

ระบบนำร่องรถด้วยคลื่นอัลตราโซนิก  
NAVIGATION SYSTEM BY ULTRASONIC WAVE



4

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 46236

วัน, เดือน, ปี 2 1 ส.ค. 2546

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้

Handwritten signature and date: 20/11/2001

ระบบนำร่องด้วยคลื่นอัลตราโซนิก  
NAVIGATION SYSTEM BY ULTRASONIC WAVE



ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบนำร่องรถด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

NAVIGATION SYSTEM BY ULTRASONIC WAVE

ผู้จัดทำ

นาย ศิริพงษ์ กิตติถาวร รหัส 41014421

นาย สมบูรณ์ ศิลสมิต รหัส 41014440

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ ..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ เทอดศักดิ์ ลิ่วหาทอง)

วันที่ 14/สิง/ 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับ ระบบนำร่องรถให้เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมาย ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งในระหว่างการจัดทำนั้นผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ท่าน อาจารย์ เทอดศักดิ์ ถิวหาทอง ที่ให้คำชี้แนะต่างๆ และความรู้ในการทำงานครั้งนี้

อย่างไรก็ตามรายงานฉบับนี้อาจมีข้อบกพร่อง และผิดพลาดอยู่บ้าง ผู้จัดทำก็ขอรับคำติ และคำแนะนำ รวมทั้งข้อเสนอต่างๆ และหวังว่ารายงานฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจต่อไป



*ศิริพงษ์ กิตติถาวร*

(นาย ศิริพงษ์ กิตติถาวร)

*สมบุญ สิลลสมิต*

(นาย สมบุญ สิลลสมิต)

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบนำร่องรถด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

นาย ศิริพงษ์ กิตติถาวร

นาย สมบูรณ์ ศิลสมิต

อาจารย์ เทอดศักดิ์ ลีวาทอง (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

เป็นการสร้างวิถีและเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถหรือสิ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยจะทำการจำลองระบบนำร่องโดยมีการสร้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิกออกมาเป็นทางเส้นตรงแล้วทำการประมวลผลจาก MCS-51 บนตัวรถว่าเส้นทางเดินอยู่ในทิศใด และก็บังคับให้รถวิ่งตามทางที่กำหนดจากเส้นทางเดินของระบบนำร่องรถด้วยคลื่นอัลตราโซนิก การประมวลผลทำโดย มีตัวรับคลื่นอัลตราโซนิก 3 ตัว วางในระนาบเดียวกัน แล้วทำการตรวจสอบว่าตัวใดรับคลื่นก่อน ถ้าตัวรับด้านซ้ายหรือขวารับคลื่นก่อน ก็ทำการปรับทิศทางของรถให้ตรงกับเส้นทางการวิ่งของระบบนำร่อง หรือปรับทิศทางของรถจนกว่าตัวรับคลื่นตัวกลางจะสามารถรับคลื่นได้ก่อนตัวอื่น ๆ แล้วรถจะทำการวิ่งตรงไปเรื่อย ๆ จนกว่าตัวรับคลื่นไม่ใช่ตัวตรงกลาง ก็จะทำการประมวลผลปรับทิศทางของรถอีกครั้งจนกว่ารถจะวิ่งถึงจุดหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Navigation system by ultrasonic wave

Mr. Siripong Kittithavorn

Mr. Somboon Silsamit

Mr. Therdsak Leauhatong (Adviser)

Education Year 2001

### Abstract

This project is concerned about navigational car or something which can move. By having transmitter which sends ultrasonic wave in straight way. In this time MCS-51 suddenly computes what car's route is, and then controls it to move to the route which we set. The MCS-51's computation system uses three receives which lie in the same line, detect receivers which can receive ultrasonic wave first. If the left or right receiver receive it first, it will control the car's route until the middle receiver can receive it first. Then the car go straight on until the other receivers can receive first. It controls the car's route and go straight on until the car reach the goal.

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| กิตติกรรมประกาศ                                      | I    |
| บทคัดย่อ   | II   |
| Abstract   | III  |
| สารบัญรูป  | VI   |
| สารบัญตาราง  | VIII |
| <b>บทที่ 1 บทนำ</b>                                  |      |
| 1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ                           | 1    |
| 1.2 โครงสร้างปริญญาานิพนธ์                           | 1    |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎีโครงการ</b>                          |      |
| 2.1 ทฤษฎีและหลักการการทำงานของระบบนำร่องรถ           | 2    |
| 2.1.1 การออกแบบการทำงานของระบบนำร่องรถ               | 2    |
| 2.1.2 หลักการคำนวณระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรถ | 4    |
| 2.2 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51             | 7    |
| 2.2.1 การจัดขาต่างๆของ MCS-51                        | 8    |
| 2.2.2 ความหมายของขาต่างๆ                             | 8    |
| 2.2.3 ความถี่สัญญาณนาฬิกาบนชิพ                       | 10   |
| 2.2.4 โครงสร้างหน่วยความจำ                           | 11   |
| 2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก                   | 12   |
| 2.3.1 คุณสมบัติและธรรมชาติของคลื่นอัลตราโซนิก        | 13   |
| 2.3.2 คลื่นอัลตราโซนิก                               | 13   |
| 2.3.3 ชนิดของคลื่นอัลตราโซนิก                        | 13   |
| 2.3.4 ความถี่และความยาวคลื่น                         | 15   |
| 2.3.5 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก                    | 15   |
| 2.3.6 ปริมาณพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิก               | 16   |
| 2.3.7 การลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิก                    | 16   |
| 2.4 อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์                         | 16   |
| 2.4.1 ปราคาฏการณ์เปียโซอิเล็กทริก                    | 17   |
| 2.4.2 วัสดุเปียโซอิเล็กทริก                          | 18   |
| 2.4.3 ชนิดของเปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์           | 18   |
| 2.4.4 การทำงานของทรานสดิวเซอร์ตัวส่งและตัวรับ        | 19   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|   | หน้า |
|---|------|
| 2.4.5 ข้อควรรู้ในการใช้งานตัวรับและตัวส่งทรานสดิงเซอร์            | 19   |
| 2.5 ทฤษฎีและหลักการการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์                      | 21   |
| 2.5.1 ชนิดของสเตปปีงมอเตอร์                                       | 21   |
| 2.5.2 การทำงานของสเตปปีงมอเตอร์                                   | 23   |
| 2.5.3 การควบคุมการหมุนของสเตปปีงมอเตอร์                           | 24   |
| <b>บทที่ 3 ระบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับโครงการ</b>                    |      |
| 3.1 โครงสร้างของระบบ  | 27   |
| 3.2 วงจรภาคส่งภาครับคลื่นอัลตราโซนิก                              | 27   |
| 3.2.1 ภาคส่งคลื่นอัลตราโซนิก                                      | 28   |
| 3.2.2 ภาครับคลื่นอัลตราโซนิก                                      | 29   |
| 3.3 วงจรขับมอเตอร์  | 30   |
| 3.4 Flow Chart โปรแกรมตรวจสอบทิศทางและคำนวณระยะทางของโครงการ      | 34   |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>   |      |
| 4.1 ผลการทดลองสัญญาณจาก IC 555                                    | 35   |
| 4.2 ผลการทดลองสัญญาณจาก Output ตัวรับทรานสดิวเซอร์                | 35   |
| 4.3 ผลการทดลองปรับค่า R เพื่อกำหนดแรงดันที่ Input ของคอมพาราเตอร์ | 36   |
| 4.4 ผลการชิมูเลทการทำงานของโปรแกรม                                | 37   |
| 4.5 มุมองศาของรถที่ระบบสามารถทำงานได้                             | 40   |
| 4.6 ขอบเขตของระยะทางที่ทำงานได้                                   | 40   |
| 4.7 สรุปผลการทดลอง  | 41   |
| <b>บทที่ 5 ปัญหา สาเหตุ และแนวทางการแก้ไข</b>                     |      |
| 5.1 ตัวรถไม่สามารถจะตรวจสอบระยะทางได้ตามโปรแกรม                   | 42   |
| 5.2 สิ่งรบกวนของระบบ  | 43   |
| 5.3 เกิดการ error ในการรับอินพุท                                  | 44   |
| <b>บทที่ 6 บทสรุปและแนวทางการพัฒนา</b>                            |      |
| 6.1 คุณสมบัติของระบบ  | 45   |
| 6.2 ข้อจำกัดของระบบ   | 45   |
| 6.3 บทสรุป และวิจารณ์   | 45   |
| 6.4 แนวทางการพัฒนา  | 46   |

### บรรณานุกรม

#### ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Data Sheet

## สารบัญรูป

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1.1 แสดงหลักการคร่าวๆ ของระบบนำร่อง                                  | 1    |
| รูปที่ 2.1 แสดง โครงสร้างของระบบนำร่อง                                      | 2    |
| รูปที่ 2.2 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิค                      | 3    |
| รูปที่ 2.3 แสดง Andgate ที่ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์                            | 3    |
| รูปที่ 2.4 แสดงแนวคิดการประมวลผลของ MCS-51                                  | 4    |
| รูปที่ 2.5 แสดงแนวคิดการประมวลผลของ MCS-51                                  | 5    |
| รูปที่ 2.6 แสดงแนวคิดการประมวลผลของ MCS-51                                  | 6    |
| รูปที่ 2.7 แสดงตำแหน่งขาของ MCS-51  | 8    |
| รูปที่ 2.8 แสดงขาของ MCS-51 ที่ใช้ต่อกับ XTAL                               | 10   |
| รูปที่ 2.9 แสดงหน่วยความจำทั้งแบบ ไบต์และแบบบิต                             | 12   |
| รูปที่ 2.10 แสดงถึงช่วงความถี่ต่างๆที่ถูกลำไปใช้งาน                         | 13   |
| รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามยาว                                    | 14   |
| รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามขวาง                                   | 14   |
| รูปที่ 2.13 แสดงผลของเปียโซอิเล็กทริก                                       | 17   |
| รูปที่ 2.14 แสดงวงจรเสมือนของเปียโซอิเล็กทริก                               | 17   |
| รูปที่ 2.15 แสดงสเตปมอเตอร์ชนิด Variable Reluctance                         | 21   |
| รูปที่ 2.16 แสดงสเตปมอเตอร์ชนิด Permanent Magnet                            | 22   |
| รูปที่ 2.17 แสดงสเตปมอเตอร์แบบ Hybrid                                       | 22   |
| รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะการพันขลวดบนสเตเตอร์                                  | 23   |
| รูปที่ 2.19 แสดงทิศทางการหมุนโรเตอร์ของสเตปมอเตอร์ 4เฟส                     | 26   |
| รูปที่ 3.1 แสดง โครงสร้างของระบบ  | 27   |
| รูปที่ 3.2 แสดงวงจรภาคส่งคลื่นอัลตราโซนิค                                   | 28   |
| รูปที่ 3.3 แสดงวงจรภาครับคลื่นอัลตราโซนิค                                   | 29   |
| รูปที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของ ULN 2003A                                      | 31   |
| รูปที่ 3.5 แสดงวงจรประมวลผลบนตัวรถ  | 32   |
| รูปที่ 3.6 แสดงวงจรขับเคลื่อนของสเตปมอเตอร์                                 | 33   |
| รูปที่ 3.7 แสดง Flow Chart ของโปรแกรมตรวจสอบทิศทางและคำนวณระยะทาง           | 34   |
| รูปที่ 4.1 กราฟรูปคลื่นพัลส์ความถี่ 40 kHz                                  | 35   |
| รูปที่ 4.2 รูปกราฟที่มีตัวรับตัวส่งห่างกัน 10.5, 21, 32.5, 49 นิ้ว ตามลำดับ | 36   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.3 รูประหว่าง input ขาลบ(1) กับขาลบ(2) ขณะมีคลื่นอัลตราโซนิกเข้ามา | 36   |
| รูปที่ 4.4 รูปกราฟ output เท่ากับ 0 แต่ยังมีคลื่นเหลืออยู่                 | 37   |
| รูปที่ 4.5 อินพุตและเอาพุตที่กำหนดในช่วงแรก                                | 38   |
| รูปที่ 4.6 เป็นการกำหนดอินพุตและผลของเอาพุตที่ได้ใน PORT 2                 | 38   |
| รูปที่ 4.7 ค่าที่กำหนดสำหรับการใช้ TIMER และค่าเวลาที่ได้จากซิมูเลท        | 38   |
| รูปที่ 5.1 แสดงการหักล้างของคลื่นตามแนวตั้ง                                | 42   |
| รูปที่ 5.2 แสดงการแก้ไขของการหักล้างของคลื่น                               | 42   |
| รูปที่ 5.3 รูปการรับคลื่นและการแก้ไขการรับคลื่น                            | 43   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 แสดงบิทและหน้าที่ต่างๆของพอร์ทที่ 3                      | 9    |
| ตารางที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ความเร็วของคลื่นในก๊าซต่างๆ              | 16   |
| ตารางที่ 2.3 แสดงขั้นตอนการกระตุ้นขดลวดแต่ละเฟสแบบเวฟ                 | 24   |
| ตารางที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการกระตุ้นขดลวดแต่ละเฟสแบบ 2 เฟส              | 25   |
| ตารางที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการกระตุ้นขดลวดแต่ละเฟสแบบครึ่งสเตป           | 25   |
| ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับแรงดัน Output | 33   |
| ตารางที่ 4.2 ผลการซิมูเลทโปรแกรม                                      | 37   |
| ตารางที่ 4.3 บอกสถณะการทำงานของรถ                                     | 38   |
| ตารางที่ 4.4 ตารางบอกขอบเขตของระยะทางที่ทำงานได้                      | 38   |

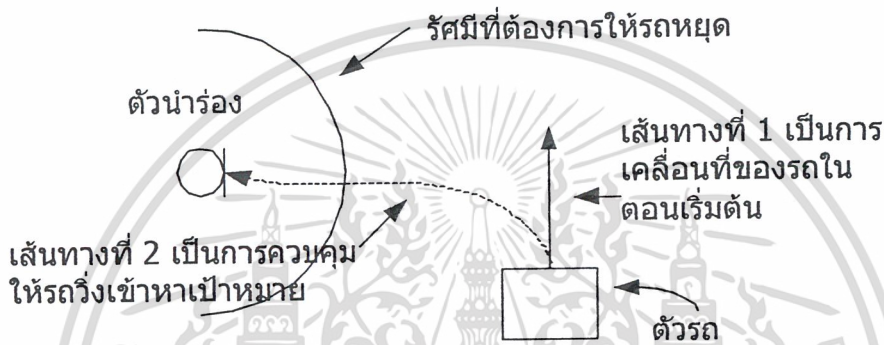
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาวิธีการนำร่องของระบบโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก และให้เข้าใจถึงหลักการ และลักษณะโครงสร้างของส่วนประกอบต่างๆ ตลอดจนการทำงานของแต่ละวงจรในระบบได้ สำหรับหลักการของระบบนำร่องสามารถอธิบายได้ ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงหลักการคร่าวๆของระบบนำร่อง

จากรูปที่ 1.1 เราจะกำหนดตัวนำร่องเป็นเป้าหมายในการนำร่องให้รถเคลื่อนที่เข้าไปหา ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในตอนเริ่มต้นทิศทางการเคลื่อนที่ของรถไม่ได้อยู่ในแนววิ่งเข้าหาเป้าหมายโดยตรง แต่จะอยู่ในทิศอื่น ดังนั้น หลักการของระบบนำร่องนี้ เริ่มแรกระบบจะค่อยๆทำการปรับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถให้วิ่งเข้าหาเป้าหมายเสียก่อน จากนั้นรถจึงวิ่งเข้าสู่เป้าหมาย ซึ่งในระหว่างนี้ระบบจะทำการตรวจสอบทิศทางการอยู่ตลอดว่ารถมีการเคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางสู่เป้าหมายหรือไม่ ถ้ารถออกนอกเส้นทาง ระบบก็จะทำการปรับทิศทางใหม่อีกครั้ง และให้รถวิ่งเข้าหาเป้าหมายต่อไป เมื่อรถใกล้ถึงเป้าหมาย เราสามารถบังคับให้รถหยุดได้ ณ ตำแหน่งแนวรัศมีที่ต้องการให้รถหยุด ซึ่งสามารถกำหนดค่ารัศมีนี้ได้ ดังนั้น การนำร่องนี้ รถจะไม่วิ่งชนเป้าหมายซึ่งเป็นจุดสำคัญของระบบนำร่องนี้

### 1.2 โครงสร้างปริญญาโท

สำหรับโครงการนี้ ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการของระบบนำร่องรถ เนื้อหาและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการทำโครงการ บทที่ 3 จะกล่าวถึงโครงสร้างระบบอิเล็กทรอนิกส์ของโครงการ พร้อมทั้งคำอธิบายการทำงานของแต่ละวงจรอย่างละเอียด ส่วนบทที่ 4 จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของส่วนต่างๆของโครงการ ในส่วนบทที่ 5 จะกล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำโครงการ สาเหตุ และแนวทางการแก้ไข บทที่ 6 จะเป็นบทสรุป และแนวทางการพัฒนาขั้นต่อไปของโครงการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีของโครงการ

ทฤษฎีและหลักการต่างๆที่จำเป็นต้องทราบสำหรับการทำโครงการฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาต่อไปนี้

1. ทฤษฎีและหลักการการทำงานของระบบนำร่อง
2. ทฤษฎีไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51
3. ทฤษฎีคลื่นอัลตราโซนิก
4. ทฤษฎีอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์
5. ทฤษฎีและหลักการการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์

