific Microstep Controller) ความละเอียดการควบคุม 50,000 สเต็ปต่อรอบ

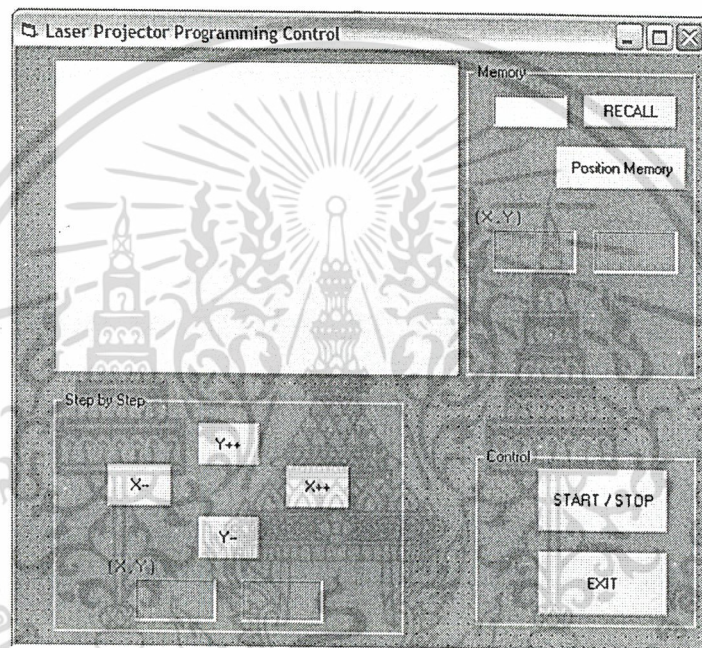


รูปที่ 3.8 แสดงชุดควบคุมสเต็ปมอเตอร์แบบไมโครสเต็ปของแปซิฟิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 การทำงานในส่วนของโปรแกรมที่ใช้ติดต่อและควบคุมการทำงาน

ทำการศึกษาการเขียนโปรแกรมด้วย Visual Basic เพื่อเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์ให้สามารถรับ - ส่งข้อมูล โดยแบ่งการทำงานออกเป็นการศึกษา การออกแบบ การสร้างรูปแบบของโปรแกรม และการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมกับเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์



รูปที่ 3.8 แสดง โปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

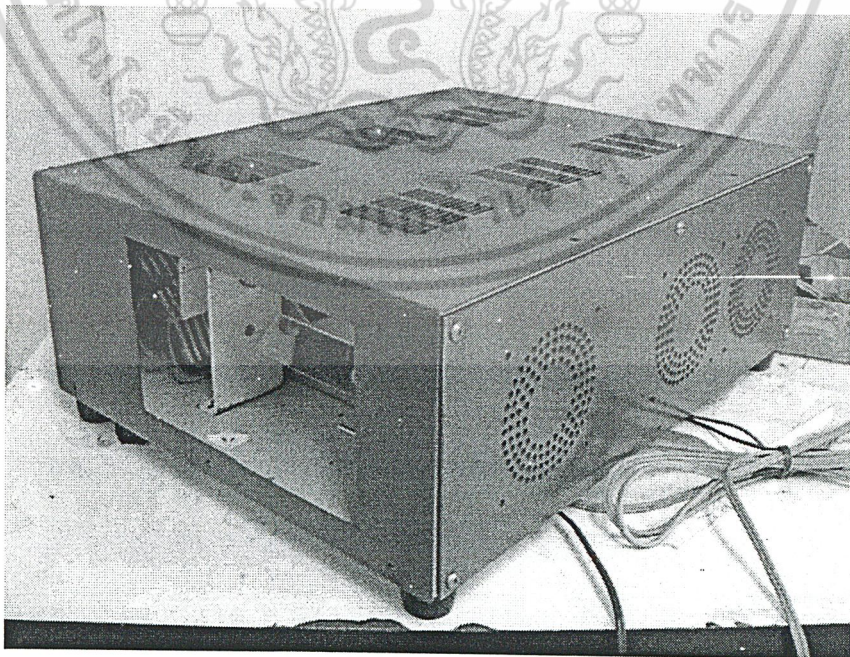
## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

ในการศึกษาการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์แบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของฮาร์ดแวร์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์ เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้อุปกรณ์และประกอบเข้าเป็นเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์ ส่วนต่อมาคือส่วนของวงจรควบคุมการทำงาน ได้มีการนำเอาชุดควบคุมสเต็ปมอเตอร์สำเร็จรูปมาปรับใช้กับเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์ที่สร้างขึ้นมา ซึ่งวงจรที่นำมาใช้นี้มีความสามารถในการปรับค่าความละเอียดของสเต็ปมอเตอร์จาก 200 สเต็ปต่อรอบ ให้มีค่าถึง 50,000 สเต็ปต่อรอบ นอกจากนี้ยังได้เลือกเอาไอซี ULN2003 มาเป็นตัวควบคุมการทำงานของหลอดเลเซอร์ โดยทั้งหมดจะรับข้อมูลคำสั่งผ่านทางพอร์ตขนานที่ติดตั้งไว้ก่อนหน้านี้ ส่วนสุดท้าย คือส่วนของโปรแกรมควบคุมการทำงาน ทำการศึกษาการเขียนโปรแกรมด้วย Visual Basic เพื่อเขียนโปรแกรมควบคุมเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์ ให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลระหว่างการทำงานของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์กับคอมพิวเตอร์

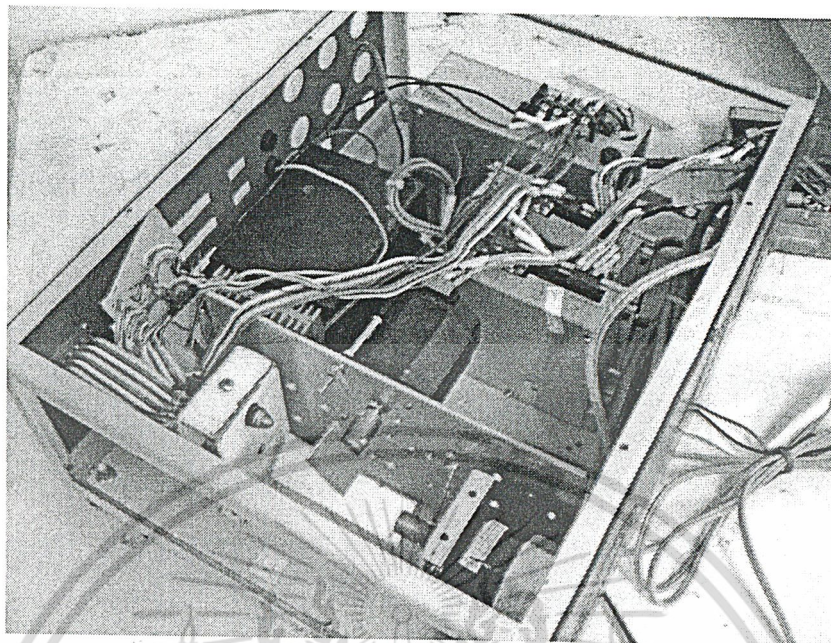
#### 4.1 ผลการดำเนินงานด้านฮาร์ดแวร์

ผลการดำเนินงานด้านฮาร์ดแวร์สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์

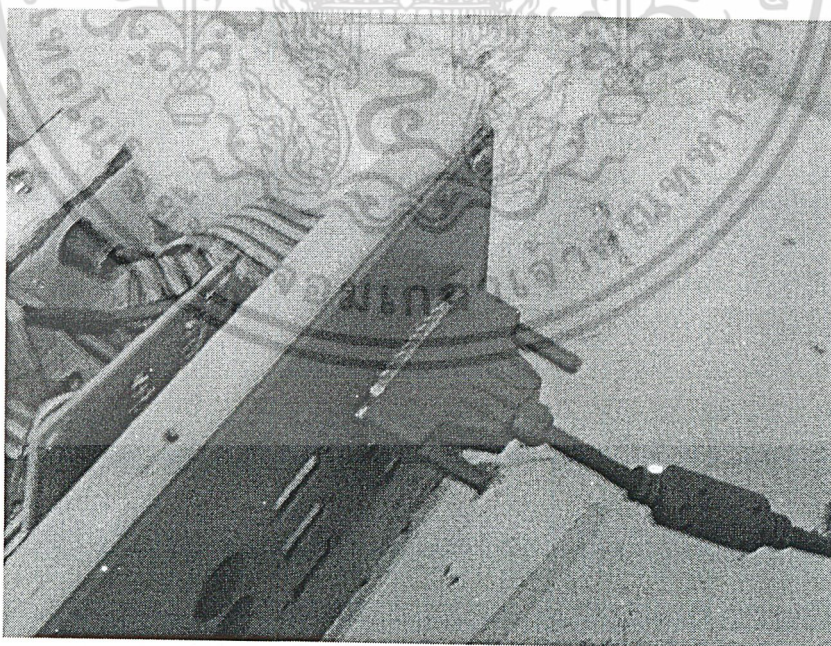
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์

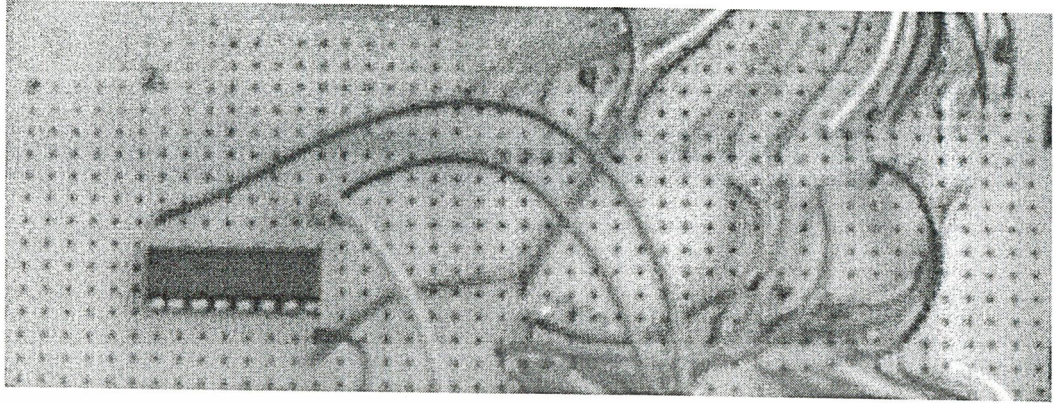
#### 4.2 ผลการดำเนินงานด้านวงจรควบคุมการทำงาน

ผลการดำเนินงานวงจรควบคุมการทำงานสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้



รูปที่ 4.3 แสดงพอร์ตขานานซึ่งใช้รับ – ส่งข้อมูลระหว่างเครื่องและคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



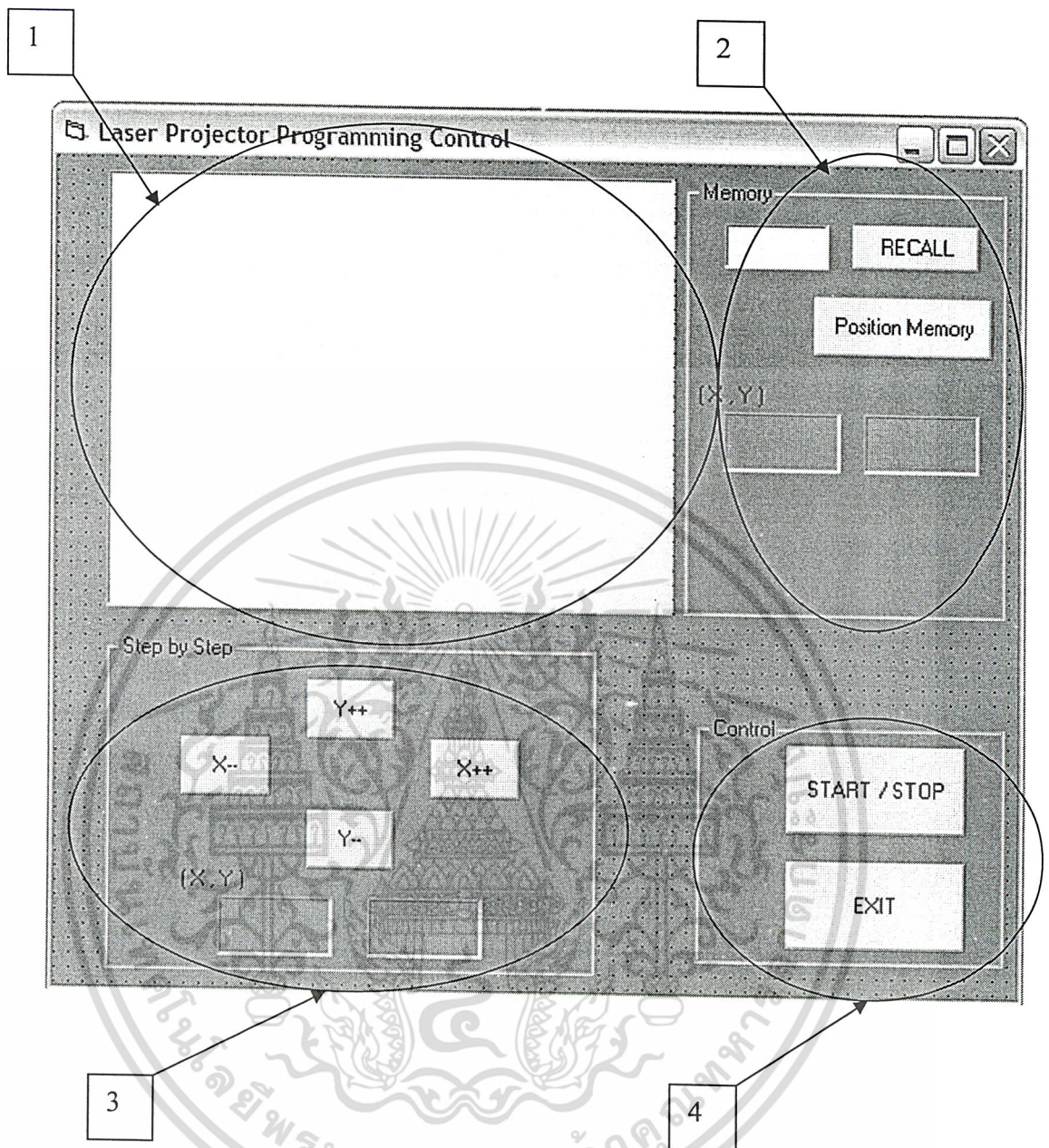
รูปที่ 4.3 แสดงแผงวงจรซึ่งใช้สำหรับรับ - ส่งข้อมูลเพื่อการควบคุมการทำงาน

#### 4.3 ผลการดำเนินงานด้านโปรแกรมควบคุมการทำงาน

ผลการดำเนินงานด้านโปรแกรมควบคุมการทำงานสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้  
เมื่อเริ่มต้นโปรแกรม โปรแกรมจะประมวลผลพิกัดของจุดแต่ละจุดจากรูปที่สร้างขึ้นจากจอร์ับข้อมูลของตัวโปรแกรม เพื่อคำนวณหาระยะห่างระหว่างจุดสองจุดที่ติดกันในแต่ละแกน (แกน X และแกน Y) จากนั้นจึงนำระยะห่างระหว่างจุดนั้นไปหาอัตราส่วนเพื่อที่จะนำค่าที่ได้ไปสั่งงานมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ให้เคลื่อนที่ไปพร้อมๆกัน เพื่อสะท้อนแสงเลเซอร์ซึ่งสั่งให้ทำงานเมื่อเปิดโปรแกรม ค่าอัตราส่วนที่ได้จากการหาระยะห่างระหว่างจุดจะมีค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ จึงนำเอาอัตราส่วนนี้มาใช้ในการคำนวณเพื่อสั่งงานมอเตอร์