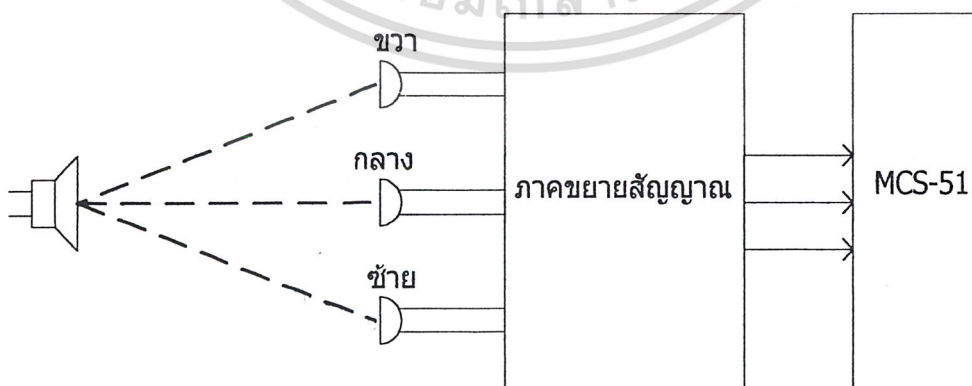
#### 2.1 ทฤษฎีและหลักการการทำงานของระบบนำร่อง

ระบบนำร่องจะมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ ภาคส่ง ภาครับ และภาคประมวลผล โดยจะกำหนดตัวส่งเป็นเป้าหมายของรถ และตัวรับอยู่บนรถ หลักการทำงานของระบบเราจะใช้คลื่นอัลตราโซนิก หากทิศของตัวส่งโดยวัดระยะทางจากตัวส่งไปยังตัวรับ เนื่องจากเราต้องการให้ตัวส่งและตัวรับเป็นอิสระต่อกัน คือ ไม่มีสายสัญญาณต่อระหว่างตัวส่งกับตัวรับ ดังนั้นเราจึงไม่สามารถวัดระยะทางโดยการจับเวลาที่คลื่นเดินทางจากตัวส่งไปยังตัวรับได้

เราจึงทำการออกแบบการส่งสัญญาณและการรับสัญญาณเพื่อทำการประมวลผลหาระยะทาง และพิกัดของตั้งส่งดังนี้

##### 2.1.1 การออกแบบการทำงานของระบบนำร่อง

ในการออกแบบเราจะกำหนดตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิกเป็นเป้าหมาย และที่ตัวรถจะมีตัวรับคลื่นอัลตราโซนิก 3 ตัว วางเรียงในระนาบเดียวกันโดยมีระยะห่างเท่ากัน ดังรูปที่ 2.1



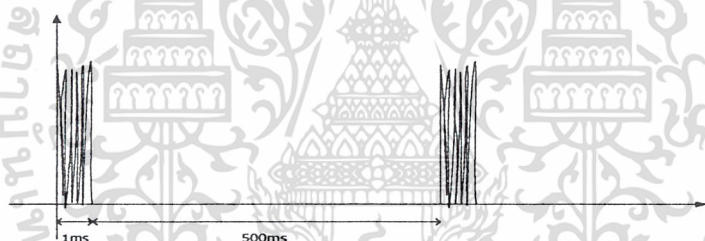
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของระบบนำร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.1 สามารถอธิบายได้ว่า ในการปรับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถให้วิ่งเข้าหาเป้าหมาย จะกระทำโดย MCS-51 ซึ่งจะมีหน้าที่ประมวลผล เพื่อตรวจสอบว่าตัวรับตัวใดเป็นตัวรับสัญญาณจากตัวส่งก่อน จากนั้น MCS-51 จะมีคำสั่งไปควบคุมมอเตอร์ให้หมุนเพื่อทำการปรับทิศทางตามเงื่อนไขดังนี้

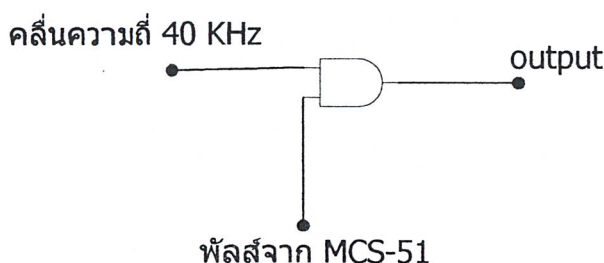
- ถ้าตัวรับกลางได้รับสัญญาณก่อน ให้สเตปป์มอเตอร์หมุนไปพร้อมๆ กัน และทำการคำนวณระยะทาง
- ถ้าตัวรับด้านซ้ายได้รับสัญญาณก่อน ให้สเตปป์มอเตอร์ด้านซ้ายหยุดหมุนส่วนด้านขวาหมุน
- ถ้าตัวรับด้านขวาได้รับสัญญาณก่อน ให้สเตปป์มอเตอร์ด้านขวาหยุดหมุนส่วนด้านซ้ายหมุน

ในการประมวลผลของ MCS-51 นั้นจะทำตลอดเวลา เพื่อทำการปรับทิศทางให้รถวิ่งเข้าหาเป้าหมาย โดยไม่ออกนอกเส้นทาง ดังนั้น ที่ตัวส่ง เราจะต้องออกแบบการทำงานของตัวส่งให้สัญญาณออกมาเป็นช่วงๆ ของเวลา เพื่อให้การประมวลผลของ MCS-51 รู้ว่าตัวรับใดเป็นตัวรับสัญญาณก่อน โดยสามารถออกแบบสัญญาณ Output ของตัวส่งได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงสัญญาณ Output ของตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิก

จากรูปที่ 2.2 สัญญาณนี้จะมาจาก สัญญาณความถี่ 40 KHz จาก IC555 และสัญญาณพัลส์จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่มีสถานะเป็น 1 ในช่วงเวลา 1 ms และสถานะเป็น 0 ในช่วงเวลา 500 ms ผ่านเข้า Andgate ด้วยกัน ซึ่ง Andgate นี้จะทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ ในการปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกให้ออกมาเป็นช่วงเวลา เพื่อให้ MCS-51 ที่ตัวรับสามารถตรวจสอบทิศทางได้



รูปที่ 2.3 แสดง Andgate ที่ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์

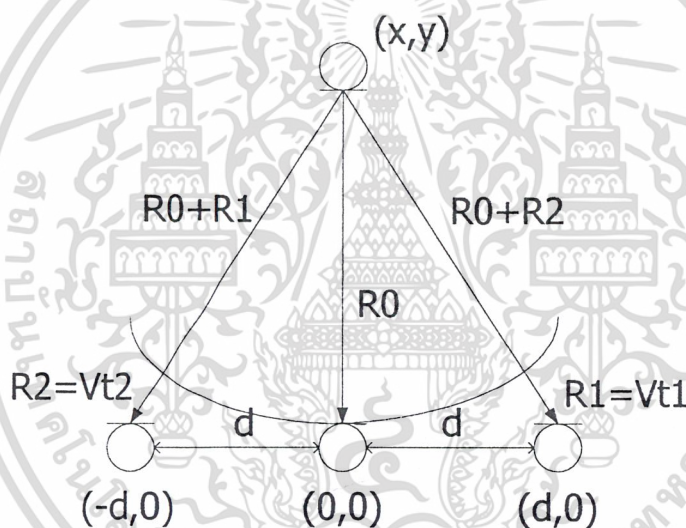
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเงื่อนไขต่างๆ ทำให้เราสามารถบังคับทิศทางของรถให้วิ่งเข้าหาเป้าหมายได้ ในขั้นตอนต่อไป จะเป็นหลักการการคำนวณหาระยะทางระหว่างตัวรถกับเป้าหมาย ซึ่งจะแสดงในหัวข้อต่อไป

### 2.1.2 หลักการการคำนวณระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรถ

เราจะกำหนดเป้าหมายที่ตัวส่งด้วยพิกัด  $(x,y)$  และตัวรับ 3 ตัว ที่พิกัด  $(-d,0)$ ,  $(0,0)$  และ  $(d,0)$  ตามลำดับ แล้ววัดระยะเวลาที่ต่างกันของคลื่นจากตัวส่งที่ไปตกกระทบตัวรับ 3 ตัว เพื่อนำไปแทนค่าหาระยะทาง  $R_0$  โดยแบ่งได้ 3 กรณี คือ

1. กรณีตัวรับกลางรับก่อน จะสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.4 โดยกำหนดพิกัด  $(x,y)$  แทนตัวส่ง และ  $d$  แทนระยะห่างระหว่างตัวรับ



รูปที่ 2.4 แสดงแนวคิดการประมวลผลของ MCS-51

จากรูปที่ 2.4 เราต้องการคำนวณหา  $R_0$  ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับตัวกลาง โดย  $R_1$  และ  $R_2$  เป็นระยะทางระหว่างแนวคลื่นกับตัวรับตัวขวาและซ้าย จากสูตรหาระยะทางจะได้

$$x^2 + y^2 = R_0^2 \quad (1)$$

$$(x+d)^2 + y^2 = (R_0 + R_1)^2 \quad (2)$$

$$(x-d)^2 + y^2 = (R_0 + R_2)^2 \quad (3)$$

จากสมการ (1), (2) และ (3) จะสามารถพิสูจน์หา  $R_0$  ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาก (2)} \quad x^2 + 2xd + d^2 + y^2 = R_0^2 + 2R_1R_0 + R_1^2$$

$$x^2 + y^2 = R_0^2 + 2R_1R_0 + R_1^2 - 2xd - d^2$$

$$\text{แทนค่า (1)} \quad 2R_1R_0 - 2xd = d^2 - R_1^2 \quad (4)$$

$$\text{จาก (3)} \quad x^2 - 2xd + d^2 + y^2 = R_0^2 + 2R_2R_0 + R_2^2$$

$$x^2 + y^2 = R_0^2 + 2R_2R_0 + R_2^2 + 2xd - d^2$$

$$\text{แทนค่า (1)} \quad 2R_2R_0 + 2xd = d^2 - R_2^2 \quad (5)$$

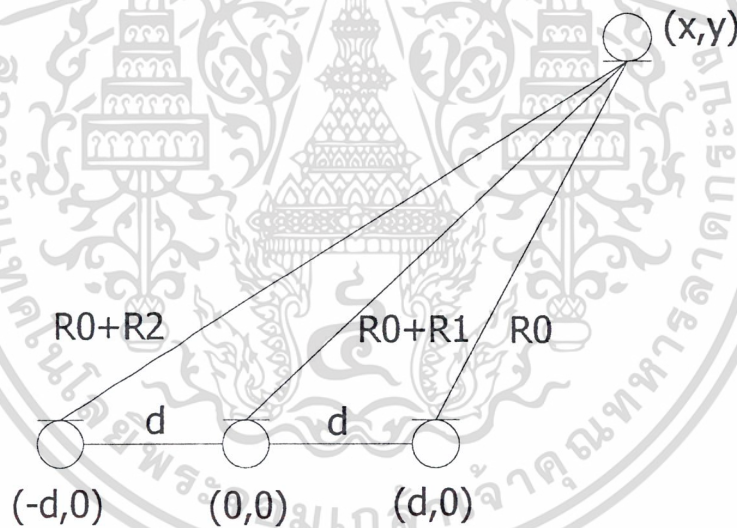
นำ (4) + (5) จะได้

$$2R_0(R_1+R_2) = 2d^2 - (R_1^2+R_2^2)$$

ดังนั้น  $R_0 = (2d^2 - (R_1^2+R_2^2)) / (R_1+R_2)$  โดย  $R_1 = v t_1$  และ  $R_2 = v t_2$  ซึ่ง

$t_1$  และ  $t_2$  ในการเขียนโปรแกรม MCS-51 จะเริ่มจับเวลาเมื่อสัญญาณจากตัวส่งถึงตัวรับตัวกลาง และจะหยุดจับเมื่อสัญญาณถึงตัวรับด้านขวา และซ้ายตามลำดับ

2. กรณีตัวรับด้านขวารับก่อน สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงแนวคิดการประมวลผลของ MCS-51

จากรูปที่ 2.5 วิธีการคิดนั้นใช้หลักเดียวกันกับกรณีตัวรับกลางรับก่อน โดยจากสูตรหาระยะทางจะได้

$$(x-d)^2 + y^2 = R_0^2 \quad (1)$$

$$x^2 + y^2 = (R_0+R_1)^2 \quad (2)$$

$$(x+d)^2 + y^2 = (R_0+R_2)^2 \quad (3)$$

จากสมการ (1), (2) และ (3) จะสามารถพิสูจน์หา  $R_0$  ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาก (1)} \quad x^2 - 2xd + d^2 + y^2 = R_0^2$$

$$x^2 + y^2 = R_0^2 + 2xd - d^2$$

$$\text{แทนค่า (2)} \quad 2R_1R_0 + R_1^2 = 2xd - d^2 \quad (4)$$

$$\text{จาก (3)} \quad x^2 + 2xd + d^2 + y^2 = R_0^2 + 2R_2R_0 + R_2^2$$

$$x^2 + y^2 = R_0^2 + 2R_2R_0 + R_2^2 - 2xd - d^2$$

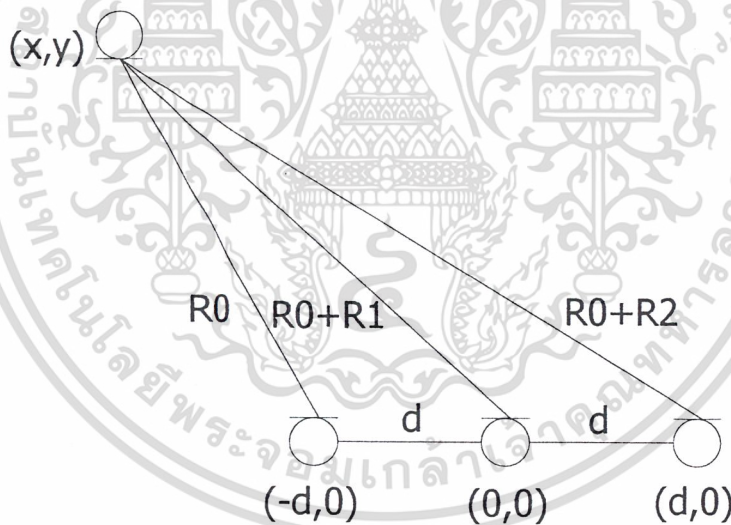
$$\text{แทนค่า (2)} \quad 2R_1R_0 + R_1^2 = 2R_2R_0 + R_2^2 - 2xd - d^2 \quad (5)$$

นำ (4) + (5) จะได้

$$(4R_1 - 2R_2)R_0 = 2d^2 - 2R_1^2 + R_2^2$$

ดังนั้น  $R_0 = (R_2^2 - 2R_1^2 - 2d^2) / (4R_1 - 2R_2)$  โดย  $R_1 = v t_1$  และ  $R_2 = v t_2$  ซึ่ง  $t_1$  และ  $t_2$  ในการเขียนโปรแกรม MCS-51 จะเริ่มจับเวลาเมื่อสัญญาณจากตัวส่งถึงตัวรับด้านขวา และจะหยุดจับเมื่อสัญญาณถึงตัวรับตัวกลาง และซ้ายตามลำดับ

### 3. กรณีตัวรับด้านซ้ายรับก่อน สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงแนวคิดการประมวลผลของ MCS-51

จากรูปที่ 2.6 วิธีการคิดนั้นใช้หลักเดียวกันกับกรณีตัวรับกลางรับก่อน โดยจากสูตรหาระยะทางจะได้

$$(x+d)^2 + y^2 = R_0^2 \quad (1)$$

$$x^2 + y^2 = (R_0 + R_1)^2 \quad (2)$$

$$(x-d)^2 + y^2 = (R_0 + R_2)^2 \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (1) , (2) และ(3)จะสามารถพิสูจน์หา R0 ได้

$$\begin{aligned} \text{จาก (1)} \quad x^2 + 2xd + d^2 + y^2 &= R0^2 \\ x^2 + y^2 &= R0^2 - 2xd - d^2 \end{aligned}$$

$$\text{แทนค่า (2)} \quad 2R1R0 + R1^2 = -2xd - d^2 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (3)} \quad x^2 - 2xd + d^2 + y^2 &= R0^2 + 2R2R0 + R2^2 \\ x^2 + y^2 &= R0^2 + 2R2R0 + R2^2 + 2xd - d^2 \end{aligned}$$

$$\text{แทนค่า (2)} \quad 2R1R0 + R1^2 = 2R2R0 + R2^2 + 2xd - d^2 \quad (5)$$

นำ (4) + (5) จะได้

$$(4R1 - 2R2)R0 = 2d^2 - 2R1^2 + R2^2$$

ดังนั้น  $R0 = (R2^2 - 2R1^2 - 2d^2) / (4R1 - 2R2)$  โดย  $R1 = v t1$  และ  $R2 = v t2$  ซึ่ง  $t1$  และ  $t2$  ในการเขียนโปรแกรม MCS-51 จะเริ่มจับเวลาเมื่อสัญญาณจากตัวส่งถึงตัวรับด้านซ้าย และจะหยุดจับเมื่อสัญญาณถึงตัวรับตัวกลาง และขวาตามลำดับ

$t1$  และ  $t2$  จะหามาได้จากการเขียน โปรแกรม MCS-51 ให้ TIMER ทำงานเพื่อจับเวลา เมื่อสัญญาณจากตัวส่งถึงตัวรับตัวแรกและทำการเก็บค่าเมื่อสัญญาณถึงตัวรับตัวที่ 2 และทำการหยุดเวลากับเก็บค่าเวลครั้งที่ 2 เมื่อสัญญาณถึงตัวรับตัวสุดท้าย เมื่อได้ค่าของเวลา  $t1$  แล้ว  $t2$  จะนำไปคำนวณหาระยะทางเพื่อนำไปกำหนดเป็นเงื่อนไขในการหยุดครดตามระยะที่ต้องการ

## 2.2 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มีด้วยกันหลายเบอร์ขึ้นกับโครงสร้างภายในของมัน บางเบอร์จะมีหน่วยความจำแบบ ROM บางเบอร์แบบ EPROM บางเบอร์มี RAM ภายใน 128 ไบต์ บางเบอร์ มี 256 ไบต์ เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดจะศึกษาได้จากคู่มือของมันโดยตรง และลักษณะของขาต่างๆ จะเหมือนกัน คุณสมบัติที่สำคัญของ MCS-51 ที่ดังนี้