นอกจากนี้ หากต้องการที่จะบันทึกข้อมูลรูปภาพที่สร้างขึ้นไว้ ก็สามารถจัดเก็บลงภายในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ เพื่อเรียกใช้งานในครั้งต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงหน้าจอของโปรแกรมที่สร้างขึ้นสำหรับตั้งงานเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์

1. เป็นหน้าจอสำหรับรับข้อมูลรูปภาพ สั่งงานโดยเมาส์ของคอมพิวเตอร์
2. เป็นหน้าจอสำหรับบันทึกข้อมูลรูปภาพที่สร้างไว้ และเรียกข้อมูลเก่าที่บันทึกไว้ก่อนหน้ามาใช้งาน
3. เป็นหน้าจอสำหรับการควบคุมด้วยมือ
4. เป็นหน้าจอสำหรับสั่งให้เริ่ม - หยุดทำงาน รวมทั้งออกจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิเคราะห์การดำเนินงาน

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

สิ่งที่สนใจในผลการทดลองนี้มากที่สุดคือ โปรแกรมจะสามารถสั่งงานให้มอเตอร์ทำงานอย่างสัมพันธ์กันจนสามารถสะท้อนแสงเลเซอร์ให้เกิดเป็นภาพกราฟฟิกได้หรือไม่ จะเห็นได้ว่าการแสดงผลในระยะไกลจะเกิดความผิดพลาดที่สังเกตได้ชัดเจนกว่าการแสดงผลในระยะใกล้ เนื่องจากระยะห่างของจากรับภาพจะมีผลอย่างมากต่อภาพที่เห็น แต่ถึงอย่างไรผลการทดลองที่ได้ถือเป็นที่น่าพอใจ หากแต่ต้องปรับปรุงเมื่อต้องการให้ภาพที่ได้มีความสวยงามกว่านี้ ซึ่งผู้ใดสนใจก็สามารถนำปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้ไปใช้ประกอบการศึกษา สร้าง และพัฒนาให้เครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์ทำงานได้ดียิ่งขึ้นไป

#### 5.2 ข้อดีของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์และโปรแกรมควบคุมการทำงาน

จากการศึกษาพบว่าข้อดีของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์และโปรแกรมควบคุมการทำงาน คือ

1. เครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์มีขนาดไม่ใหญ่มาก สามารถเคลื่อนย้ายได้
2. โปรแกรมควบคุมการทำงานถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน
3. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สามารถหาซื้อได้ง่าย เนื่องจากส่วนใหญ่จะเป็นอุปกรณ์มาตรฐาน

#### 5.3 ข้อจำกัดของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์และโปรแกรมควบคุมการทำงาน

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่าเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์และโปรแกรมควบคุมยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ

1. มอเตอร์ที่ใช้ไม่สามารถตอบสนองความเร็วในระดับสูงได้ ส่งผลให้ภาพที่ได้ขาดความต่อเนื่อง ยังไม่สามารถมองเห็นเป็นภาพนิ่งได้
2. น้ำหนักของเครื่องค่อนข้างสูง อาจเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนย้าย
3. พื้นที่การทำงานของเครื่องถูกจำกัดโดยระยะห่างระหว่างชุดสะท้อนแสง รวมทั้งจากรับภาพ
4. การป้อนค่าทางหน้าจอของโปรแกรมด้วยเมาส์มีความยืดหยุ่นน้อย ทำให้เป็นการยากที่จะได้ภาพที่สวยงาม
5. โปรแกรมที่สร้างขึ้นไม่สามารถปฏิบัติการบนระบบ Windows XP ได้ เนื่องจากความไม่สอดคล้องกันของระบบการส่งผ่านข้อมูล จึงจำกัดแค่ Windows 98 และ Windows ME เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสรุปข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาโครงการได้ดังนี้

1. ปรับเปลี่ยนมอเตอร์ที่ใช้ ให้สามารถรองรับความเร็วที่สูงกว่านี้ เพื่อให้ภาพที่ได้สวยงามยิ่งขึ้น
2. พัฒนาให้การทำงานของเครื่องมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น เช่น เปลี่ยนมาใช้อัตราส่วนจากองศาการเคลื่อนที่แทนการใช้อัตราส่วนจากระยะห่างระหว่างจุด
3. ออกแบบโปรแกรมให้สามารถบันทึกข้อมูลการทำงานในรูปแบบของฐานข้อมูล
4. ปรับปรุงโครงสร้างทางกายภาพของเครื่องฉายภาพด้วยเลเซอร์ให้มีความเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น เช่น เปลี่ยนมาใช้กระจกที่มีขนาดเล็กลงเพื่อลดการสั่นของแผ่นกระจกขณะทำงาน
5. สร้างโปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานให้สามารถทำงานได้หลากหลายตามความต้องการของผู้ใช้ รวมทั้งออกแบบโปรแกรมในการสื่อสารกับผู้ใช้ (Help) เพื่อให้สะดวกแก่การศึกษาและใช้งานด้วยตัวเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. วารสารเซมิคอนดักเตอร์ เล่มที่ 122 , 239 , 350 : เจาะกันสเต็มปีงมอเตอร์
2. สัจจะ จรัสรุ่งรวีร : Visual Basic 5.0
3. อภิชาติ ภู่หลับ : เริ่มต้นเขียน โปรแกรมติดต่อและควบคุมฮาร์ดแวร์ด้วย Visual Basic, DEV Book.
4. K.S. Fu , R.C. Gonzalez , C.S.G. Lee : ROBOTICS., McGRAW-HILL Book Company.
5. Pacific Scientific : MA6410 Installation & Hardware Reference Manual, Automation Technology Group.
6. [www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)
7. [www.kanchanapisek.or.th](http://www.kanchanapisek.or.th)
8. [www.kmutt.ac.th](http://www.kmutt.ac.th)
9. [www.thaiio.com](http://www.thaiio.com)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



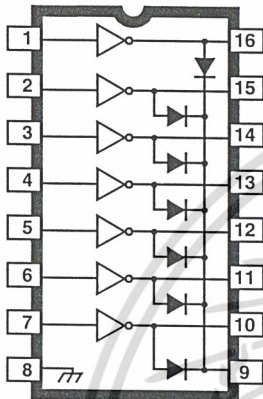
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 2003 THRU 2024

Data Sheet  
29304F

## HIGH-VOLTAGE, HIGH-CURRENT DARLINGTON ARRAYS



Dwg. No. A-9594

Note that the ULN20xxA series (dual in-line package) and ULN20xxL series (small-outline IC package) are electrically identical and share a common terminal number assignment.

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Output Voltage, $V_{CE}$	
(ULN200xA and ULN200xL) .....	50 V
(ULN202xA and ULN202xL) .....	95 V
Input Voltage, $V_{IN}$ .....	30 V
Continuous Output Current,	
$I_C$ .....	500 mA
Continuous Input Current, $I_{IN}$ .....	25 mA
Power Dissipation, $P_D$	
(one Darlington pair) .....	1.0 W
(total package) .....	See Graph
Operating Temperature Range,	
$T_A$ .....	-20°C to +85°C
Storage Temperature Range,	
$T_S$ .....	-55°C to +150°C

Ideally suited for interfacing between low-level logic circuitry and multiple peripheral power loads, the Series ULN20xxA/L high-voltage, high-current Darlington arrays feature continuous load current ratings to 500 mA for each of the seven drivers. At an appropriate duty cycle depending on ambient temperature and number of drivers turned ON simultaneously, typical power loads totaling over 230 W (350 mA x 7, 95 V) can be controlled. Typical loads include relays, solenoids, stepping motors, magnetic print hammers, multiplexed LED and incandescent displays, and heaters. All devices feature open-collector outputs with integral clamp diodes.

The ULN2003A/L and ULN2023A/L have series input resistors selected for operation directly with 5 V TTL or CMOS. These devices will handle numerous interface needs — particularly those beyond the capabilities of standard logic buffers.

The ULN2004A/L and ULN2024A/L have series input resistors for operation directly from 6 to 15 V CMOS or PMOS logic outputs.

The ULN2003A/L and ULN2004A/L are the standard Darlington arrays. The outputs are capable of sinking 500 mA and will withstand at least 50 V in the OFF state. Outputs may be paralleled for higher load current capability. The ULN2023A/L and ULN2024A/L will withstand 95 V in the OFF state.

These Darlington arrays are furnished in 16-pin dual in-line plastic packages (suffix “A”) and 16-lead surface-mountable SOICs (suffix “L”). All devices are pinned with outputs opposite inputs to facilitate ease of circuit board layout. All devices are rated for operation over the temperature range of -20°C to +85°C. Most (see matrix, next page) are also available for operation to -40°C; to order, change the prefix from “ULN” to “ULQ”.

### FEATURES

- TTL, DTL, PMOS, or CMOS-Compatible Inputs
- Output Current to 500 mA
- Output Voltage to 95 V
- Transient-Protected Outputs
- Dual In-Line Plastic Package or Small-Outline IC Package

x = digit to identify specific device. Characteristic shown applies to family of devices with remaining digits as shown. See matrix on next page.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

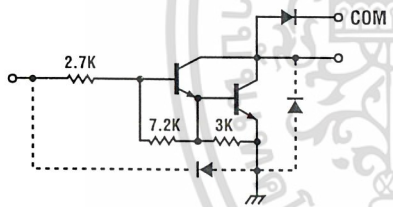
**2003 THRU 2024  
HIGH-VOLTAGE,  
HIGH-CURRENT  
DARLINGTON ARRAYS**

**DEVICE PART NUMBER DESIGNATION**

$V_{CE(MAX)}$	50 V	95 V
$I_{C(MAX)}$	500 mA	500 mA
Logic	Part Number	
5V TTL, CMOS	ULN2003A* ULN2003L*	ULN2023A* ULN2023L
6-15 V CMOS, PMOS	ULN2004A* ULN2004L*	ULN2024A ULN2024L

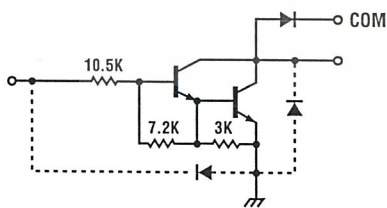
**PARTIAL SCHEMATICS**

ULN20x3A/L (Each Driver)



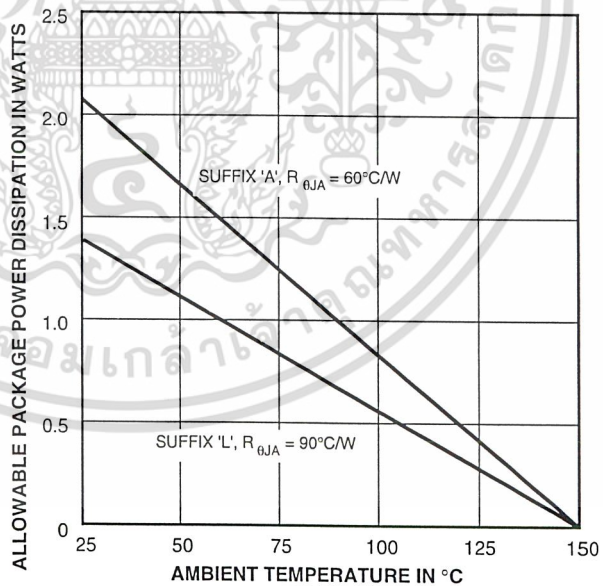
Dwg. No. A-9651

ULN20x4A/L (Each Driver)



Dwg. No. A-9898A

\* Also available for operation between -40°C and +85°C. To order, change prefix from "ULN" to "ULQ".



Dwg. GP-006A

X = Digit to identify specific device. Specification shown applies to family of devices with remaining digits as shown. See matrix above.



115 Northeast Cutoff, Box 15036  
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000  
Copyright © 1974, 1998 Allegro MicroSystems, Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2003 THRU 2024  
HIGH-VOLTAGE,  
HIGH-CURRENT  
DARLINGTON ARRAYS**

**Types ULN2003A, ULN2003L, ULN2004A, and ULN2004L  
ELECTRICAL CHARACTERISTICS at +25°C (unless otherwise noted).**

Characteristic	Symbol	Test Fig.	Applicable Devices	Test Conditions	Limits			
					Min.	Typ.	Max.	Units
Output Leakage Current	$I_{CEX}$	1A	All	$V_{CE} = 50\text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$	—	< 1	50	$\mu\text{A}$
				$V_{CE} = 50\text{ V}, T_A = 70^\circ\text{C}$	—	< 1	100	$\mu\text{A}$
		1B	ULN2004A/L	$V_{CE} = 50\text{ V}, T_A = 70^\circ\text{C}, V_{IN} = 1.0\text{ V}$	—	< 5	500	$\mu\text{A}$
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(SAT)}$	2	All	$I_C = 100\text{ mA}, I_B = 250\text{ }\mu\text{A}$	—	0.9	1.1	V
				$I_C = 200\text{ mA}, I_B = 350\text{ }\mu\text{A}$	—	1.1	1.3	V
				$I_C = 350\text{ mA}, I_B = 500\text{ }\mu\text{A}$	—	1.3	1.6	V
Input Current	$I_{IN(ON)}$	3	ULN2003A/L	$V_{IN} = 3.85\text{ V}$	—	0.93	1.35	mA
			ULN2004A/L	$V_{IN} = 5.0\text{ V}$	—	0.35	0.5	mA
			ULN2004A/L	$V_{IN} = 12\text{ V}$	—	1.0	1.45	mA
	$I_{IN(OFF)}$	4	All	$I_C = 500\text{ }\mu\text{A}, T_A = 70^\circ\text{C}$	50	65	—	$\mu\text{A}$
Input Voltage	$V_{IN(ON)}$	5	ULN2003A/L	$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 200\text{ mA}$	—	—	2.4	V
				$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 250\text{ mA}$	—	—	2.7	V
				$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 300\text{ mA}$	—	—	3.0	V
		ULN2004A/L	$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 125\text{ mA}$	—	—	5.0	V	
			$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 200\text{ mA}$	—	—	6.0	V	
			$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 275\text{ mA}$	—	—	7.0	V	
			$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 350\text{ mA}$	—	—	8.0	V	
Input Capacitance	$C_{IN}$	—	All		—	15	25	pF
Turn-On Delay	$t_{PLH}$	8	All	$0.5 E_{IN}$ to $0.5 E_{OUT}$	—	0.25	1.0	$\mu\text{s}$
Turn-Off Delay	$t_{PHL}$	8	All	$0.5 E_{IN}$ to $0.5 E_{OUT}$	—	0.25	1.0	$\mu\text{s}$
Clamp Diode Leakage Current	$I_R$	6	All	$V_R = 50\text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$	—	—	50	$\mu\text{A}$
				$V_R = 50\text{ V}, T_A = 70^\circ\text{C}$	—	—	100	$\mu\text{A}$
Clamp Diode Forward Voltage	$V_F$	7	All	$I_F = 350\text{ mA}$	—	1.7	2.0	V

Complete part number includes suffix to identify package style: A = DIP, L = SOIC.