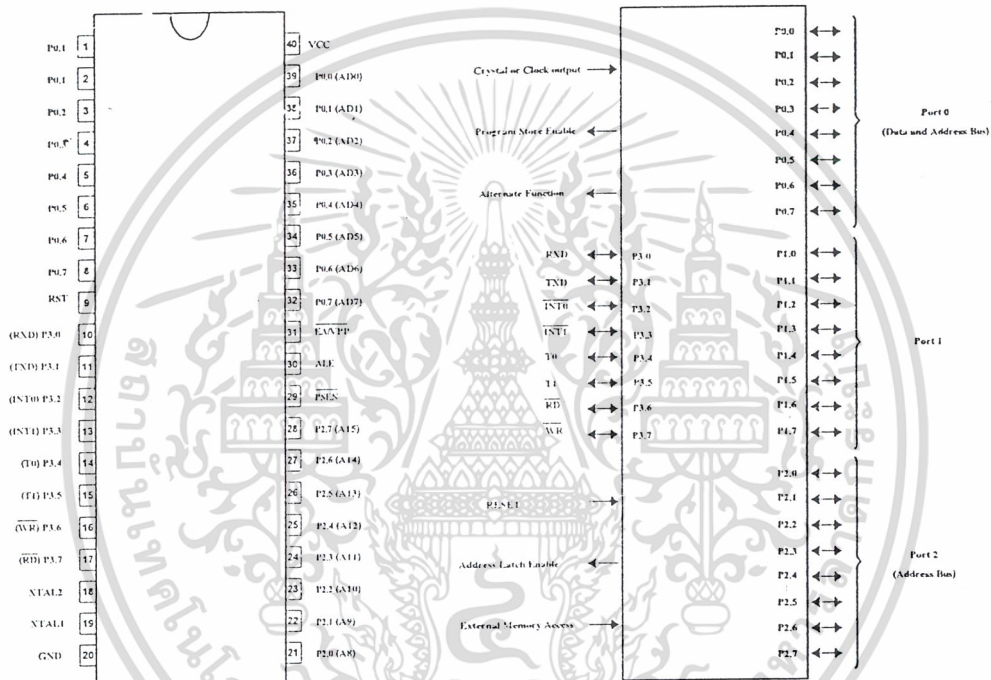
- มีหน่วยความจำ ROM 4K bytes
- มีหน่วยความจำ RAM 128K bytes
- มีพอร์ต I/O ขนาด 8 บิต 4 พอร์ต
- มี Timer 16 บิต 2 ตัว
- สามารถอินเทอร์รัพท์ได้ 5 แหล่ง
- มีวงจรรอสซิงลเเตอร์ละวงจรนาฬิกาบนชิพ
- มีพอร์ตอนุกรมที่สามารถรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex ความเร็วสูง
- อ่างหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกได้ 64 K
- อ่างหน่วยความจำข้อมูลภายในได้ 64 K
- สามารถประมวลผลได้ที่ละบิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถอ้างหน่วยความจำแบบบิตได้ 210 ตำแหน่ง
- หนึ่ง วัฏจักรคำสั่งกินเวลาประมาณ 1 ไมโครวินาที ขณะทำงานด้วย clock 12 MHz

### 2.2.1 การจัดขาต่างๆ ของ MCS-51

ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 โครงสร้าง IC เป็นแบบ DIP มีขาทั้งหมด 40 ขาโดยขาต่างๆ จะใช้เป็นพอร์ทอินพุท, เอาท์พุท, ขาสัญญาณ, ขาคำแหน่งหน่วยความจำและขาข้อมูลความหมายของขาต่างๆ มีดังนี้



รูปที่ 2.7 แสดงตำแหน่งขาของ MCS-51

### 2.2.2 ความหมายของขาต่างๆ มีดังนี้

#### 1. พอร์ท 0 (Port 0)

พอร์ท 0 ได้แก่ขาที่ 32-39 ของ MCS-51 สามารถใช้เป็นอินพุทเอาท์พุทได้จากนี้ในการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกยังใช้เป็นขา Address Bus และ Data Bus อีกด้วย

#### 2. พอร์ท 1 (Port 1)

พอร์ท 1 ได้แก่ขาที่ 1-8 เป็นพอร์ท ขนาด 8 บิต สามารถอ้างทีละบิตได้ คือ P 1.0-P 1.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3. พอร์ต 2 (Port 2)

พอร์ต 2 ได้แก่ขา ที่ 21-28 จะใช้งานได้ 2 หน้าที คือ ใช้เป็น พอร์ต 8 บิต กับใช้เป็นขา แอคเตส 8 บิตในการอ้างหน่วยความจำภายนอก

## 4. พอร์ต 3 (Port 3)

พอร์ต 3 ได้แก่ขาที่ 10-17 จะใช้งานสองหน้าที่คือ เป็นพอร์ตอินพุทและเอาต์พุทและใช้เป็นขาควบคุมต่างๆ

## 5. PSEN (Program Store Enable)

ขา PSEN เป็นขาที่ส่งสัญญาณออกคือขา 29 ขานี้จะแอกทีฟเมื่อ MCS-51 ต้องการอ่าน Code โปรแกรมภายนอก โดยปกติถ้าหน่วยความจำภายนอกเป็น EPROM ขา PSEN จะต่อกับ ขา Output Enable (OE) ของ EPROM

| บิต   | ชื่อ | หน้าที่พิเศษ                       |
|-------|------|------------------------------------|
| P 3.0 | RTX  | ใช้รับข้อมูลทางพอร์ตอนุกรม         |
| P 3.1 | TDX  | ใช้ส่งข้อมูลทางพอร์ตอนุกรม         |
| P 3.2 | INT0 | อินเทอร์รัพท์ภายนอกหมายเลข 0       |
| P 3.3 | INT1 | อินเทอร์รัพท์ภายนอกหมายเลข 1       |
| P 3.4 | T0   | ตัวจับเวลา / ตัวนับ ตัวที่ 0       |
| P 3.5 | T1   | ตัวจับเวลา / ตัวนับ ตัวที่ 1       |
| P 3.6 | WR   | สัญญาณเขียนข้อมูลหน่วยความจำภายนอก |
| P 3.7 | RD   | สัญญาณอ่านข้อมูลหน่วยความจำภายนอก  |

ตารางที่ 2.1 แสดงบิตและหน้าที่ต่างๆ ของพอร์ตที่ 3

## 6. ALE (Address Latch Enable)

เนื่องจากพอร์ต 0 สามารถใช้เป็นขาอ้างอิงตำแหน่ง และขาข้อมูล MCS-51 จะมีขา ALE ได้แก่ขา 30 ขานี้จะใช้ Multiplex สัญญาณ Address Bus ของ port 0 ในการใช้งานระบบ MCS-51 นั้นจะต้องมีอุปกรณ์มาต่อกับ port 0 ที่ทำหน้าที่ Latch สัญญาณ Address Bus เมื่อ MCS-51 ต้องการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก MCS-51 จะส่งสัญญาณ Address Bus ออกมาทาง Port 0 จากนั้นจะส่งสัญญาณ ALE มา Latch อุปกรณ์ภายนอก ให้เก็บค่า Address Bus ของ Port 0 ไว้เพื่อใช้ Port 0 เป็น Data Bus ต่อไป

### 7. EA (External Access)

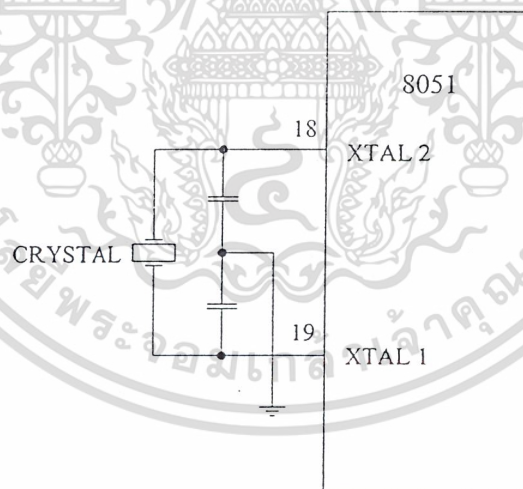
ขา EA ได้แก่ขาที่ 31 ถ้าขานี้เป็นลอจิก 1 จะใช้กับเบอร์ 8051 /8052 เพื่อบอกว่าให้อ่านโปรแกรมจากหน่วยความจำโปรแกรมภายใน แต่ถ้าเป็นลอจิก 0 จะบอกว่าเป็น MCS-51 ทำโปรแกรมโดยอ่านจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก (ถ้าขา EA เป็น 0 ขา PSEN จะแอกทีฟ) ถ้าหากเป็นเบอร์ 8031 หรือ 8032 ขา EA จะเป็น 0 เสมอ เพราะว่าเมมมิ่งมีโปรแกรมหน่วยความจำภายในและให้ขา EA เป็น 0 ซึ่งจะ Disabled ROM ภายในและอ่านโปรแกรมจาก EPROM ภายในและจะอ่านโปรแกรมจาก EPROM ภายนอกแทน

### 8. RST (Reset)

ขา RST ได้แก่ขา 9 จะใช้ในการรีเซ็ต MCS-51 โดยจะให้ขานี้เป็นลอจิก 1 อย่างน้อย 2 Machine Cycles จึงจะรีเซ็ตระบบได้

### 2.2.3 ความถี่สัญญาณนาฬิกาบนชิพ (On-chip Oscillator Inputs)

เป็นวงจร Oscillator บนชิพ ได้แก่ขา 18-19 โดยต่อ Crystal เข้ากับขานี้ โดยปกติมักจะใช้ Crystal ความถี่ 12 MHz กับตัวเก็บประจุหรืออาจจะใช้สัญญาณนาฬิกาจาก TTL Clock Source ต่อกับ XTAL1 และ XTAL2



รูปที่ 2.8 ขาของ MCS-51 ที่ใช้ต่อกับ XTAL

### Power Connections

ใน MCS-51 จะใช้แหล่งจ่ายไฟ 5 V ต่อเข้ากับขา  $V_{cc}$  (ขา 40) ส่วนขา  $V_{ss}$  (ขา 20) จะต่อลง Ground

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

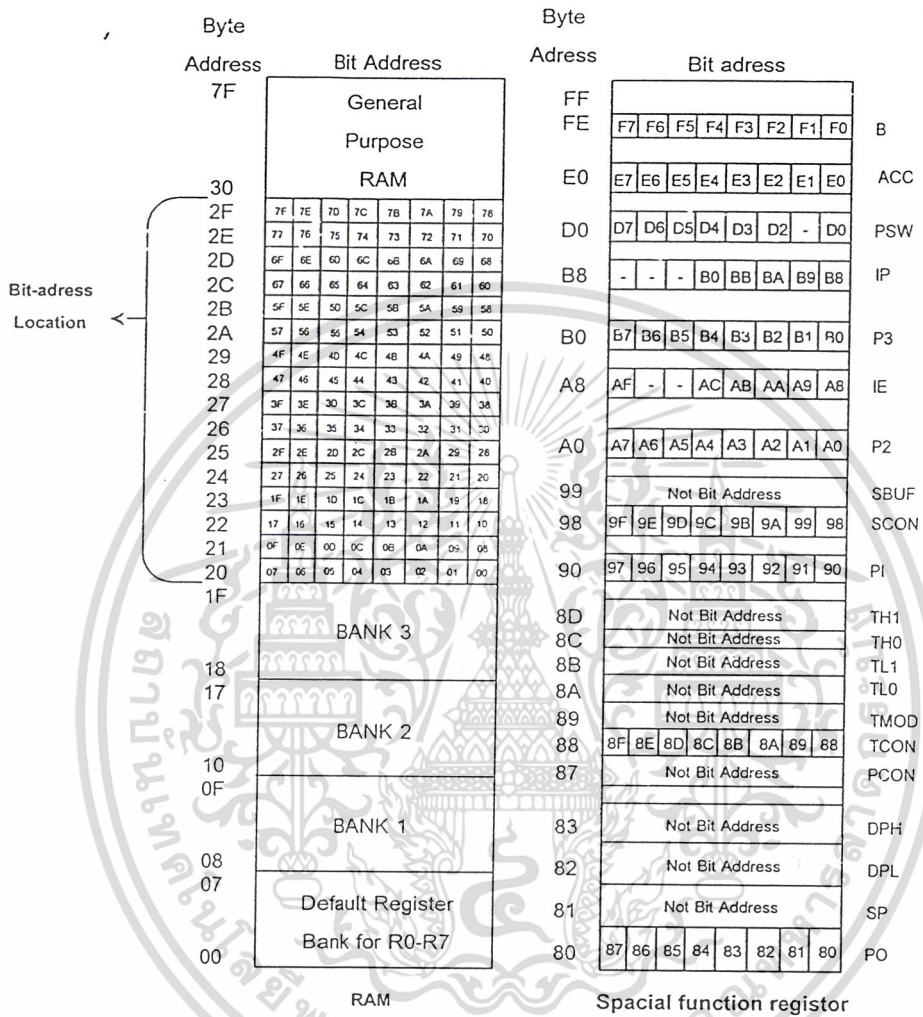
## 2.2.4 โครงสร้างหน่วยความจำ

หน่วยความจำสำหรับ MCS-51 จะมี 2 ชนิดคือ หน่วยความจำที่ใช้สำหรับเก็บ โปรแกรม (ROM) กับหน่วยความจำที่ใช้แบบข้อมูลในการประมวลผล (RAM) MCS-51 บางเบอร์เช่น 8051,8052 จะมีหน่วยความจำโปรแกรมภายในชิพ และ MCS-51 ทุกเบอร์สามารถอ้างหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกได้มากที่สุด 64 K และอ้างหน่วยความจำข้อมูลภายนอกได้มากที่สุด 64 K สำหรับหน่วยความจำแบบ RAM ภายใน จะประกอบไปด้วยพื้นที่ใช้งานทั่วไป, รีจิสเตอร์แบงก์, พื้นที่ใช้งานระดับบิต และรีจิสเตอร์ฟังก์ชันพิเศษ เราอาจจะเขียนไคอะแกรมของหน่วยความจำของ 8051 ได้ดังรูปที่ 2.3 โดยในรูปจะบอกด้วยว่าขาใดจะแอกทีฟ

ใน 8051 จะมีหน่วยความจำภายในตั้งแต่ตำแหน่ง 00H ถึง FFH และสามารถอ้างหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกได้ 64K ตำแหน่ง ถ้าอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมขา PSEN จะแอกทีฟ นอกจากนี้ 8051 สามารถอ้างหน่วยความจำข้อมูลภายในนั้นจะแบ่งออกได้ดังนี้

- 1) ชุดรีจิสเตอร์ 4 ชุดแต่ละชุดเรียกว่ารีจิสเตอร์แบงก์ ที่ตำแหน่ง 00H ถึง 1FH โดยแต่ละชุดประกอบด้วยรีจิสเตอร์ RO ถึง R7
- 2) หน่วยความจำที่สามารถเข้าถึง ข้อมูลระดับบิตได้ ตำแหน่ง 20H ถึง 2FH
- 3) หน่วยความจำใช้งานทั่วไปตำแหน่ง 30H ถึง 7FH
- 4) รีจิสเตอร์ฟังก์ชันพิเศษ ตำแหน่ง 80H ถึง FFH

แผนผังการจัดหน่วยความจำข้อมูลภายใน แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 จากแผนผังจะเห็นว่า การอ้างตำแหน่งหน่วยความจำภายในจะอ้างได้สอง แบบ คือการอ้างไปที่ตำแหน่งของไบต์ (เขียนหมายเลขตำแหน่งด้านนอก) หรือการอ้างไปที่ตำแหน่งของบิต (เขียนหมายเลขตำแหน่งด้านใน) โดยตำแหน่งของหน่วยความจำที่อ้างเป็นแบบบิตได้จะมีตำแหน่งบิตที่แน่นอน



รูปที่ 2.9 แสดงหน่วยความจำทั้งแบบ ไบต์และแบบบิต

### 2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก

เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของระบบนำวิถีของรถคลื่นที่อัตโนมัติ ซึ่งจะเป็นส่วนที่ใช้สำหรับสะท้อนกับวัตถุสิ่งกีดขวางต่างๆ เพื่อที่ว่า จะได้นำเอาสัญญาณที่สะท้อนกลับมาแปลงเป็นสัญญาณที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของรถเคลื่อนที่อัตโนมัติซึ่งสามารถพูดได้ว่าเป็นการนำวิถีของหุ่นยนต์นั่นเอง ซึ่งมีหลักการดังต่อไปนี้

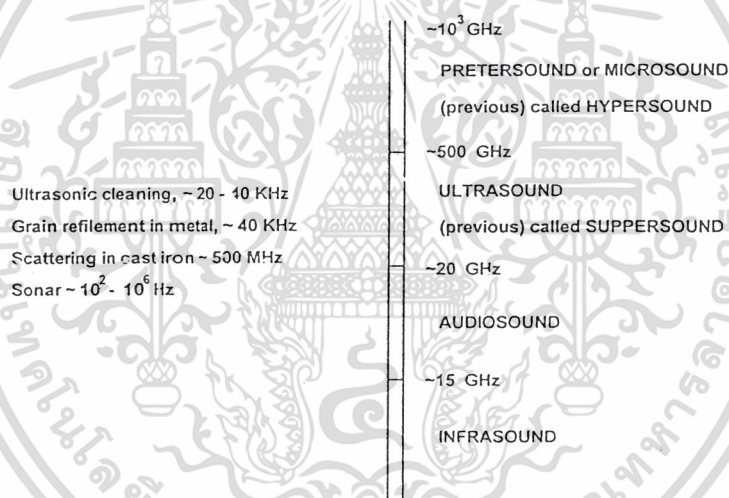
เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาหรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 คุณสมบัติและธรรมชาติของคลื่นอัลตราโซนิก