**2003 THRU 2024  
HIGH-VOLTAGE,  
HIGH-CURRENT  
DARLINGTON ARRAYS**

**Types ULN2023A, ULN2023L, ULN2024A, and ULN2024L  
ELECTRICAL CHARACTERISTICS at +25°C (unless otherwise noted).**

Characteristic	Symbol	Test Fig.	Applicable Devices	Test Conditions	Limits			Units
					Min.	Typ.	Max.	
Output Leakage Current	$I_{CEX}$	1A	All	$V_{CE} = 95\text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$	—	< 1	50	$\mu\text{A}$
				$V_{CE} = 95\text{ V}, T_A = 70^\circ\text{C}$	—	< 1	100	$\mu\text{A}$
		1B	ULN2024A/L	$V_{CE} = 95\text{ V}, T_A = 70^\circ\text{C}, V_{IN} = 1.0\text{ V}$	—	< 5	500	$\mu\text{A}$
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(SAT)}$	2	All	$I_C = 100\text{ mA}, I_B = 250\text{ }\mu\text{A}$	—	0.9	1.1	V
				$I_C = 200\text{ mA}, I_B = 350\text{ }\mu\text{A}$	—	1.1	1.3	V
				$I_C = 350\text{ mA}, I_B = 500\text{ }\mu\text{A}$	—	1.3	1.6	V
Input Current	$I_{IN(ON)}$	3	ULN2023A/L	$V_{IN} = 3.85\text{ V}$	—	0.93	1.35	mA
			ULN2024A/L	$V_{IN} = 5.0\text{ V}$	—	0.35	0.5	mA
				$V_{IN} = 12\text{ V}$	—	1.0	1.45	mA
	$I_{IN(OFF)}$	4	All	$I_C = 500\text{ }\mu\text{A}, T_A = 70^\circ\text{C}$	50	65	—	$\mu\text{A}$
Input Voltage	$V_{IN(ON)}$	5	ULN2023A/L	$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 200\text{ mA}$	—	—	2.4	V
				$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 250\text{ mA}$	—	—	2.7	V
				$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 300\text{ mA}$	—	—	3.0	V
		ULN2024A/L	$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 125\text{ mA}$	—	—	5.0	V	
			$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 200\text{ mA}$	—	—	6.0	V	
			$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 275\text{ mA}$	—	—	7.0	V	
			$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 350\text{ mA}$	—	—	8.0	V	
Input Capacitance	$C_{IN}$	—	All		—	15	25	pF
Turn-On Delay	$t_{PLH}$	8	All	$0.5 E_{IN}$ to $0.5 E_{OUT}$	—	0.25	1.0	$\mu\text{s}$
Turn-Off Delay	$t_{PHL}$	8	All	$0.5 E_{IN}$ to $0.5 E_{OUT}$	—	0.25	1.0	$\mu\text{s}$
Clamp Diode Leakage Current	$I_R$	6	All	$V_R = 95\text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$	—	—	50	$\mu\text{A}$
				$V_R = 95\text{ V}, T_A = 70^\circ\text{C}$	—	—	100	$\mu\text{A}$
Clamp Diode Forward Voltage	$V_F$	7	All	$I_F = 350\text{ mA}$	—	1.7	2.0	V

Complete part number includes suffix to identify package style: A = DIP, L = SOIC.



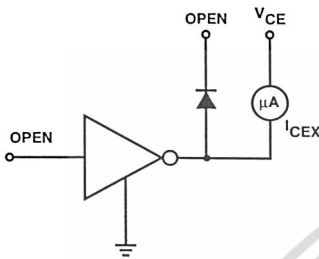
115 Northeast Cutoff, Box 15036  
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 2003 THRU 2024 HIGH-VOLTAGE, HIGH-CURRENT DARLINGTON ARRAYS

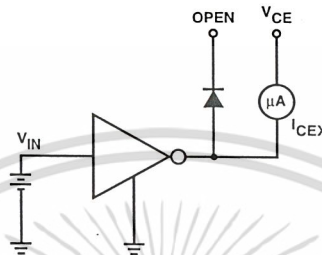
## TEST FIGURES

FIGURE 1A



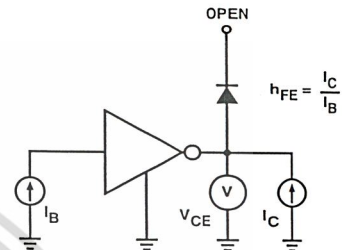
Dwg. No. A-9729A

FIGURE 1B



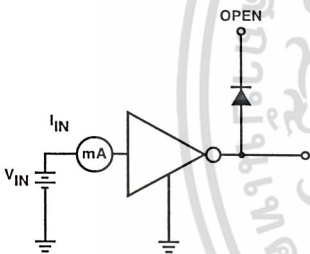
Dwg. No. A-9730A

FIGURE 2



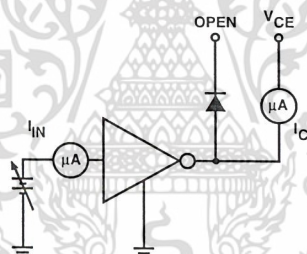
Dwg. No. A-9731A

FIGURE 3



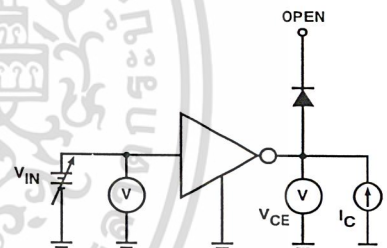
Dwg. No. A-9732A

FIGURE 4



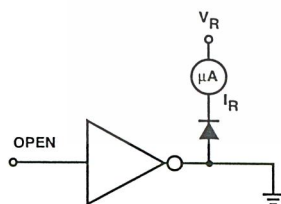
Dwg. No. A-9733A

FIGURE 5



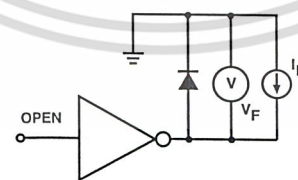
Dwg. No. A-9734A

FIGURE 6



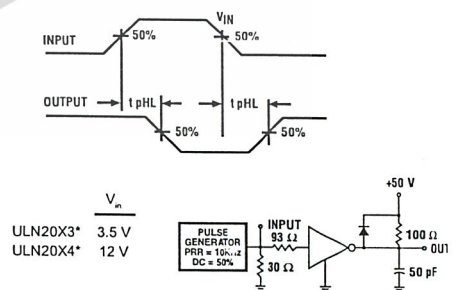
Dwg. No. A-9735A

FIGURE 7



Dwg. No. A-9736A

FIGURE 8



\* Complete part number includes a final letter to indicate package.

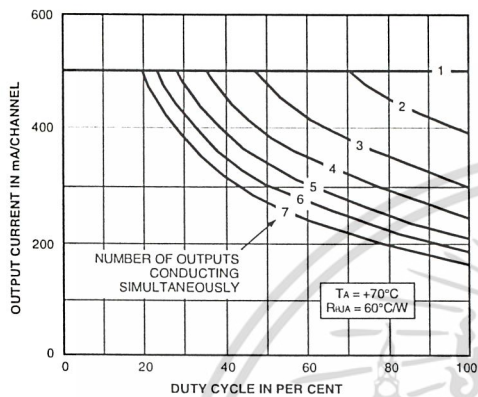
X = Digit to identify specific device. Specification shown applies to family of devices with remaining digits as shown.

www.allegromicro.com

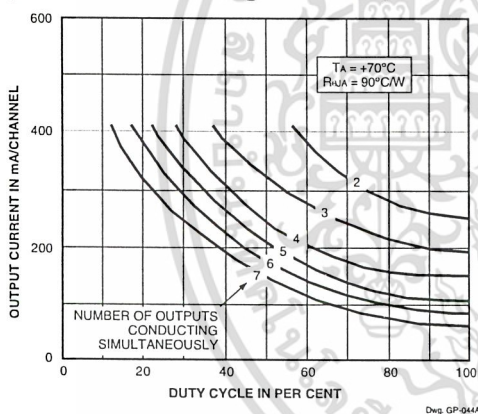
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 2003 THRU 2024 HIGH-VOLTAGE, HIGH-CURRENT DARLINGTON ARRAYS