หลักการของการสะท้อนกลับของคลื่นเสียง คือ พัลส์ของพลังงานจะถูกส่งออกมาจากตัวส่ง ถ้าไปกระทบกับวัตถุพลังงานบางส่วนจะสะท้อนกลับไปที่ตัวส่งด้วย แต่การใช้วัตถุเป็นตัวรับที่เหมาะสม (Suitable) จะสามารถรับการสะท้อนกลับของสัญญาณ (Signal) เวลาที่ใช้ในการเดินทางในอากาศสามารถที่จะคำนวณระยะทางได้ เพราะฉะนั้นการศึกษาถึงธรรมชาติของคลื่นจะสามารถทำให้เข้าใจในการนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างถูกต้อง

### 2.3.2 คลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นอัลตราโซนิก คือ คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินที่มนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วมนุษย์จะสามารถได้ยินคลื่นความถี่ประมาณ 20 Hz ถึง 20 KHz ดังนั้นแล้วคลื่นอัลตราโซนิก จึงหมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz จนถึง  $10^4$  GHz โดยคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า  $10^4$  GHz และแอมพลิจูด (Amplitude) สูงๆ จะเรียกว่า “ไฮเปอร์ซาวนด์”

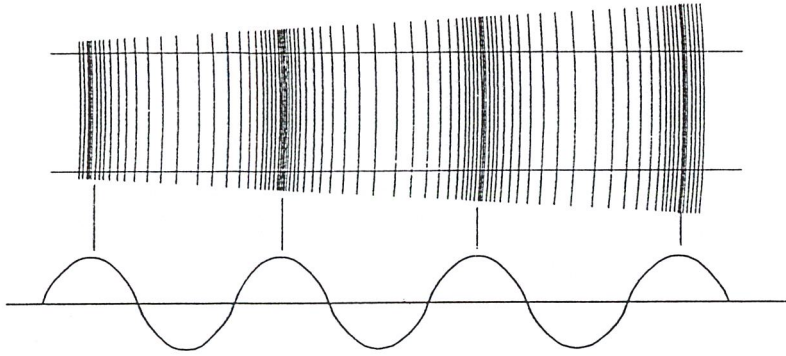


รูปที่ 2.10 แสดงถึงช่วงความถี่ต่างๆที่ถูกนำไปใช้งาน

### 2.3.3 ชนิดของคลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นอัลตราโซนิกที่เดินทางผ่านตัวกลางต่างๆ มีหลายชนิดด้วยกันซึ่งแตกและชนิดแตกต่างกันตามการเคลื่อนของอนุภาคในตัวกลางนั้น

**2.3.3.1 คลื่นตามยาว (Longitudinal Wave)** คือ คลื่นอนุภาคตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น



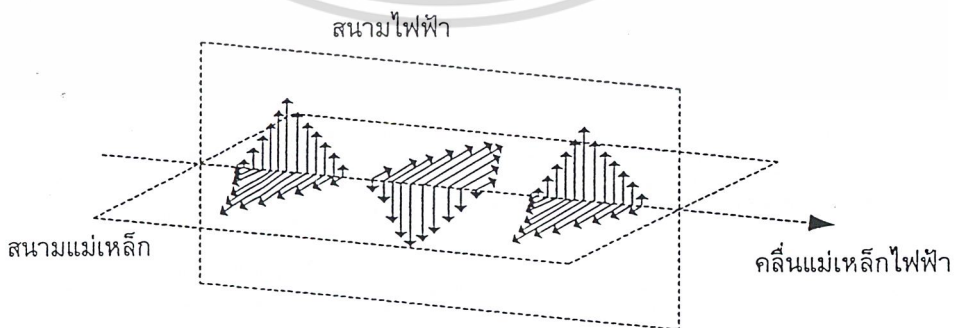
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามยาว

จากรูปจะเห็นว่ามีส่วนที่เป็นคลื่นอัด (Compression) ซึ่งก็คือ คลื่นช่วงของอนุภาคของตัวกลางมีความชันสูง และคลื่นขยาย (Rarefaction) คือคลื่นที่อนุภาคของตัวกลางมีความชันต่ำและ เมื่อนำค่าของความชันที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางมาเขียนกราฟจะได้รูปไซน์ (Sine Wave) โดยยอดคลื่นจะตรงกับส่วนอัดและท้องคลื่นจะตรงกับส่วนขยาย ระยะทางระหว่างส่วนอัดถึงส่วนอัด หรือส่วนขยายถึงส่วนขยาย คือ 1 ความยาวคลื่น และมีคาบเวลาเป็น (T) ซึ่งเท่ากับ  $1/f$  โดยจุดที่เป็นแกนนั้นมีความดัน 1 บรรยากาศ

**2.3.3.2 คลื่นตามขวาง (Transverse Wave)** คือ คลื่นที่ทุกๆ จุดบนคลื่นมีการเคลื่อนที่

ไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่คลื่นชนิดนี้จะเดินทางผ่านตัวกลางที่มีขนาดตัวกลางใหญ่กว่าขนาดของความยาวคลื่นและสามารถเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งและก๊าซได้

คลื่นตามขวางมีลักษณะเหมือนการเกิดขั้วลบและขั้วบวกซึ่งเป็นเหตุผลที่ว่า การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคเป็นไปในทิศทางเดียวเช่น ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปจากต้นกำเนิดของคลื่นตามขวางเป็นพื้นที่หน้าเรียบของระนาบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคอื่นเนื่องมาจากการแกว่ง ความหนาของตัวกลางจะไม่เปลี่ยนแปลง โดยการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบตามขวาง ความเร็วของคลื่นชนิดนี้จะน้อยกว่าความเร็วของคลื่นชนิดตามยาว ในขณะที่เดินทางผ่านตัวกลางชนิดเดียวกัน ดังนั้นที่ความถี่เดียวกันความยาวคลื่นของคลื่นตามขวางจะน้อยกว่าคลื่นตามยาวเสมอ



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3.3.3 คลื่นผิวหน้า (Surface Wave or Rayleigh)** คือ คลื่นชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายกับคลื่นตามขวาง จะต่างกันตรงที่ว่า การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคไม่เป็นเพียงในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางที่เคลื่อนที่เพียงอย่างเดียว แต่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ด้วย จึงทำให้คลื่นเคลื่อนที่ไปตามระนาบในแนวอน ด้วยเหตุนี้คลื่นจึงเดินทางผ่านไปเฉพาะบนผิวของตัวกลางเท่านั้น

### 2.3.4 ความถี่และความยาวคลื่น (Frequency and Wave Length)

**ความถี่** คือ จำนวนของการออสซิลเลทที่สมบูรณ์จากแหล่งกำเนิดคลื่นภายในหนึ่งวินาทีที่คลื่นที่ถูกส่งจากแหล่งกำเนิดจะเดินทางมาถึงความถี่เดียวกัน

**ความยาวคลื่น** คือ ระยะทางที่คลื่นเดินทางระหว่างการสั่นที่สมบูรณ์หรือการเดินทางครบหนึ่งรอบ (1 Cycle) สามารถกล่าวได้ว่าความยาวคลื่นเป็นระยะทางระหว่างการอัดอย่างต่อเนื่อง (Successive Compression) หรือการเบาบางของอากาศ (rare-fractions) การอัดคือการที่บริเวณนั้นมีความหนาแน่นของโมเลกุลและแรงดันมากกว่าบริเวณรอบๆ ส่วนการเบาบางเป็นบริเวณเฉพาะที่เกิดการลดความหนาแน่นของโมเลกุลและแรงดันสัมพันธ์กับแรงดันของบรรยากาศปกติ

ความถี่และความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กันตามสมการข้างล่าง

$$C = f\lambda$$

C : ความเร็วของการเดินทาง (m/s)

f : ความถี่ (Hz)

$\lambda$  : ความยาวคลื่น (m)

### 2.3.5 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิค

ความเร็วที่ยอมรับของคลื่นในอากาศที่อุณหภูมิปกติความสัมพันธ์ที่ใช้จะเป็นดังสมการ

$$v = 331.45 + 0.607T \quad (\text{m/s})$$

v : ความเร็วของคลื่นในตัวกลางอากาศ

T : อุณหภูมิของคลื่นในอากาศ

| GAS              | Velocity (m/s) |
|------------------|----------------|
| AIR (DRY 0 °C)   | 331.45         |
| ARGON            | 319            |
| CARBON MONOXIDE  | 338            |
| CARBON DIOXIDE   | 259            |
| HELIUM           | 965            |
| HYDROGEN METHANE | 1284           |

ตารางที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ความเร็วของคลื่นในก๊าซต่างๆ

### 2.3.6 ปริมาณพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิก

ปริมาณพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกจะถูกระบุในรูปความเข้มของคลื่นอัลตราโซนิกจะมีหน่วยเป็น  $W/cm^2$  เป็นการไหลของพลังงานผ่านพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่นใน 1 วินาที

### 2.3.7 การลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิก

เมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลาง ลำคลื่น (Beam) ของคลื่นอัลตราโซนิกจะสูญเสียความเข้มซึ่งเกิดจากการสูญเสียของลำคลื่นอัลตราโซนิก หรือเกิดจากการดูดซับพลังงานส่วนหนึ่งของคลื่น โดยตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน พลังงานที่ดูดซับนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน การดูดซับพลังงานความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุ ความยืดหยุ่นและความหนาแน่น รวมทั้งความถี่ของคลื่นที่ใช้ ยิ่งความถี่สูงพลังงานยิ่งถูกดูดซับมาก

## 2.4 อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

การเกิดคลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานรูปอื่นให้มาเป็นพลังงานกล โดยการสั่นไปมาหรือเกิดจากการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกลให้เกิดคลื่นย่านอัลตราโซนิกกระจายออกไปในอากาศ ดังนั้นจึงถือได้ว่าคลื่นที่เกิดขึ้นเป็นคลื่นกล (Mechanical Wave) อัลตราโซนิกสามารถสร้างได้โดยตัวทรานสดิวเซอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หลักการสร้างมีหลายวิธีดังนี้

1. แบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezo-electric transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล โดยมีความถี่เรโซแนนท์คงที่อยู่ค่าหนึ่ง

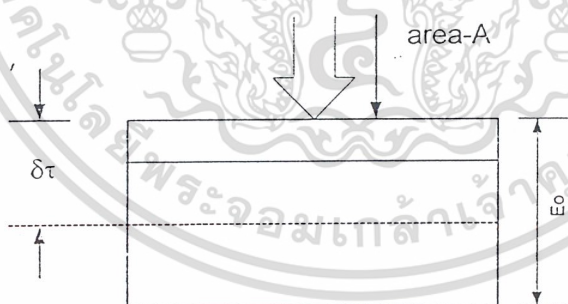
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบแมกนีโตสตริกทีฟ (Magnetostrictive Transducer) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไประหว่างพลังงานไฟฟ้าในขดลวดกับตำแหน่งความยาวของแกนเหล็กที่สวมขดลวดนั้น
3. แบบอิเล็กโตรสตริกทีฟ (Electrostrictive Transducer) ซึ่งแปลงไประหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกล
  - สำหรับเปียโซอิเล็กทริกเป็นแบบที่นิยมใช้เพราะมีราคาถูกและหาซื้อได้ง่ายเพราะฉะนั้นเราจึงเลือกใช้และอธิบายรายละเอียดของตัวอุปกรณ์นี้

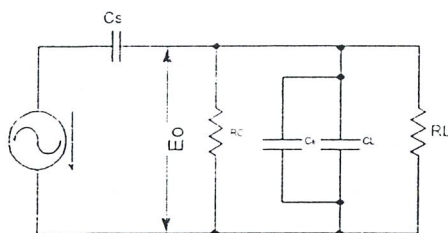
### 2.4.1 ปฏิกิริยาของเปียโซอิเล็กทริก

เปียโซอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่ง ซึ่งทำให้พลังงานสามารถเปลี่ยนแปลงจากตูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้กล่าวคือ ถ้าป้อนแรงกลให้แก่ solid crystalline dielectric ก็จะเกิดความเค้น (Stress) ภายในคริสตัล และทำให้ผลึกของคริสตัลผิดรูปไป เช่น พวควิวทซ์ (Quartz) ผลก็คือประจุเปลี่ยนไป การผิดรูปร่างของผลึกเป็นผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างการแทนที่ (Displacement) ของประจุบวกและลบในผลึกเปลี่ยนไป การแทนที่ของประจุภายในจะเท่ากับประจุภายนอกของขั้วที่ตรงกันข้ามของคริสตัลเรียกว่าผลของเปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect)

การวัดประจุทำได้โดยการต่ออิเล็กโทรด (electrod) เข้าที่ผิวด้านนอกแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสองขนาด (magnitude) และการมีขั้ว (polarity) ของประจุบนผิวที่ถูกเหนี่ยวนำ (induced surface charge) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดและทิศทางของแรง (F) ที่มากระทำ



รูปที่ 2.13 ผลของเปียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 2.14 วงจรเสมือนของเปียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่ปานกลางและความถี่สูง voltage  $E_0$  ที่คร่อมโหลด หาได้โดย  $C_c$  และ  $C_L$  ค่าเหล่านี้มา  
ได้โดยการใช้การแบ่ง voltage โดย voltage  $E_0$  ได้จากสมการ

$$E_0 = \frac{EC_c}{(C_c + C_L)}$$

โดยขึ้นกับความถี่ ถ้าเอาที่พู่ท voltage มีค่ามากสามารถทำให้ลดลงได้โดยการเพิ่มค่า  $C_L$  เช่น  
การนำค่า  $C_c$  ต่อขนานเข้าไป ที่ความถี่ต่ำ ค่า  $E_0$  คร่อมโหลดหาได้โดยค่ารีแอกแตนซ์ของ  $C_c$  และอิมพี  
แดนซ์ของ  $C_L$  และ  $R_L$  ที่ต่อขนานกัน ค่า  $E_0$  ขึ้นกับความถี่และจะลดลงถ้าความถี่ลดลงการตอบสนองต่อ  
ความถี่สามารถปรับปรุงได้โดยการใช้ทรานสดิวเซอร์ที่มีค่าคาปาซิแตนซ์สูงหรือ โดยการเพิ่มความต้าน  
ทานทางโหลด  $R_L$

#### 2.4.2 วัสดุเปียโซอิเล็กทริก

วัสดุเปียโซอิเล็กทริกที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเช่น Quartz , Tourmaline sulphate , Barium  
Titanate และ Zirconate Titanate (TZI) โดยทั่วไปแล้วพวกควอทซ์ และคริสตอลที่เป็นเปียโซอิเล็กท  
ริกธรรมชาติมันจะมีขั้วของมันเองตามธรรมชาติ แต่ขั้ววัสดุเปียโซอิเล็กทริกที่สังเคราะห์ขึ้นมา เช่น  
แบเรียม ไททานเนท เซรามิค จะต้องนำมาทำการอบคริสตอลภายในแรงดัน และวางวัสดุที่ได้นี้ในสนามไฟ  
ฟ้าที่มีแรงดันของ DC มากหลังจากชิ้นส่วนนี้ถูกนำในสนามไฟฟ้าแล้ว คริสตอลนี้จะมีขั้วตามแนวของ  
ทิศทางของสนาม และประพฤติกรรมตามคุณสมบัติของเปียโซอิเล็กทริกสำหรับชิ้นส่วนที่ทำจากวัสดุ  
สังเคราะห์นี้ไม่มีข้อจำกัดทางขนาดโดยโครงสร้างของคริสตอลและยังสามารถทำให้มีรูปร่างและขนาด  
ต่างๆ และทิศทางของขั้วก็จะถูกสร้างขึ้นระหว่างขั้นตอนการผลิต

#### 2.4.3 ชนิดของเปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

เป็นโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. แบบ Generation – action transducer ใช้เป็นตัวรับ โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะหา  
ได้จากแรงดันและความถี่ที่มากระทำต่อวัสดุเปียโซอิเล็กทริก
2. แบบ Motor –action transducer ใช้เป็นตัวส่ง โดยการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างที่ทำให้  
ให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิคจะขึ้นอยู่กับขนาดความสูงและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่  
ป้อนให้ในทั้งสองกรณี ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับขนาดของวัสดุ

#### 2.4.4 การทำงานของทรานสดิวเซอร์ตัวส่งและตัวรับ

เมื่อเซรามิกได้รับสัญญาณแรงดันมาครบคร่อมจะทำให้ชิ้นสารเซรามิก โกงงอทำให้เกิดการอัดอากาศโดยรอบเกิดเป็นคลื่นขึ้นมา ดังนั้นถ้าป้อนสัญญาณเป็นห้วงๆ (electrically pulse) จากการออสซิลเลท ก็จะทำให้ชิ้นสาร โกงงอมากขึ้นหรือทิศทางใดตามขนาดและทิศทางการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณไฟฟ้าจากการออสซิลเลทนั้นออกไป โดยทั่วไปกำลังเอาท์พุทที่ออกมาจะตกลงประมาณ 10 % ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แต่เอาท์พุทจะสูงที่ค่านี้ โดยประมาณก็ต่อเมื่อความถี่ของสัญญาณออสซิลเลเตอร์ที่ป้อนเข้าชิ้นสารเซรามิกตรงกับความถี่เรโซแนนท์ที่เป็นความถี่ทางกลตามธรรมชาติของชิ้นสารเซรามิกนั้นๆ ส่วนที่ความถี่อื่นๆ กำลังเอาท์พุทจะลดลงกว่านี้ ส่วนการทำงานของทรานสดิวเซอร์ตัวรับ มักมีการทำงานตรงข้ามกับตัวส่ง คือเมื่อมีคลื่นเสียงที่มีความถี่ตรงกับความถี่เรโซแนนท์ของชิ้นสารเซรามิกเข้ามา จะทำให้ชิ้นสาร โกงงอตัวไปมาและเกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กขึ้นคร่อมขั้วทั้งสองของตัวมัน

คุณสมบัติโดยทั่วไปของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ แบบเปียโซอิเล็กทริกก็คือ มีความต้านทานไฟตรงสูงมากอาจถึง 100 เมกะโอห์ม เรียกว่าถ้าเอาอิมพีแดนซ์รวมตามคั้งสเกลวัดค่าความต้านทานสูงๆ เข้มจะไม่กระดิกเลย แต่ขณะที่มันทำงานความต้านทานไฟสถับจะลดลง

#### 2.4.5 ข้อควรรู้ในการใช้งานตัวรับและตัวส่งทรานสดิวเซอร์

1. ป้องกันโครงสร้างภายในมิให้เสียหายไม่ควรให้ตัวต้นทวนทรานสดิวเซอร์ได้รับการกระแทกหรือตกจากที่สูง เพื่อ
2. ทรานสดิวเซอร์ที่มีขายกัน โดยทั่วไปจะทนแรงดันคร่อมตัวมันได้ไม่เกิน 20 Vrms ดังนั้นขนาดของสัญญาณที่จะป้อนให้กับตัวทรานสดิวเซอร์ก็ควรอยู่ภายในขีดจำกัดนี้
3. ความถี่เรโซแนนท์ (คือความถี่ที่ตัวมันสามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด) ของทรานสดิวเซอร์ 40 KHz (bandwidth) ที่มีขายโดยทั่วไปจะผิดพลาดไปไม่เกิน +/- 1KHz และมีแถบความถี่ประมาณ 4.5 KHz (bandwidth) สำหรับตัวส่ง และมีแถบความถี่ประมาณ 5.0 KHz สำหรับตัวรับจะเห็นได้ว่าแถบความถี่ของตัวรับจะกว้างกว่าตัวส่งเล็กน้อย เพื่อให้แน่ใจว่าตัวรับจะสามารถรับความสามารถรับความถี่ทั้งหมดที่ออกจากตัวส่งได้
4. อุณหภูมิที่ใช้งานของตัวทรานสดิวเซอร์ควรอยู่ภายในช่วง -20 ถึง 60 องศาเซลเซียส
5. ตัวส่งและตัวรับจะมีทิศทางคล้ายคลึงกันมาก กล่าวคือ ที่ตำแหน่งเบนจากแนวแกนของตัวส่งไปประมาณ 30 องศา ความแรงของคลื่นเสียงที่ถูกส่งออกไปจะลดลงจากแนวแกนประมาณ 10 dB ทำนองเดียวกันถ้าคลื่นเสียงพุ่งเข้ามาในแนวที่เบี่ยงเบนไปจากแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวรับประมาณ 30 องศา ความไวหรือขนาดของแรงดันที่ออกมาจะลด จึงควรจะทำให้ทั้งตัวรับและตัวส่งอยู่ในแนวที่พุ่งตรงกันมากที่สุด อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่อยู่ในห้องจะเกิดการเบี่ยงเบนจากกันได้มาก เพราะคลื่นเสียงอัลตราโซนิกจะสามารถสะท้อนกับกำแพงและวัตถุที่อยู่ภายในห้อง ทำให้คลื่นเสียงเข้าไปหาตัวรับได้หลายทาง

อัลตราโซนิกนี้สามารถทำให้เป็นลำแคบได้โดยที่ใช้เลนส์ที่เรียกว่า Planoconvex lenses วางข้างหน้าของทรานสดิวเซอร์ แต่การทำให้เป็นลำแคบ (Beam) นี้จะทำให้ near field ตื้นลง และ far field กระจายกว้างขึ้น การทำให้เป็นลำคลื่นเหมาะสำหรับการใช้ทรานสดิวเซอร์ที่สร้างคลื่นสูงที่เหมาะสมสำหรับที่ใช้ในงานแพทย์ (Ultrasound) ที่มีความถี่ตั้งแต่ 2-5 MHz เพื่อใช้ตรวจในเนื้อเยื่อ มีการส่งเป็นลำแคบ

6. ในกรณีที่ใช้งานตัวรับจะต้องมีความต้านทานต่อขานานกับตัวรับเพื่อทำหน้าที่เป็นโหลด ตามปกติแล้วตัวต้านทานนี้ควรมีค่าอยู่ระหว่าง  $10\text{ K}\Omega$  ถึง  $100\text{ K}\Omega$  จากการทดลองพบว่า ถ้าเปลี่ยนจาก  $100\text{ K}\Omega$  มาเป็น  $10\text{ K}\Omega$  ความไวจะลดลงประมาณ 10 – 12 dB แต่ความถี่จะกว้างขึ้น ถ้าใช้ความต้านทานต่ำลงไปอีก ความถี่เรโซแนนท์ (ความถี่กลาง) จะลดลงไปจากที่ระบุไว้ถ้าการใช้งานมีสัญญาณรบกวนมากควรใช้โหลดที่มีค่าความต้านทานสูงสักหน่อย เพื่อให้ตัวส่งมีความไวสูงและมีความถี่แคบ
7. ตามปกติแล้วสามารถนำเอาตัวส่งและตัวรับมาใช้งานแทนกันได้ ในการใช้งานส่วนใหญ่ตัวส่งและตัวรับรุ่นใด ก็สามารถใช้แทนกันได้ในงานส่วนใหญ่ ขอเพียงแต่ให้มีความถี่เรโซแนนท์เดียวกันเท่านั้นเอง อย่างไรก็ตามในบางกรณีอาจต้องเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสมมูลย์ทางไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้าสลับเพื่อให้เกิดลักษณะผลตอบสนองทางความถี่สอดคล้องกับของเดิม
8. ประโยชน์การใช้งานคลื่นอัลตราโซนิก คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นที่มีทิศทาง ทำให้สามารถเล็งคลื่นไปตามเป้าหมายที่ต้องการได้เจาะจง ยิ่งคลื่นมีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นจะยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิด (ที่ทำให้เสียงออกมา) ของตัวที่ทำให้เกิดเสียงความถี่นี้ เช่น คลื่นความยาว 300 Hz ในอากาศ จะมีความยาวคลื่นถึงประมาณ 1 เมตรเศษๆ ซึ่งจะยาวกว่าช่องเปิดที่ทำให้คลื่นเสียงออกมาจากตัวกำเนิดเสียง โดยทั่วไปมากมายคลื่นจะหักเหที่ขอบด้านบนนอกของด้านนอกของตัวกำเนิดเสียงที่ทำให้เกิดการกระจายทิศทางของคลื่น แต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาอยู่ในย่านอัลตราโซนิก อย่างเช่น 40 KHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียง 8 มิลลิเมตร เท่านั้น ซึ่งเล็กกว่าตัวที่ทำให้เกิดคลื่นเสียงความถี่นี้มากๆ คลื่นเสียงจะไม่มี การเลี้ยวเบนที่ขอบ จึงพุ่งออกมาเป็นลักษณะลำแคบๆ หรือที่เราเรียกว่า “มีทิศทาง” นั่นเอง การมีทิศทางของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ทำให้เราสามารถนำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น คลื่นวัดความหนาของวัตถุ โดยส่งกระดุมที่คลื่นสะท้อนกลับมา เครื่องวัดความลึกทำแผนที่ใต้ท้องทะเล ส่วนการใช้งานทางการแพทย์ อาจใช้งานทางด้าน

การแพทย์ อาจใช้ความถี่ในช่วง 1 MHz ถึง 10 MHz ขณะที่ความถี่เป็น GHz ( $10^9$  Hz) ก็มีใช้กันหลายๆ การใช้งานที่ตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านไม่ใช่อากาศ

## 2.5 ทฤษฎีและหลักการการทำงานของสเตปป์ิงมอเตอร์

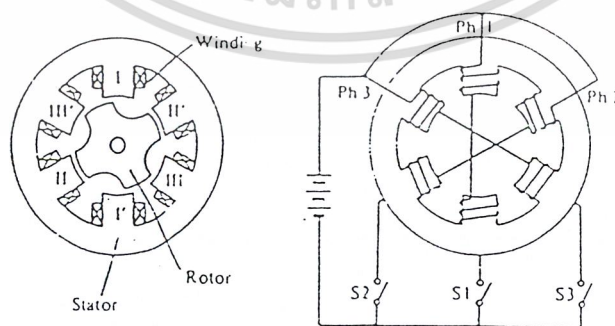
สเตปมอเตอร์ถูกนำมาใช้งานหลายประเภทในปัจจุบัน โดยเฉพาะงานที่ต้องใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ในการควบคุม เนื่องจากง่ายต่อการควบคุม โดยการใช้โปรแกรมเพียงอย่างเดียวก็สามารถควบคุมการหมุนของสเตปมอเตอร์ได้ ไม่ต้องใช้วงจรที่ซับซ้อน และเป็นการควบคุมแบบลูเปิด ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าการใช้มอเตอร์กระแสตรง ซึ่งเป็นการควบคุมแบบลูปิดที่ต้องใช้อุปกรณ์ในการควบคุมมากกว่า

อย่างไรก็ตามมอเตอร์กระแสตรงจะมีแรงบิดที่สูงกว่า และมีการหมุนที่ราบเรียบกว่าสเตปมอเตอร์ ในการเลือกมอเตอร์เพื่อใช้งาน จึงควรพิจารณาความเหมาะสมในการใช้งานของมอเตอร์แต่ละชนิด

### 2.5.1 ชนิดของ Stepping Motor

สเตปมอเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทตามโครงสร้างดังนี้

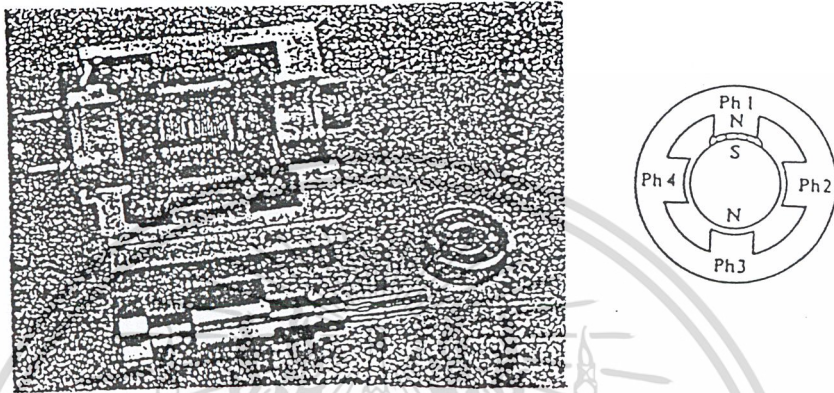
1. Variable Reluctance เป็นสเตปมอเตอร์ที่มีลักษณะ โครงสร้างและการใช้งานที่เป็นพื้นฐานของแบบอื่นๆ ถ้าเป็น VR motor แบบ 3 เฟส โดยที่แต่ละฟันของสเตเตอร์จะถูกพันด้วยขดลวดและขดตรงกันข้ามจะถูกต่อกันแบบอนุกรมหรือขนาน ส่วนโรเตอร์จะเป็นฟันยื่นออกมา ทั้งสเตเตอร์โรเตอร์ทำจากเหล็กผสมซิลิคอน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าความซึมซับสูง (high permiable) ให้เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้มาก มีความเหนี่ยวนำต่ำกว่าแบบอื่น ทำให้มีการตอบสนองที่เร็วกว่าแบบอื่น เนื่องจากมอเตอร์ไม่มีส่วนของแม่เหล็ก ขณะที่ไม่ถูกกระตุ้นจะสามารถหมุนได้อิสระ



รูปที่ 2.15 สเตปมอเตอร์ชนิด Variable Reluctance

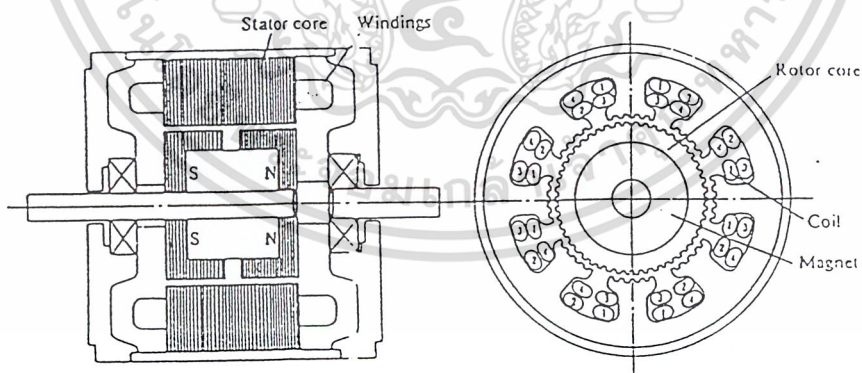
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Permanent Magnet เป็นสเตปมอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรเป็นโรเตอร์ ทำให้มี holding torque ขณะยังไม่หมุนแต่ละฟันของสเตเตอร์จะถูกพันด้วยขดลวดทำให้เกิดเป็นขั้วเทีแม่เหล็กเหนือและใต้สลับกัน บางครั้งอาจจะเพิ่มแม่เหล็กถาวรเข้าในส่วนของสเตเตอร์เพื่อเพิ่มสนามแม่เหล็ก ทำให้มีแรงบิดสูงขึ้น สเตปมอเตอร์ชนิดนี้ จะใช้พลังงานต่ำกว่า และมีการตอบสนองที่ดีกว่าชนิดอื่น โดยทั่วไปมอเตอร์ชนิดนี้ จะมีความกว้างของมุมสเตปขนาด 1.8, 7.5, 15, 30 และ 90



รูปที่ 2.16 สเตปมอเตอร์ชนิด Permanent Magnet

3. Hybrid เป็นสเตปมอเตอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างร่วมกันระหว่างแบบ VR motor และแบบแม่เหล็กถาวร โดยมีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร แต่มีลักษณะการทำงาน เหมือนกับ VR motor ข้อแตกต่างจาก VR motor จะมีขดลวดบนขั้วของสเตเตอร์ เพียง 1 ขด แต่ในไฮบริดจะมีขดลวด 2 ขดในขั้วของ สเตเตอร์เดียว



รูปที่ 2.17 สเตปมอเตอร์แบบ Hybrid

และสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทตามการพันขดลวดบนสเตเตอร์ คือ

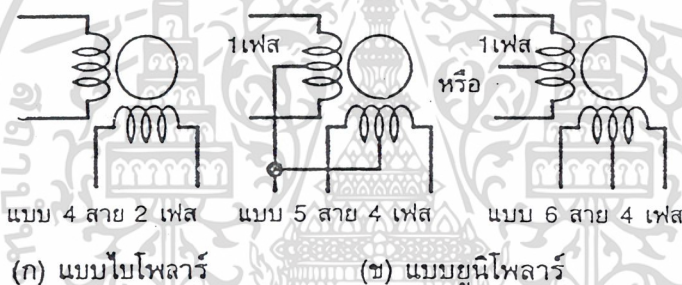
1. แบบไบโพลาร์ (Bipolar) มีการพันขดลวด 1 ขด บนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์ถูกกำหนด โดยทิศทางของกระแสไฟฟ้า และทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามได้โดยการกลับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งกำหนดทิศทางกรไหลและการกลับของทิศทางของกระแสไฟฟ้า ทำได้โดยการใช้วงจรสวิตช์ซึ่งกลับขั้วไฟฟ้า

2. **แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar)** มีการพันขดลวด 2 ขดบนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ซึ่งแต่ละขดจะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม การกลับขั้วแม่เหล็กเปลี่ยนไปมาทำได้โดยการสวิตช์กระแสไฟฟ้าจากขดลวดขดหนึ่งไปยังอีกขดหนึ่ง ขดลวดทั้งสองจะมีการเชื่อมต่อกันหรือมีจุดร่วมเพื่อลดจำนวนของสายไฟที่ต่อจากมอเตอร์ วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ทำได้ง่ายกว่าแบบชนิดไบโพลาร์ เพราะต้องการสวิตช์ธรรมดาในการเปิดและปิด กำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดบนสเตเตอร์ในทิศทางที่ต้องการให้หมุนได้ทันที

ลักษณะการพันขดลวดบนสเตเตอร์ของสเตปมอเตอร์ การพิจารณาว่าสเตปมอเตอร์ ตัวใดมีการพันขดลวดแบบใดสังเกตได้ง่าย ถ้าเป็นแบบไบโพลาร์จะมีสายไฟต่อออกจากมอเตอร์เพียง 4 สายและถ้าเป็นแบบยูนิโพลาร์จะมี 5 หรือ 6 สาย หรือดูได้จากป้ายชื่อที่ติดอยู่กับมอเตอร์ก็ได้



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะการพันขดลวดบนสเตเตอร์

### 2.5.2 การทำงานของสเตปมอเตอร์

การทำงานของสเตปมอเตอร์ มีความแตกต่างจากมอเตอร์ทั่วไป โดยเมื่อป้อนกำลังไฟฟ้าให้กับตัวมัน ก็จะหมุนเพียงเล็กน้อยตามเส้นรอบวงและหยุด แต่มอเตอร์ทั่วไปจะหมุนทันทีและตลอดเวลา สเตปมอเตอร์สามารถกำหนดตำแหน่งการหมุนด้วยตัวเลขได้ละเอียด โดยการใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวกำหนดและจัดเก็บตัวเลขเหล่านั้นไว้

สเตปมอเตอร์ สามารถทำงานในระบบเปิด (Open loop system) แต่วิธีกำหนดตำแหน่งการหมุนให้ถูกต้อง จำเป็นต้องมีการป้อนกลับไปยังระบบให้รับรู้โดยทั่วไปจะใช้การสวิตช์ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งต้องการตรวจจับ (Limit switch) เมื่อสเตปมอเตอร์เริ่มหมุนและหมุนจนกระทั่งถึงตำแหน่งของสวิตช์ตรวจจับสัญญาณ ก็จะถูกป้อนกลับเข้าสู่ระบบและทราบการทำงานของสเตปมอเตอร์ได้ตลอดเวลา ซึ่งโดยปกติในวงจรคอนโทรลเลอร์จะมีการกำหนดจุดอ้างอิงไว้ด้วยเพื่อให้เริ่มต้นทำงานและอ้างอิงตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างง่ายๆ เช่น ถ้าเริ่มจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับฟลอปปีดิสก์ไครฟ์ จะได้ยินเสียงขณะกำลังเคลื่อนที่เพื่อหาจุดอ้างอิงที่กำหนด หลังจากนั้นวงจรไครฟ์คอนโทรลเลอร์จะเริ่มทำงานได้ โดยตัวมันจะทราบถึงทุกๆ สเตปที่กำลังขับเคลื่อนหัวอ่าน-เขียน ไปยังแต่ละแทร็กบนดิสก์