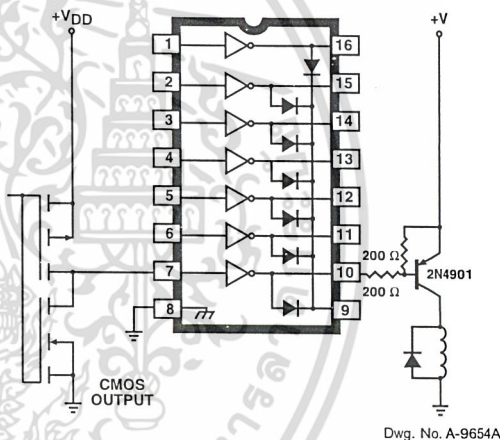
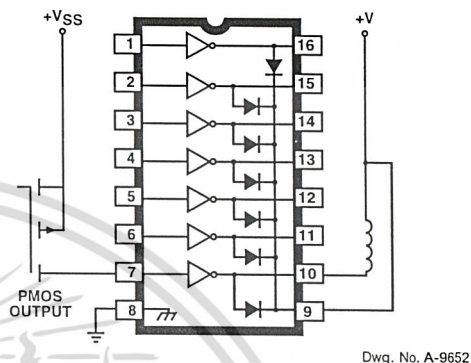
## ALLOWABLE COLLECTOR CURRENT AS A FUNCTION OF DUTY CYCLE (Dual In-line-Packaged Devices, Suffix 'A')



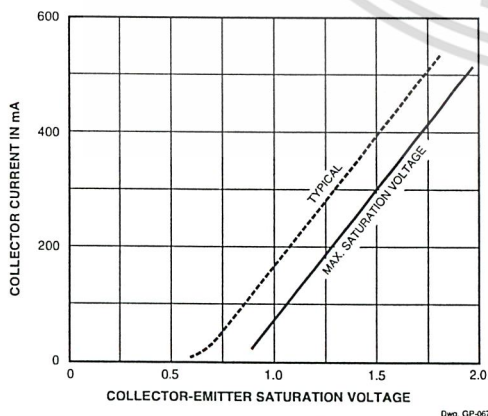
## (Small-Outline-Packaged Devices, Suffix 'L')



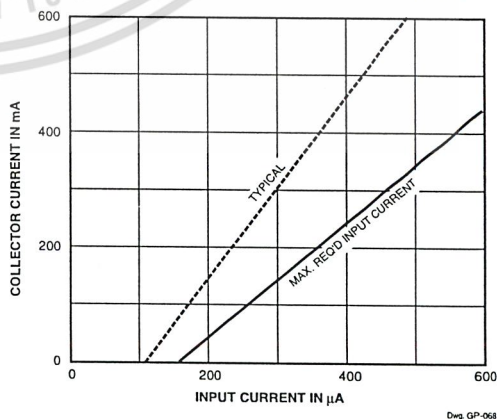
## TYPICAL APPLICATIONS



## SATURATION VOLTAGE AS A FUNCTION OF COLLECTOR CURRENT



## COLLECTOR CURRENT AS A FUNCTION OF INPUT CURRENT

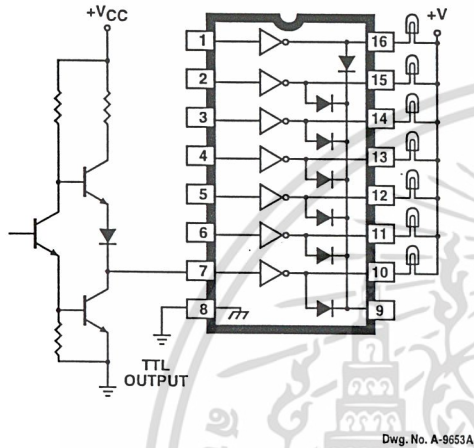


115 Northeast Cutoff, Box 15036  
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

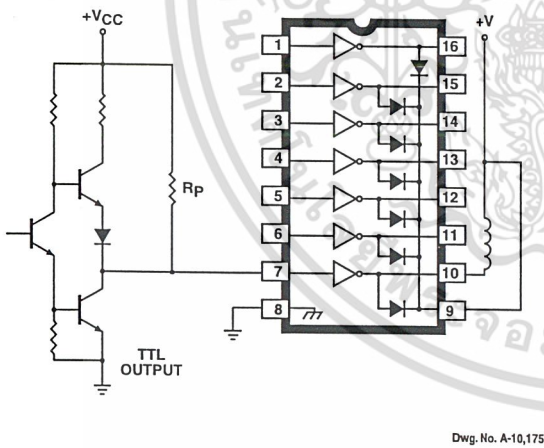
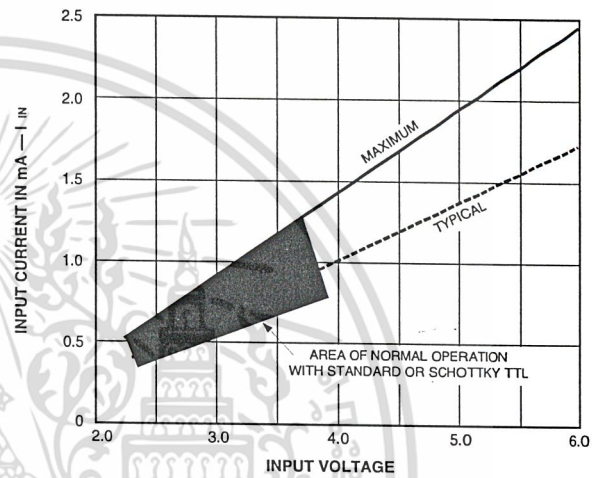
# 2003 THRU 2024 HIGH-VOLTAGE, HIGH-CURRENT DARLINGTON ARRAYS

## TYPICAL APPLICATIONS

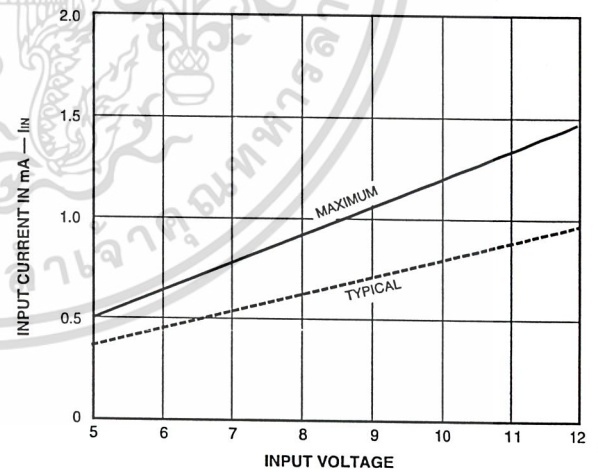


## INPUT CURRENT AS A FUNCTION OF INPUT VOLTAGE

Types ULN2003A, ULN2003L, ULN2023A, and  
ULN2023L



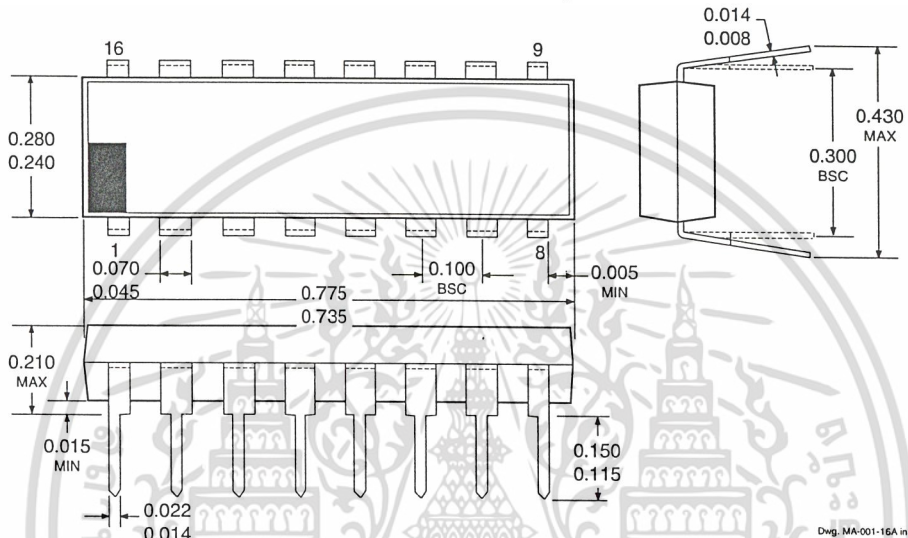
Types ULN2004A, ULN2004L, ULN2024A, and  
ULN2024L