การทำให้เกิดการหมุนของโรเตอร์ก็เช่นเดียวกับมอเตอร์ทั่วไป คือต้องมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดวางขั้วแม่เหล็กการหมุนทำได้ทั้งแบบต่อเนื่องและกลับทิศทางไปมา โดยกระบวนการทางไฟฟ้าสลับหรือการจัดวางแปรงถ่าน การจัดแยกคอมมิวเตเตอร์ การสวิตซ์กำลังไฟฟ้าให้เกิดแรงดึงดูดของแม่เหล็กที่ขั้วแม่เหล็กสร้างและหยุดสลับกัน ผลก็คือ เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นบนสเตเตอร์โดยการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ละคู่ของขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้ามไปตลอดเวลา และเมื่อต้องการให้หยุดหมุนทำได้โดยหยุดการเกิดขั้วแม่เหล็กที่จุดหนึ่ง โดยหยุดการสวิตซ์ในลำดับต่อไปเสีย การหมุนกลับทิศทางก็ทำได้เช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว เพียงแต่ทำการสวิตซ์กำลังไฟฟ้าที่เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางกลับกัน หรือกลับลำดับการสวิตซ์ของมัน

เพื่อให้เข้าใจมากขึ้นมาดูหลักการทำงานแบบง่ายๆ ของสเตปป์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ 4 เฟส ตัวโรเตอร์เนแม่เหล็ก โดยจะเปลี่ยนทิศทางไปตามสนามแม่เหล็กการให้พลังงานแก่ขดลวดในขดลวดหนึ่งโรเตอร์ก็จะหมุนไป 90 องศา แต่ถ้าให้ทีเดียว 2 ขด พร้อมกัน โรเตอร์ก็จะหมุนเพียง 45 องศา ซึ่งแบบหลังจะสร้างแรงบิดได้มากกว่าแบบแรก สเตปป์มอเตอร์จะมีมุมของการเคลื่อนที่แต่ละสเตปเป็น 1.8 องศา ดังนั้นที่โรเตอร์จะต้องมีขั้วแม่เหล็ก 50 ขั้ว ( $90/50 = 1.8$ )

### 2.5.3 การควบคุมการหมุนของสเตปป์มอเตอร์

การควบคุมการหมุนของสเตปป์มอเตอร์แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ

1. แบบเวฟ (Wave) เป็นการกระตุ้นรูปแบบที่ง่ายที่สุด โดยกระตุ้นขดลวดทีละขดในเวลาหนึ่งและเรียงถัดกันไป ดังตาราง

| สเตปที่ | เฟสที่ 1 | เฟสที่ 2 | เฟสที่ 3 | เฟสที่ 4 |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| 1       | ทำงาน    | -        | -        | -        |
| 2       | -        | ทำงาน    | -        | -        |
| 3       | -        | -        | ทำงาน    | -        |
| 4       | -        | -        | -        | ทำงาน    |

ตารางที่ 2.3 แสดงขั้นตอนการกระตุ้นขดลวดแต่ละเฟสแบบเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แบบ 2 เฟส (Two Phase) เป็นการกระตุ้นอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งคล้ายกับแบบเวฟ แต่จ่ายกำลังไฟฟ้าไปที่ขดลวด 2 ขดที่อยู่ใกล้กันและเรียงกันไปเช่นเดียวกับแบบเวฟดังตาราง

| สเตปที่ | เฟสที่ 1 | เฟสที่ 2 | เฟสที่ 3 | เฟสที่ 4 |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| 1       | ทำงาน    | ทำงาน    | -        | -        |
| 2       | -        | ทำงาน    | ทำงาน    | -        |
| 3       | -        | -        | ทำงาน    | ทำงาน    |
| 4       | ทำงาน    | -        | -        | ทำงาน    |

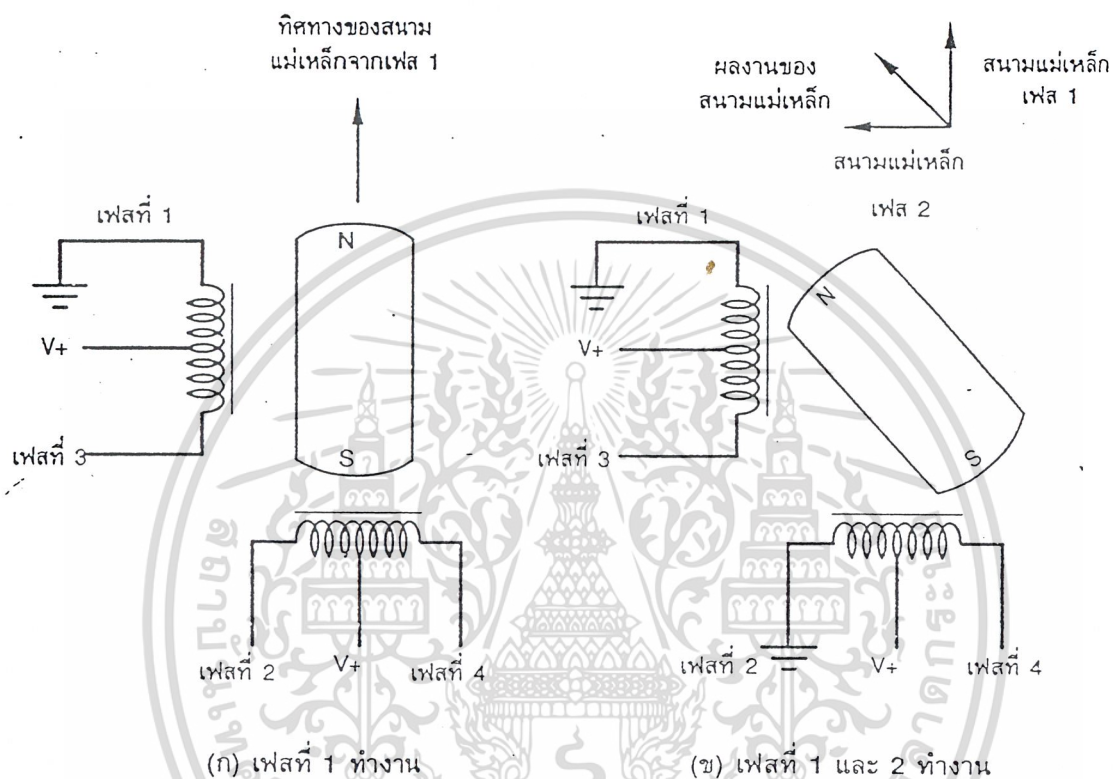
ตารางที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการกระตุ้นขดลวดแต่ละเฟสแบบ 2 เฟส

3. แบบครึ่งสเตป (Half Step) เป็นรูปแบบผสมผสานระหว่างการกระตุ้นแบบเวฟและแบบ 2 เฟส เพื่อเพิ่มจำนวนของสเตปต่อรอบอีกตัวหนึ่ง จะกระตุ้นขดลวดเรียงกันไปเป็นลำดับดังตาราง

| สเตปที่ | เฟสที่ 1 | เฟสที่ 2 | เฟสที่ 3 | เฟสที่ 4 |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| 1       | ทำงาน    | -        | -        | -        |
| 2       | ทำงาน    | ทำงาน    | -        | -        |
| 3       | -        | ทำงาน    | -        | -        |
| 4       | -        | ทำงาน    | -        | -        |
| 5       | -        | -        | ทำงาน    | -        |
| 6       | -        | -        | ทำงาน    | ทำงาน    |
| 7       | -        | -        | ทำงาน    | ทำงาน    |
| 8       | ทำงาน    | -        | -        | ทำงาน    |

ตารางที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการกระตุ้นขดลวดแต่ละเฟสแบบครึ่งสเตป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงทิศทางการหมุน โรเตอร์ของสเตปเปอร์มอเตอร์ 4 เฟส

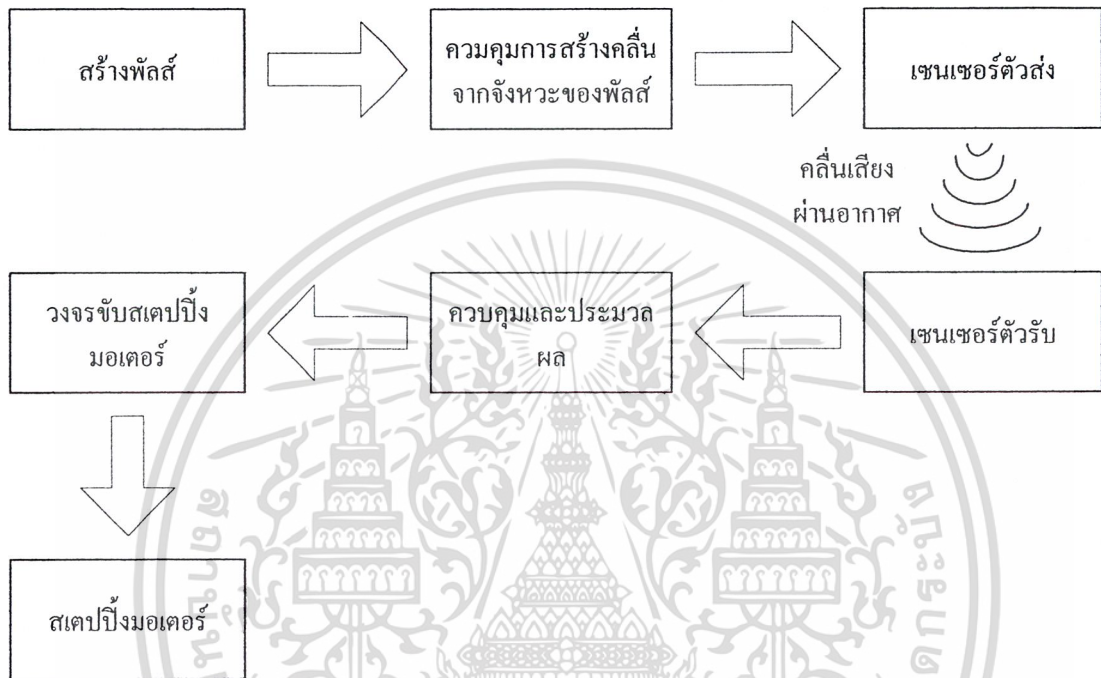
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ระบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับโรงงาน

#### 3.1 โครงสร้างของระบบ

สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของระบบอิเล็กทรอนิกส์

การทำงานเริ่มจากวงจรสร้างพัลส์ เพื่อนำไปเป็นสวิทช์กำหนดการส่งคลื่นเป็นช่วงตามต้องการให้กับทรานซิวเซอร์ในการสร้างคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อส่งไปตัวรับ จากนั้นสัญญาณ จะถูกประมวลโดย MCS-51 ซึ่งจะทำการคำนวณหาค่าระยะทางจากจุดเริ่มต้น ไปสู่เป้าหมาย เพื่อนำไปคำนวณหาจำนวนสเตปป์ที่จะทำให้สเตปป์มอเตอร์หมุน รวมถึงการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวรถว่าจะเลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา หรือตรงไปข้างหน้า ลักษณะการทำงานปพลิเคชันของวงจร และส่วนประกอบของวงจรจะสามารถพิจารณาได้ในหัวข้อต่อไป

#### 3.2 วงจรภาคส่ง-ภาครับคลื่นอัลตราโซนิก

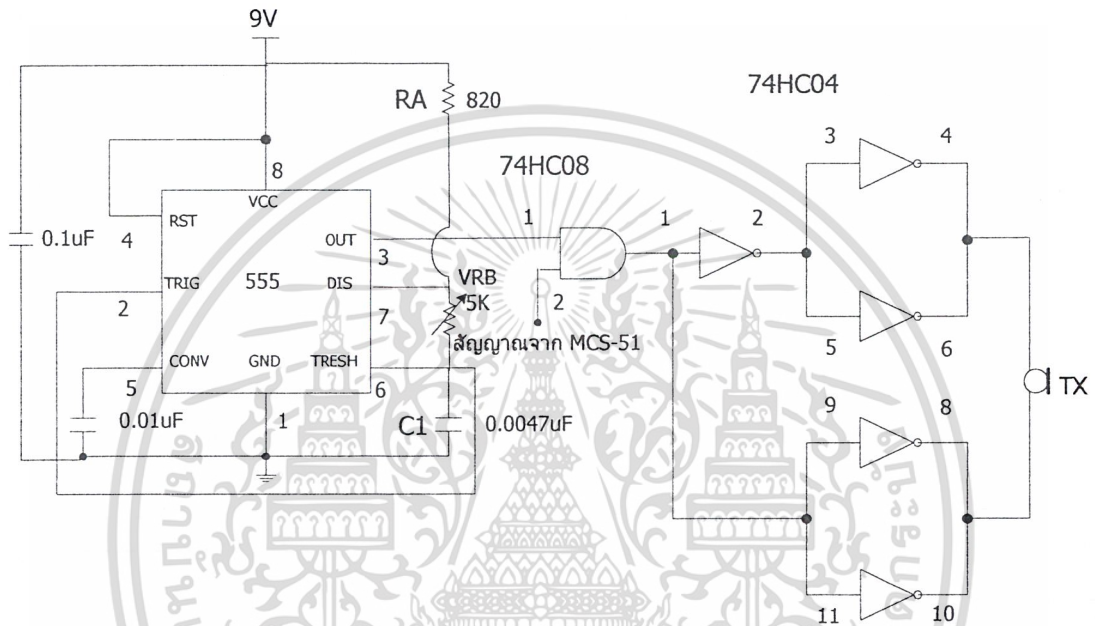
วงจรภาคส่งและภาครับสัญญาณเป็นหัวใจหลักของระบบนาร่อง เพราะจะมีหน้าที่ในการส่งและรับคลื่นสัญญาณ ซึ่งเปรียบเสมือนดวงตาซึ่งถ้าเกิดมีการทำงานผิดพลาดเกิดขึ้นในส่วนนี้ แน่แน่นอนว่าจะต้องเกิดความล้มเหลวในการนาร่องอย่างแน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรภาคส่งและภาครับสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 3.2.1 ภาคส่งคลื่นอัลตราโซนิก

ภาคส่งคลื่นสัญญาณทำหน้าที่ในการกำเนิดคลื่นสัญญาณ ซึ่งในที่นี้ก็คือคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งมีความถี่เท่ากับ 40 KHz ซึ่งจะเป็นความถี่ที่ตัวส่ง (อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ : TX) สามารถทำงานได้ดีที่สุด หมายความว่าแอมพลิจูดที่วัดได้ที่ตัวส่งมีค่าสูงที่สุด จึงทำให้การส่งคลื่นสามารถส่งได้ไกลยิ่งขึ้นนั่นเอง สามารถพิจารณาส่วนประกอบวงจรได้จากรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงวงจรภาคส่งคลื่นอัลตราโซนิก

การทำงานเริ่มจาก IC 555 ซึ่งต่อเป็นวงจรอะอสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์ เป็นตัวกำเนิดสัญญาณสี่เหลี่ยมมีค่า Duty Cycle ประมาณ 55.5% โดยมี VR ไว้ปรับแต่งความถี่ของการออสซิลเลทของวงจรให้เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของตัวส่งที่ใช้ เพื่อให้ได้กำลังเสียงส่งออกสูงสุด เอาท์พุทสัญญาณสี่เหลี่ยมจะออกที่ขา 3 มาเข้า IC 74HC04 ซึ่งทำหน้าที่เป็น Buffer ขยายขนาดแรงดันให้กับทรานสดิวเซอร์ตัวส่งความถี่ 40 KHz โดยมี And Gate เป็นตัวทริกซ์ให้สัญญาณสี่เหลี่ยมออกมาเป็นช่วง ๆ ซึ่งควบคุมโดย MCS-51 และเพื่อให้ได้ผลการทำงานที่ดีที่สุดควรจะวางภาคส่งและภาครับให้พุ่งเข้าหากัน แล้วปรับ VR ให้ขนาดสัญญาณที่ออกจากวงจรขยายภาครับมีขนาดสัญญาณแรงสุด จะสามารถแสดงการคำนวณค่า Duty Cycle และ ความถี่ได้ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2

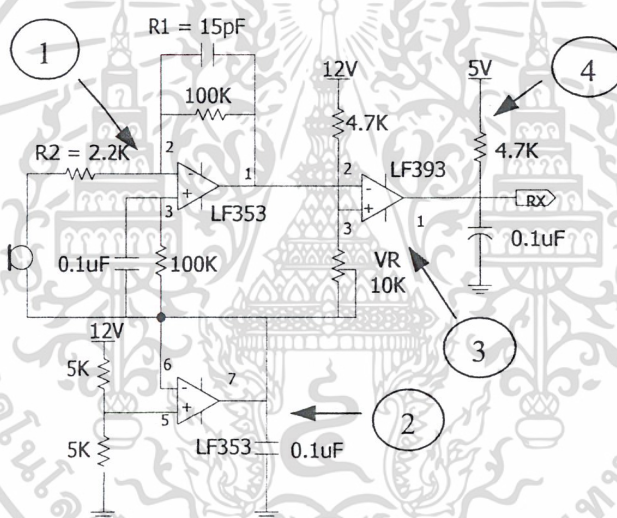
$$\text{จาก } D = \frac{(R_A + R_B) * 100 \%}{(R_A + 2R_B)} \quad (3.1)$$

$$= \frac{(820 + 3.4K) * 100 \%}{(820 + 2(3.4K))} = 55.5 \%$$

$$\text{และ จาก } f = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B) C1} \quad (3.2)$$

$$= \frac{1.44}{(820 + 2(3.4K)) 0.0047 * 10^{-6}} = 40.2 \text{ KHz}$$

### 3.2.2 ภาครับคลื่นอัลตราโซนิค



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรภาครับคลื่นอัลตราโซนิค

วงจรจะแบ่งเป็น 4 ส่วนที่สำคัญคือ

#### 1. ส่วนของวงจรขยายแรงดัน

จากแรงดันที่ได้จากทรานสดิวเซอร์จะเป็นแรงดันระดับ mV จึงจำเป็นต้องมีวงจรเพื่อขยายแรงดันให้เป็นแรงดันระดับ V โดยใช้โอปแอมป์เบอร์ LF353 ต่อแบบ inverting

#### 2. วงจร Voltage Follower

จากวงจรเรานำเอาโอปแอมป์เบอร์ LF353 มาต่อเป็นวงจร Voltage Follower เพื่อทำการกำหนดระดับแรงดันทางด้านขาบวกของโอปแอมป์ในวงจรขยายแรงดันมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. วงจรคอมพาราเตอร์

เป็นวงจรที่ทำการเปรียบเทียบสัญญาณ 2 สัญญาณที่เข้ามาทางขาบวกและลบของออปแอมป์ FL393 โดยถ้าระดับสัญญาณที่ขาลบมีค่าสูงกว่าระดับสัญญาณที่ขาบวก สัญญาณที่เอาต์พุตจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้าสัญญาณที่ขาลบมีค่าต่ำกว่าระดับสัญญาณที่ขาบวก สัญญาณที่เอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับไฟเลี้ยงของออปแอมป์ โดยจากรูปที่ขาลบจะเป็นทางเข้าของสัญญาณ 40 kHz และที่ขาบวกจะสามารถปรับค่าแรงดันเพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณให้ได้เอาต์พุตตามที่ต้องการได้

### 4. วงจรกรองความถี่ 40 kHz

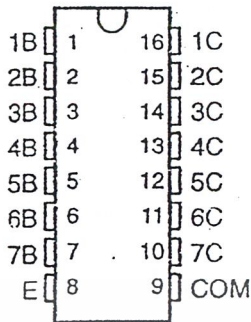
เป็นวงจรที่ทำการกรองสัญญาณ 40 kHz ออกให้เหลือความถี่ต่ำที่สามารถใช้ทำงานกับ MCS-51 ได้

การทำงานเริ่มจากการมีคลื่นเข้ามาตกกระทบกับตัวรับ (RX) ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดแรงดันค่าน้อยๆ อยู่ในระดับมิลลิโวลต์ (mV) ขึ้นที่ขั้วของตัวรับ ค่าแรงดันดังกล่าวจะถูกขยายโดย IC เบอร์ LF 353 ทำให้แรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับโวลต์ (V) แรงดันดังกล่าวจะถูกนำไปผ่านวงจรคอมพาราเตอร์อีกครั้งเพื่อเป็นการกลับเฟสของสัญญาณ และเพื่อเป็นการยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นเท่ากับขนาดของไฟเลี้ยง สัญญาณที่ออกมาจากเอาต์พุตของวงจรคอมพาราเตอร์ยังคงเป็นลักษณะของสัญญาณความถี่สูงรวมมากับบนสัญญาณความถี่ต่ำ สุดท้ายสามารถที่จะกำจัดสัญญาณความถี่สูงได้ โดยนำสัญญาณดังกล่าวมาผ่านวงจรแถบความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ซึ่งประกอบไปด้วย C 0.1 uF และ R 4.7 k สัญญาณที่ได้จะเหลือเฉพาะสัญญาณความถี่ต่ำซึ่งมีค่าประมาณ 4 Hz จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อนำไปประมวลผลและควบคุมต่อไป

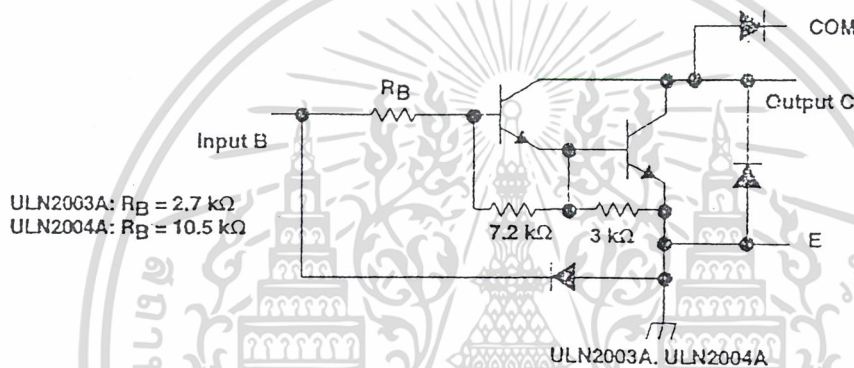
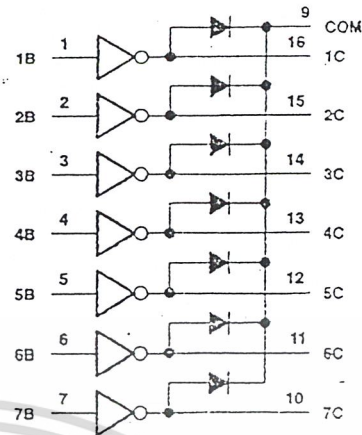
### 3.3 วงจรขั้วมอเตอร์

ส่วนของวงจรขั้วมอเตอร์เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบสเตป เราสามารถควบคุมการหมุนได้โดยการป้อนพัลส์ให้แต่ละเฟสของมอเตอร์แต่เนื่องจากเอาต์พุตของพอร์ตไม่สามารถที่จะขั้วมอเตอร์ได้โดยตรง และเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จึงจำเป็นต้องมีชุดขับกระแสระหว่างพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์กับมอเตอร์ ในโครงการนี้จะใช้ IC ULN2003A เป็นตัวขับกระแสและแรงดันให้กับมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.4

D OR N PACKAGE  
(TOP VIEW)



logic diagram



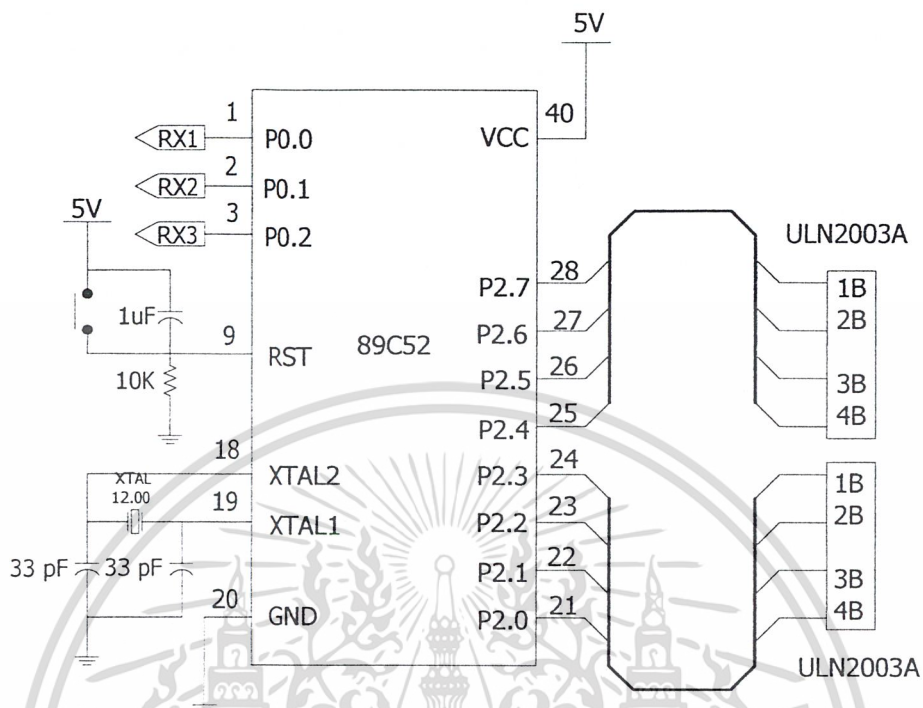
รูปที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของ ULN 2003A

การต่อใช้งานแสดงไว้ดังรูปที่ 3.5 เป็นการต่อวงจรขับมอเตอร์ 2 ชุดเพื่อควบคุม สเตปปีงมอเตอร์ 2 ตัวของล้อแต่ละข้าง ULN 2003A แต่ละตัวสามารถใช้เป็นวงจรขับได้ 7 บิต ทำให้เราต้องใช้ 2 ตัวในการขับวงจร 8 บิต แบ่งเป็น 4 บิตบน-ล่างทำให้แยกขับออกเป็นมอเตอร์แต่ละตัวได้โดยไม่ต้องต่ออุปกรณ์จากภายนอกเลย

คุณสมบัติที่สำคัญของ ULN 2003A

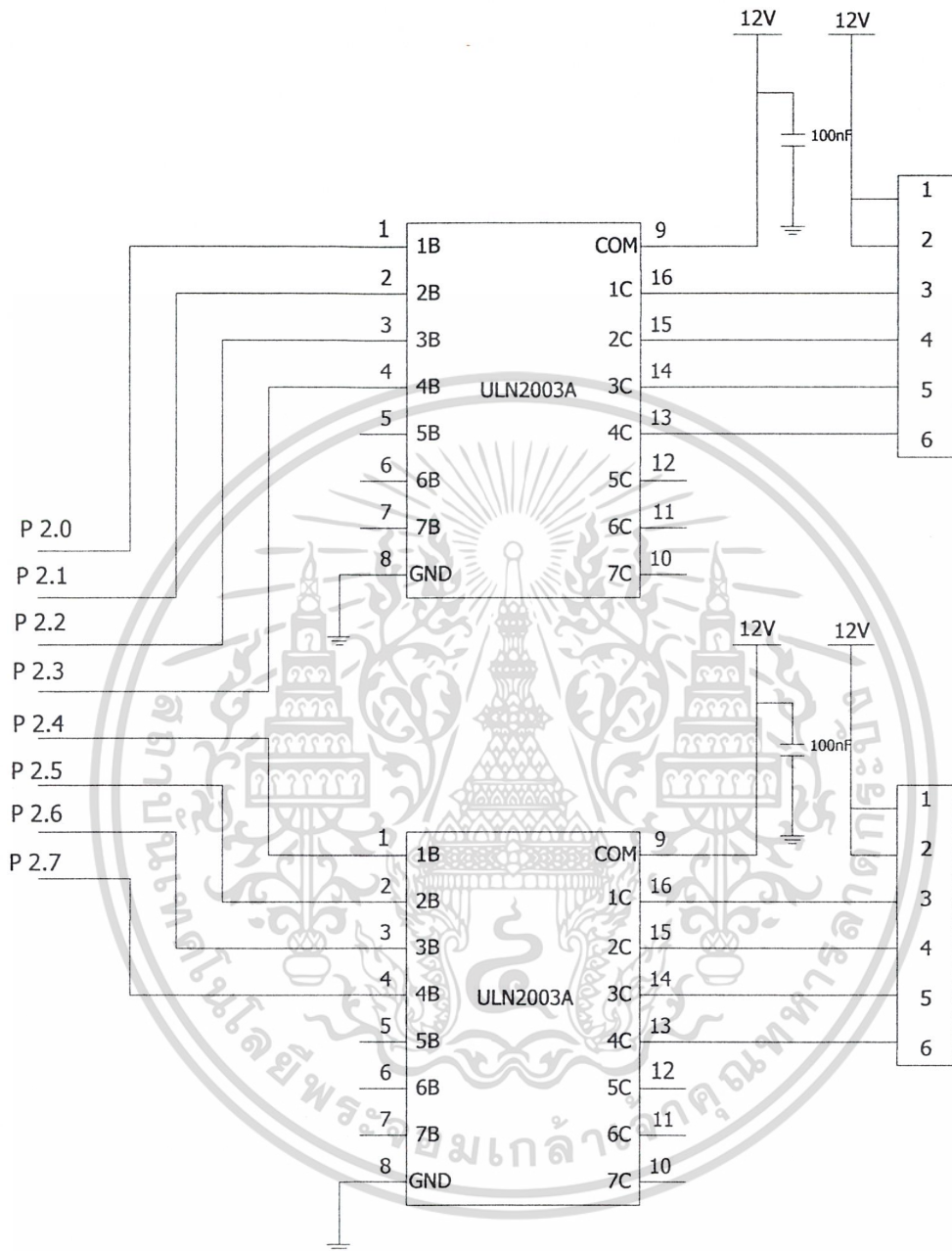
- มี Output Voltage สูงได้ถึง 50 V
- จ่ายกระแส Output สูงสุดได้ถึง 500mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรประมวลผลบนตัวจริง

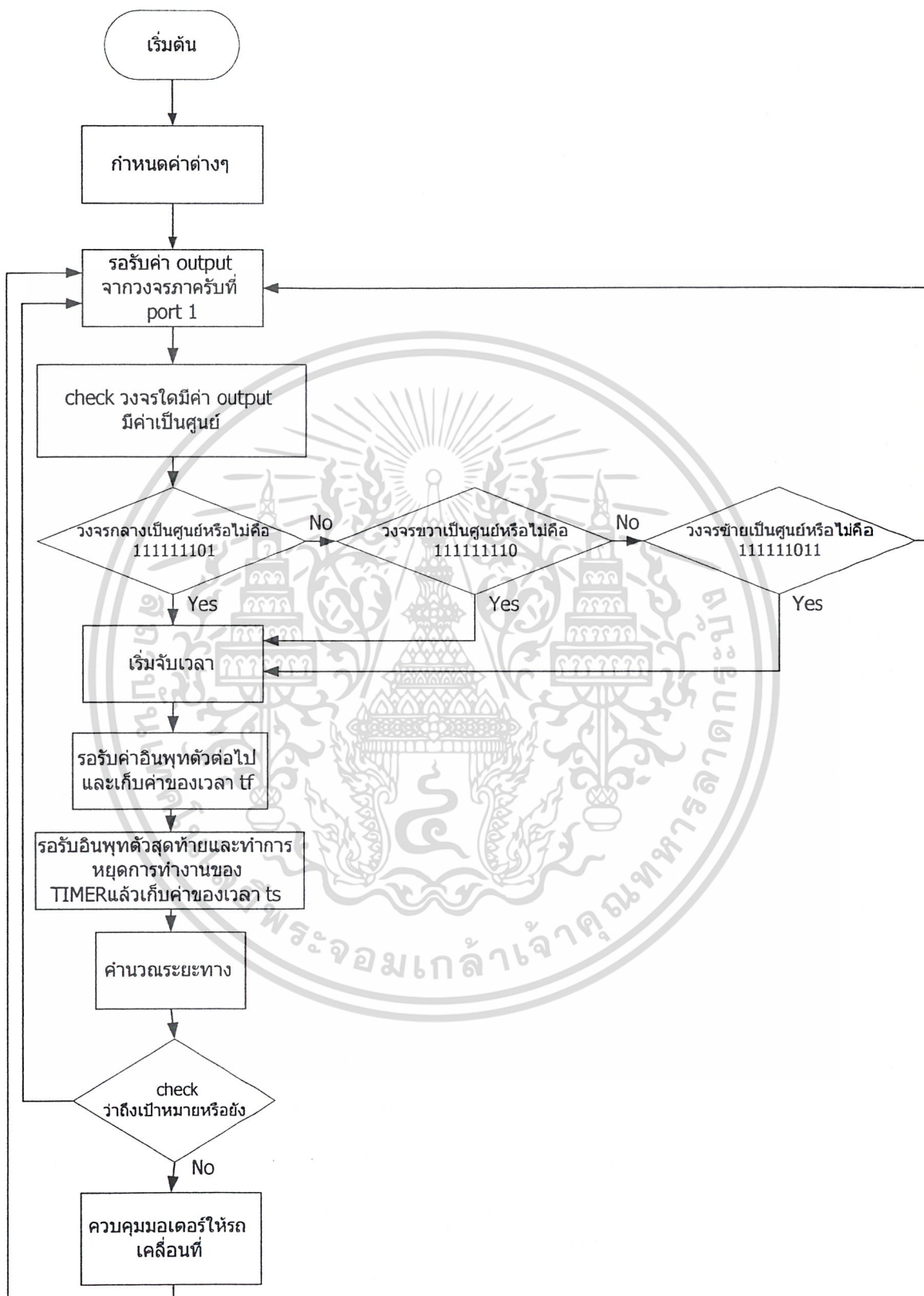
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรขับกระแสของสเตปป์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 Flow Chart โปรแกรมตรวจสอบทิศทาง และคำนวณระยะทางของโครงการ



รูปที่ 3.7 แสดง Flow Chart ของโปรแกรมตรวจสอบทิศทาง และคำนวณระยะทาง

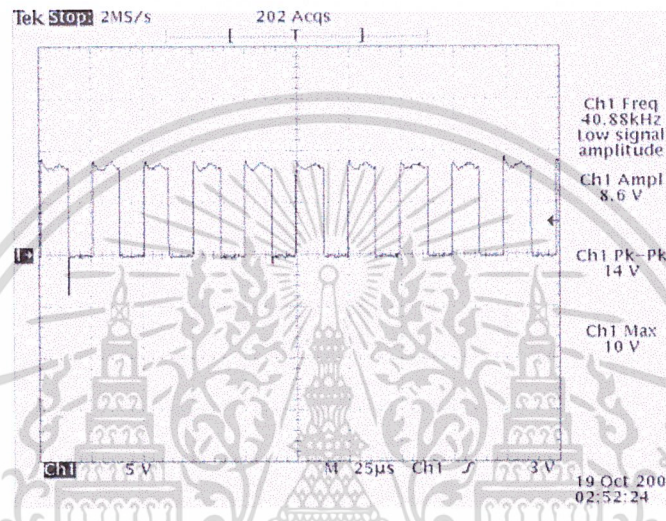
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองวัดสัญญาณจาก IC 555