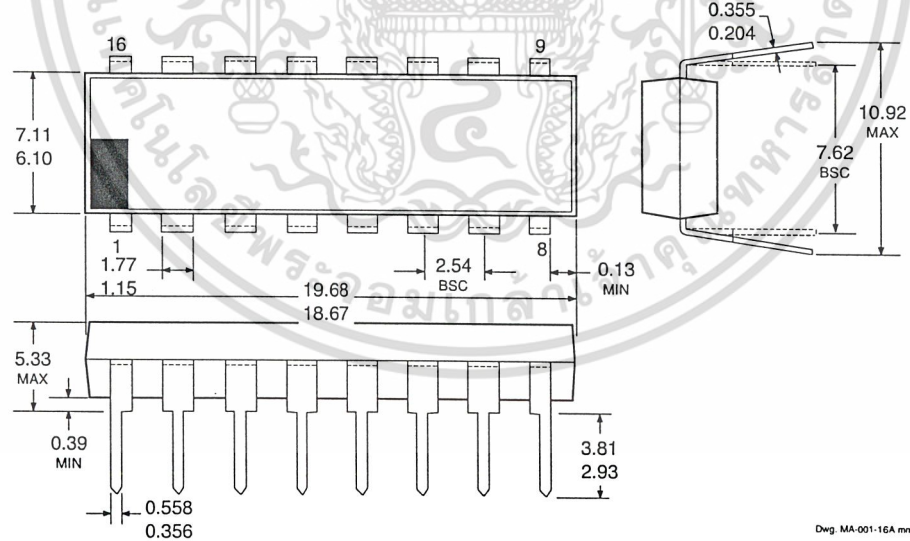
**2003 THRU 2024  
HIGH-VOLTAGE,  
HIGH-CURRENT  
DARLINGTON ARRAYS**

**PACKAGE DESIGNATOR "A"**

Dimensions in Inches  
(controlling dimensions)



Dimension in Millimeters  
(for reference only)



- NOTES: 1. Leads 1, 8, 9, and 16 may be half leads at vendor's option.  
2. Lead thickness is measured at seating plane or below.  
3. Lead spacing tolerance is non-cumulative.  
4. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.



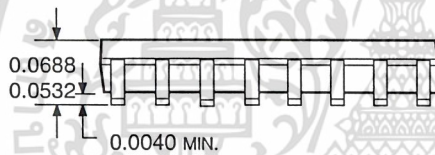
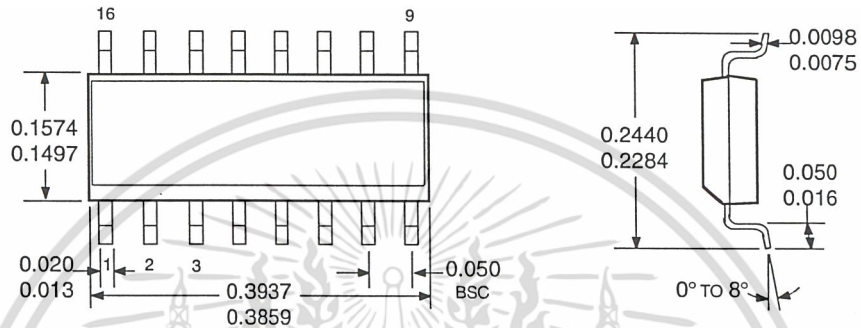
115 Northeast Cutoff, Box 15036  
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

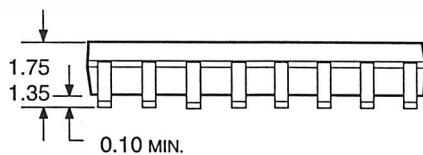
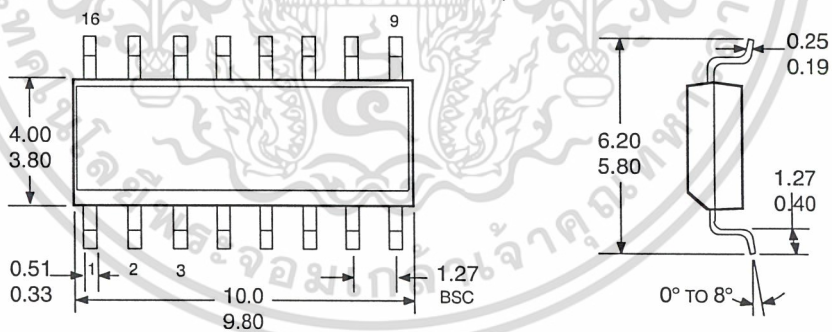
2003 THRU 2024  
**HIGH-VOLTAGE,  
HIGH-CURRENT  
DARLINGTON ARRAYS**

**PACKAGE DESIGNATOR "L"**

Dimensions in Inches  
(for reference only)



Dimension in Millimeters  
(controlling dimensions)



- NOTES: 1. Lead spacing tolerance is non-cumulative.  
2. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.

2003 THRU 2024  
HIGH-VOLTAGE,  
HIGH-CURRENT  
DARLINGTON ARRAYS



*The products described here are manufactured under one or more U.S. patents or U.S. patents pending.*

*Allegro MicroSystems, Inc. reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability, or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current.*

*Allegro products are not authorized for use as critical components in life-support devices or systems without express written approval.*

*The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use; nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use.*



115 Northeast Cutoff, Box 15036  
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This datasheet has been download from:

[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)

Datasheets for electronics components.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**P** PACIFIC  
SCIENTIFIC  
AUTOMATION TECHNOLOGY GROUP

**MOTION TECHNOLOGY DIVISION**

110 Fordham Road  
Wilmington, MA 01887  
(978) 988-9800  
Fax (978) 988-9940

Part# MA6410  
List Price \$25 U.S.  
October, 1998  
Rev E

**MA6410**

**6410 Drive**

**Installation & Hardware Reference Manual**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

---

## 3 Powering Up the 6410 Drive

---

**In this chapter** This chapter explains how to power up the 6410 drive after installation. Topics covered are:

- Setting up functions using switch S1 and Jumper J6
- Testing the installation

This section is intended to familiarize the 6410 user with the hardware adjustments and settings required to power up and operate the 6410 drive.

### 3.1 Setting Switch S1 & Jumper J6

---

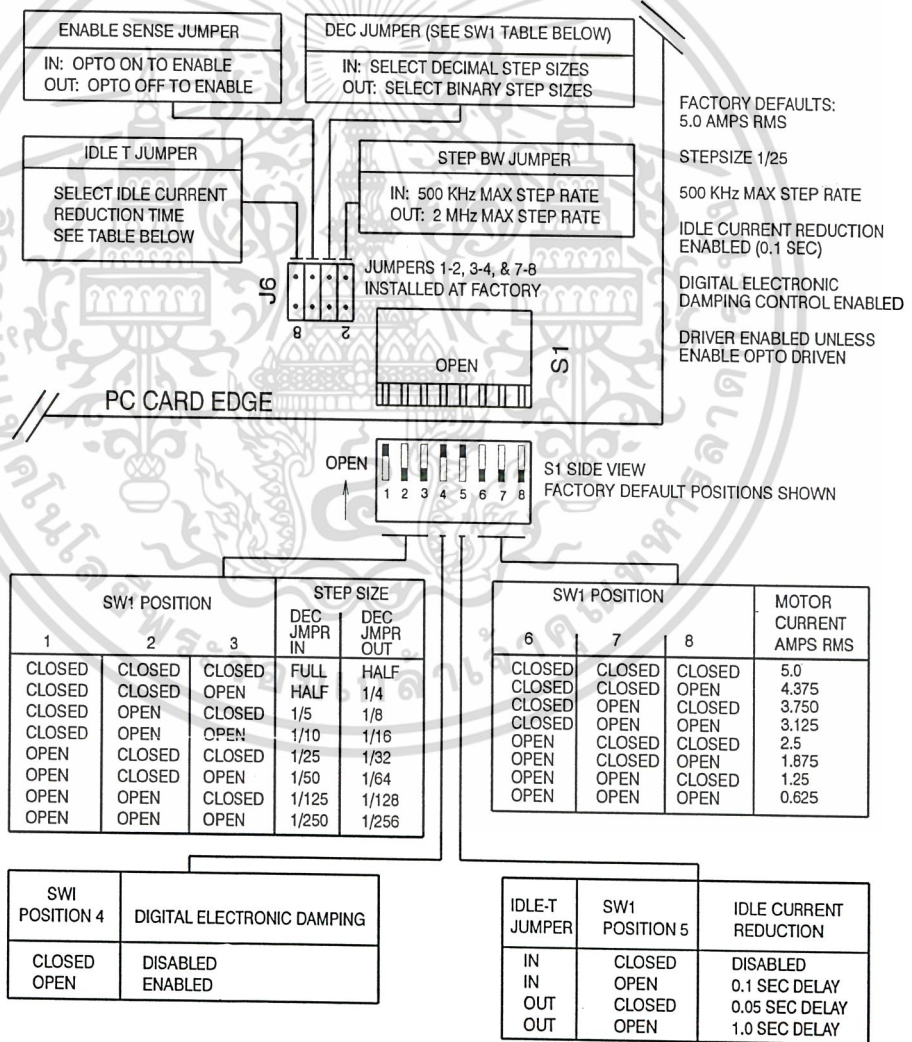
**Introduction** DIP switch S1 and Jumper J6 set the following:

- Step size
- Motor current level
- Digital electronic damping ON/OFF
- Idle current reduction
- Enable sense
- Step filter response time



Powering Up

### Location of S1



### 3.1.1 Step Size

#### Definition

The step size sets the amount of rotation per input step. Fifteen step sizes are available using Jumper J6 position 3-4 and DIP switch S1 positions 1-3 as shown. For all Pacific Scientific stepper motors and all 1.8° step motors, step size can be converted to steps per rotation using the following table:

Decimal		Binary	
Full	200	Half	400
Half	400	1/4	800
1/5	1,000	1/8	1,600
1/10	2,000	1/16	3,200
1/25	5,000	1/32	6,400
1/50	10,000	1/64	12,800
1/125	25,000	1/128	25,600
1/250	50,000	1/256	51,200

#### Benefits

Selecting a microstep size of 1/4 or smaller results in:

- higher resolution
- smoother low speed operation
- ability to operate in low-speed resonance regions

Powering Up

---

### 3.1.2 Digital Electronic Damping Control

---

#### Definition

Mid-speed instability and the resulting loss of torque occurs in any step motor/drive system due to the motor back EMF modulating the motor winding currents at certain speeds. Mid-speed instability can be explained as a region of potential instability that occurs as a result of the electronic, magnetic, and mechanical characteristics of any stepping motor system. The circuitry used to control this phenomenon does so by advancing or delaying the switching of the output current with respect to the incoming pulse train. This should be taken into account if the user is attempting to employ pulse placement techniques.

Enable the digital electronic damping function by placing DIP switch S1 position 4 in the open position as shown. This is the default position and should be used for most applications if your application is affected by loss of torque at mid-range speeds. If pulse placement techniques are being used, disable the digital electronic damping function by placing DIP switch S1 position 4 in the open position.

#### Benefit

This feature controls torque loss at mid-range speeds. When enabled, the motor maintains torque at mid-range operation, provided the torque load does not exceed motor torque ratings.

---

### 3.1.3 Idle Current Reduction

---

#### Definition

The Idle Current Reduction (ICR) function reduces the phase current at times when no motion is commanded. Motor current is reduced when no step commands are received for a given time. This time can be set to 0.05 seconds, 0.1 seconds or 1.0 second. Current to both motor windings is reduced by one-half.

The ICR function can be enabled/disabled and the time delay between the last step command and current reduction can be set to 50 ms, 0.1 seconds, or 1.0 second using DIP switch S1 position 5 and Jumper J6 position 7-8. With the jumper installed (factory default), ICR is disabled when DIP Switch S1 position 5 is in the closed position and enabled with a delay of 0.1 second (current is reduced by 50% when no step command is received for 0.1 second when the switch is open. With the jumper removed, ICR is enabled and the delay can be set to 0.05 second or 1.0 second by placing DIP Switch S1 position 5 in the closed or open position respectively.

**Note:** *When ICR is active, both the holding torque generated by the motor and the motor stiffness around the holding position are reduced by approximately 50%.*

#### Benefits

- The ICR function:
- Reduces motor and drive heating during stand-by operation



Powering Up

---

### 3.1.4 Setting Motor Current

---

Motor current can be set using DIP Switch S1 positions 6, 7, and 8 as shown. Current should be compatible with motor current ratings.

**Note:** *Power dissipation in the 6410 drive increases as the output current is increased, so that more cooling is required at high motor currents.*

### 3.1.5 Enable Sense Control

---

The polarity of the enable input can be changed using Jumper J6 position 5-6. With the jumper removed (factory default), the drive is enabled when the enable input is not driven and disabled when driven (current flows in enable opto). This allows the 6410 to be used with no connection to the enable input. With the J6 5-6 jumper installed, the enable input must be driven (current in opto) for the 6410 power stage to be enabled.

### 3.1.6 Step Bandwidth Adjustment

---

A digital filter can be enabled which reduces susceptibility to noise on the step input at the expense of a lower limit on maximum step frequency. With Jumper J6 positions 1-2 installed (factory default) the filter is enabled and step pulses must have a minimum width of one microsecond. Pulses less than 0.5 microseconds in width will be rejected. With the filter disabled, Jumper J6 position 1-2 removed, step pulses must be a minimum of 0.25 microseconds wide. Therefore, the maximum step frequency is 500 KHz with the filter enabled and 2 MHz with the filter disabled.

## 3.2 Testing the Installation

**Background** The following procedure verifies that the 6410 is installed properly and that it was not damaged during shipment.

**Procedure** After installing the 6410 as described in Chapter 2, test your installation as follows.

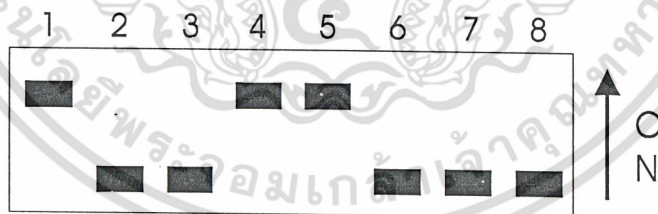


**Warning**

*Perform this initial power up with the motor shaft disconnected from the load. Improper wiring or undiscovered shipping damage could result in undesired motor motion. Be prepared to remove power if excessive motion occurs.*

**Connections test**

1. Check all wiring and mounting to verify correct installation.
2. With the power Off, check that S1 is set as follows (factory default settings):

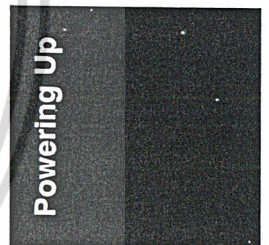


These settings reflect the following:

- Step size of 1/25
- Digital electronic damping enabled
- Idle current reduction enabled
- 5 A rms motor current

**Warning**

*If the motor is rated at less than 5 A rms winding current, set positions 6, 7, & 8 accordingly.*



---

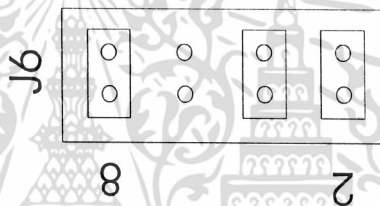
### Procedure cont'd



#### **Warning**

*Make sure power is removed before proceeding.*

3. Check that Jumper J6 is set as follows:



These settings reflect the following:

- Idle Current Reduction Enabled (0.1 second delay)
  - 6410 enabled without enable input driven
  - Decimal step size selected
  - Step input filter enabled
4. Switch On power.

---

### Signals test

1. Verify that the motor has holding torque by attempting to rotate the motor shaft. The energized motor shaft is either immovable or is resistant to rotation.
2. Input a step command and verify that the motor moves.
3. Reverse the polarity of the DIRECTION signal and step the motor. The direction of rotation should change.

---

### Getting help

If you need further assistance with your installation, please contact your local distributor.