จากรูปที่ 4.1 จะเป็นสัญญาณที่ได้จาก IC 555 โดยวัดที่ขา 3 ซึ่งเป็นขา Output มีความถี่ประมาณ 40 kHz เมื่อปรับ VR = 3.4 Ω



รูปที่ 4.1 กราฟรูปคลื่นพัลส์ความถี่ 40 kHz ซึ่งวัดที่ขา 3 ของ IC 555

#### 4.2 ผลการทดลองวัดสัญญาณจาก output ตัวรับทรานซิสเตอร์

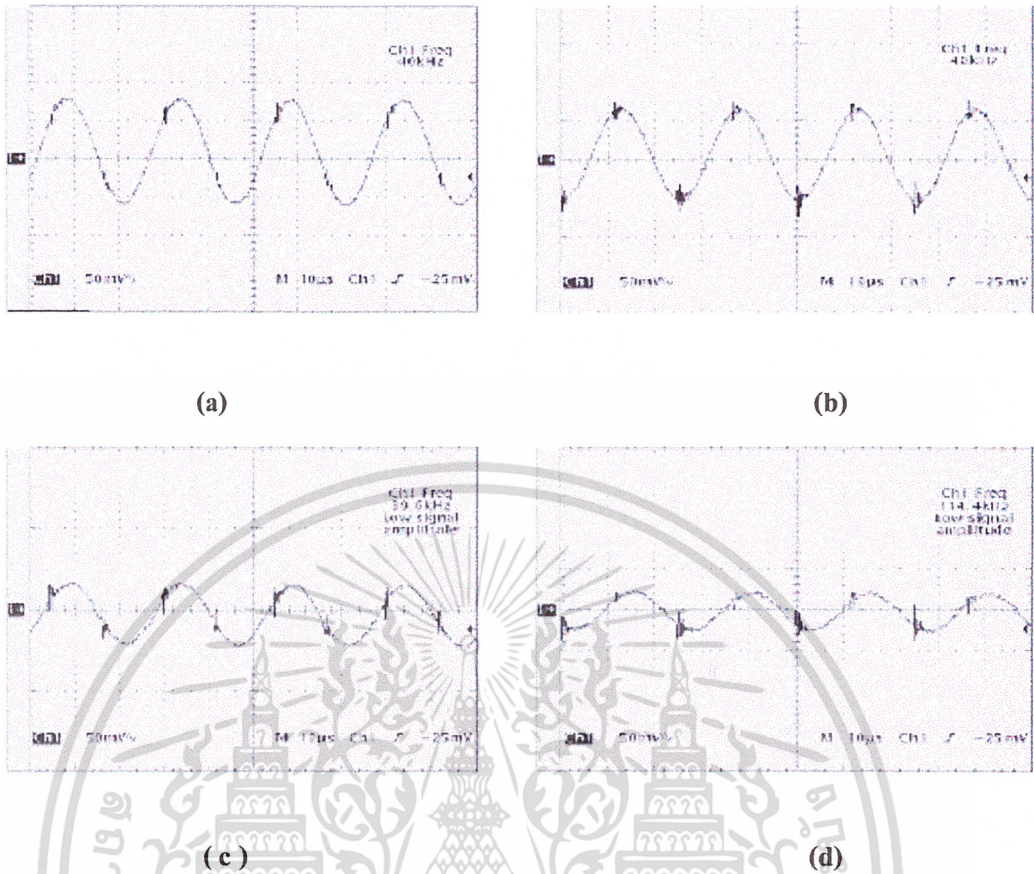
การทดลองจะทำการวัดสัญญาณที่ตัวรับทรานซิสเตอร์ซึ่งได้เปลี่ยนพลังงานคลื่นเสียงเป็นแรงดัน โดยจะทำการวัดที่ระยะทางห่างจากตัวส่งออกไปเรื่อยๆ จะได้กราฟดังรูปที่ 4.2

| ระยะทาง (ซม.) | แรงดัน (mV) <sub>P-P</sub> |
|---------------|----------------------------|
| 26            | 140                        |
| 50            | 130                        |
| 89            | 75                         |
| 120           | 50                         |

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับแรงดันซึ่งวัดที่

ตัวรับทรานซิสเตอร์

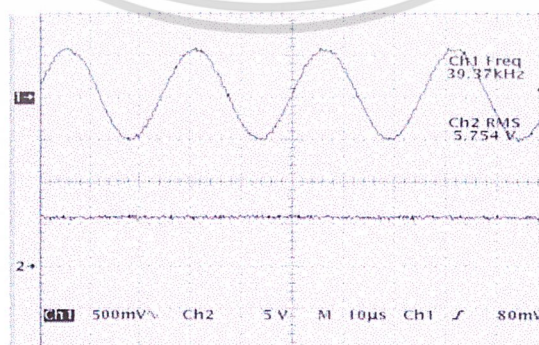
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 รูปกราฟที่วัดสัญญาณที่ตัวรับทรานซิสเตอร์ซึ่งห่างจากตัวส่ง 26,50,89,120 ซม. ตามลำดับ

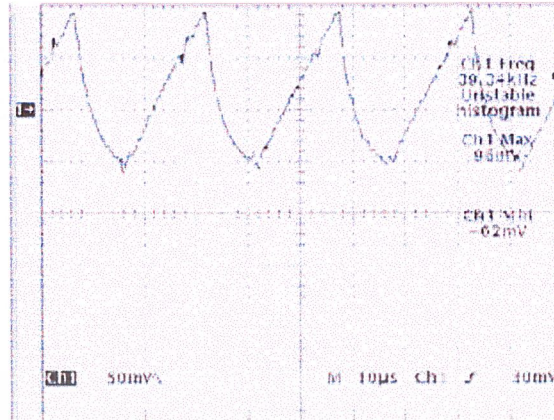
#### 4.3 การทดลองปรับค่า R เพื่อกำหนดแรงดันที่ input ของคอมพาราเตอร์

เป็นการกำหนดค่าแรงดันไฟตรงด้านขาบวกเพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันกระแสลึบขาลบของคอมพาราเตอร์ เราต้องทำการปรับค่า VR ให้ได้จน เมื่อมีคลื่นอัลตราโซนิกเข้ามา output จะมีค่าเท่ากับ 0 V และเมื่อไม่มีคลื่นอัลตราโซนิกเข้ามาเลย output จะเท่ากับ 5 V โดยได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดง Outputขาบวก และขาลบของคอมพาราเตอร์ ขณะมีคลื่นอัลตราโซนิกเข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดง Output ซึ่งวัดที่ขา 1 ของคอมพาราเตอร์ มีค่าแรงดันเท่ากับ 0 แต่ยังมีค่าเหลืออยู่

จากผลการทดลองเราได้ทำการปรับค่า R เท่ากับ  $6.8 \Omega$  และจากการวัดค่าแรงดันที่ขาบวก หรือที่ CH 1 จะได้  $V_{rms} = 5.754 V$  ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ได้ output ตามต้องการ ในขณะที่ไม่มีคลื่นอัลตราโซนิกเข้ามา

- หมายเหตุ จากทั้ง 2 รูป CH 1 วัดออกมาเป็นแรงดัน AC

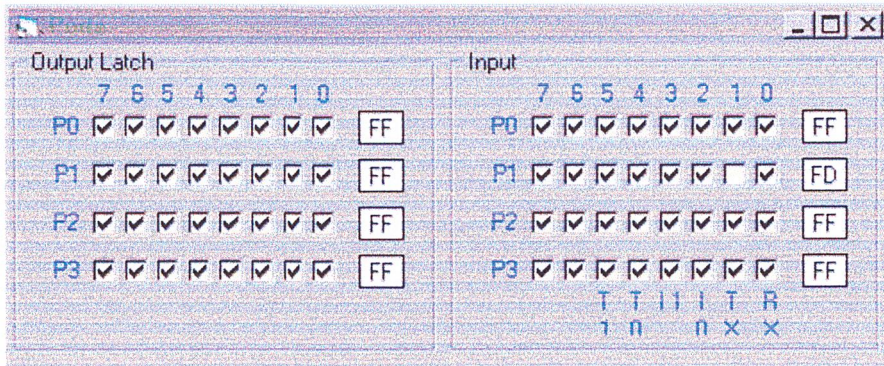
#### 4.4 ผลการซิมมูลเตการทำงานของโปรแกรมคำนวณระยะเวลา

เป็นการทดลองใช้ความสามารถของโปรแกรม โดยสมมติการใส่ค่าของอินพุตตามลำดับให้ตรงกับเงื่อนไขต่างๆ ที่สมมติฐานไว้ แล้วทำการซิมมูลเตโปรแกรม แล้วทำการคำนวณระยะเวลาโดยใช้เวลาที่ TIMER นับได้ มาเปรียบเทียบกับเอาต์พุตจาก PORT2 ว่าเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ในโปรแกรมหรือไม่ ในที่นี้เราจะทำการทดลองซิมมูลเตโปรแกรมตรวจสอบระยะเวลาเฉพาะกรณีเมื่อตัวรวบึงตรงกับเส้นทางเดินรถและระยะห่างระหว่างตัวทรานควิเซอร์ทั้ง 2 คือซ้ายและขวามีระยะทางเท่ากัน เพราะฉะนั้นค่า  $t_f$  (ค่าเวลาที่แตกต่างระหว่างเมื่อคลื่นตกกระทบตัวรับตัวแรกกับตัวที่สอง) จะเท่ากับค่า  $t_s$  (ค่าเวลาที่แตกต่างระหว่างเมื่อคลื่นตกกระทบตัวรับตัวแรกกับตัวที่สาม) ซึ่งจะช่วยให้ง่ายในการทดลอง

กรณี ตัวรวบึงในทางตรงและมีค่า  $t_f$  เท่ากับค่า  $t_s$

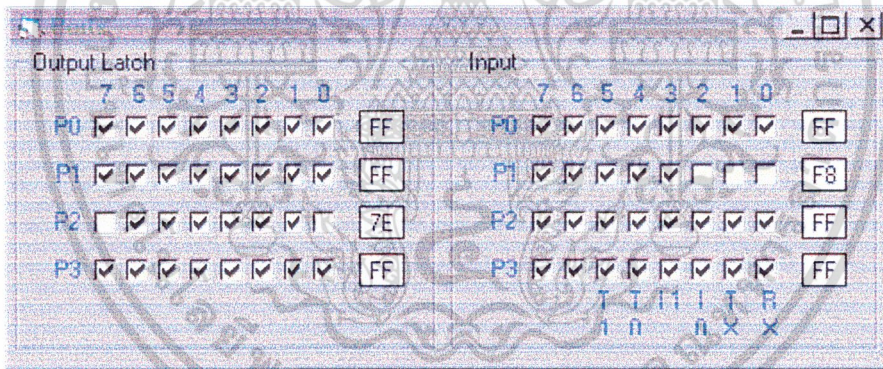
อินพุตเข้าทาง PORT 1 เรากำหนดการใส่ค่าเป็นสองช่วง

ช่วงแรกเป็นค่าอินพุตที่เกิดจากที่คลื่นสัมผัสกับทรานควิเซอร์ตัวกลางเป็นตัวแรก เราจึงกำหนดให้ PORT1 เป็น 1111101

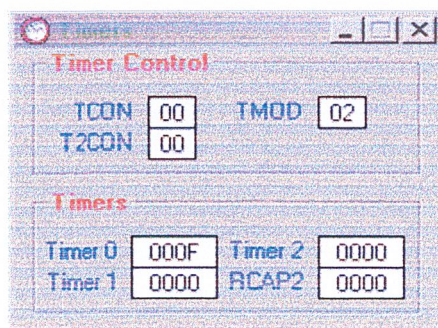


รูปที่ 4.5 อินพุทและเอาพุทที่กำหนดในช่วงแรก

ช่วงที่สองเป็นค่าอินพุทที่เกิดจากที่คลื่นสัมพันธ์กับทรานสิเวอเรอร์ตัวที่เหลือโดยกระทบที่ทรานสิเวอเรอร์ด้านข้าง 2 ตัวพร้อมๆ กัน อินพุทช่วงแรก เรากำหนดให้ PORT 1 เป็น 1111000 สังเกตได้ว่าที่บิต P1.1 ยังมีค่าเป็นศูนย์อยู่เพราะช่วงเวลาที่คลื่นกระทบทรานสิเวอเรอร์ตัวที่เหลือยังคงมีคลื่นเข้าที่ทรานสิเวอเรอร์ตัวกลางอยู่จึงทำให้บิต P1.1 มีค่าเท่ากับศูนย์ และจากโปรแกรมจะทำให้ TIMER หยุดทำงานและจากรูปค่าของ TIMER สามารถทำให้ PORT2 มีการเปลี่ยนแปลงหรือคือรอมีสถานะเคลื่อนที่อยู่นั่นเอง



รูปที่ 4.6 เป็นการกำหนดอินพุทและผลของเอาพุทที่ได้ใน PORT 2



รูปที่ 4.7 ค่าที่กำหนดสำหรับการใช้ TIMER และค่าเวลาที่ได้จากขิมมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 เราจะได้อ่านค่าเวลาจาก TIMER เท่ากับ F us หรือเท่ากับ 15 us ในฐานะสิบและเราจะนำไปคำนวณในสมการ  $R_0 = (2d^2 - (R_1^2 + R_2^2)) / (R_1 + R_2)$  ซึ่ง  $R_1 = R_2 = vt = 340 * 15$  us เราจะได้อ่านค่า  $R_0 = 1.25$  m ซึ่งเรากำหนดเงื่อนไขว่ารถจะวิ่งได้ ถ้า  $R_0 > 0.3$  m เพราะฉะนั้นในกรณีนี้รถจะวิ่ง (PORT 2 มีการเปลี่ยนสถานะเพื่อหมุนสเตปมอเตอร์)

**ผลการทดลอง** เงื่อนไขถ้า ระยะมีค่าน้อยกว่า 30 ซม. สถานะเอาพุทจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรืออีกในหนึ่งคือรถสามารถหยุดได้นั่นเอง และระยะห่างระหว่างตัวรับทรานซิสเตอร์ทั้ง 3 คือ 8cm

| ค่าจาก TIMER (us) | เลขฐานสิบ (t (us)) | สถานะเอาพุทจากโปรแกรม | คำนวณระยะทาง (m) | การทำงานจริง      |
|-------------------|--------------------|-----------------------|------------------|-------------------|
| F                 | 15                 | เปลี่ยนแปลง           | 1.25             | ไม่ปกติ           |
| 1B                | 27                 | เปลี่ยนแปลง           | 0.69             | ไม่ปกติ           |
| 2B                | 43                 | เปลี่ยนแปลง           | 0.42             | ไม่ปกติ           |
| 33                | 51                 | เปลี่ยนแปลง           | 0.35             | ไม่ปกติ           |
| 37                | 55                 | เปลี่ยนแปลง           | 0.32             | ไม่ปกติ           |
| 3B                | 59                 | ไม่เปลี่ยนแปลง        | 0.298            | ไม่หยุดและไม่ปกติ |
| 3F                | 63                 | ไม่เปลี่ยนแปลง        | 0.278            | ไม่หยุดและไม่ปกติ |

\*ไม่ปกติ คือการผิดพลาดในการตรวจระยะทางและทิศทาง

ตารางที่ 4.2 ผลการซิมูเลทโปรแกรม

จากตารางจะเห็นว่ารถจะเคลื่อนที่ได้หรือที่ PORT 2 มีการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนบิตของบิต 0 เมื่อค่า TIMER มีค่าน้อยกว่า 3B (ฐาน 10 คือ 59) และเมื่อนำมาคำนวณหาระยะทางจะได้ระยะทางมากกว่า 30 cm ซึ่งตรงตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ในโปรแกรมและที่ PORT 2 จะไม่มีการเคลื่อนบิตของบิต 0 เมื่อค่า TIMER มีค่ามากกว่าเท่ากับ 3B (ฐาน 10 คือ 59) นำค่าเวลาไปคำนวณจะได้ระยะทางน้อยกว่า 30 cm ตามเงื่อนไขเช่นเดียวกัน

จากการสังเกตค่าเวลา t กับระยะทางได้ว่า

ถ้าค่า t มีค่ามาก ค่าของระยะทางจะน้อยลง นั่นคือ ถ้าระยะทางยิ่งน้อยส่วนของเส้นโค้งยิ่งโค้งมากขึ้น

ถ้าค่า t มีค่าน้อย ค่าของระยะทางจะมากขึ้น นั่นคือ ถ้าระยะทางยิ่งมากส่วนของเส้นโค้งยิ่งโค้งน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองชุดนี้สามารถยืนยันได้ว่า โปรแกรมสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด แต่เมื่อนำมาใช้จริงปรากฏว่าโปรแกรมไม่สามารถทำงานได้ เป็นเพราะช่วงเวลามีทำการจับเวลามีค่าน้อยในระดับ us ซึ่งเวลาการทำงานของโปรแกรมแต่ละคำสั่งประมาณ 1-2 cycle ซึ่งมีระดับความเร็วในหน่วย us เช่นเดียวกันจึงทำให้การกำหนดเริ่มจับเวลาและการกำหนดหยุดเวลามีการคาดเคลื่อนจึงทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณคาดเคลื่อนไปด้วย

#### 4.5 มุมองศาของรถที่ระบบสามารถทำงานได้

เราจะทำการวัดมุมจากแนวตั้งค้ำหน้าของรถไปทางทิศทวนเข็มนาฬิกา

| รถทำมุมกับแนวตั้ง<br>(องศา) | สถานะการทำงาน         |
|-----------------------------|-----------------------|
| 0                           | วิ่งตรง               |
| 45                          | เลี้ยวขวา             |
| -45                         | เลี้ยวซ้าย            |
| 90                          | เลี้ยวขวา             |
| -90                         | เลี้ยวซ้าย            |
| -120,120                    | เลี้ยวซ้าย, เลี้ยวขวา |

ตารางที่ 4.3 บอกสถานะการทำงานของรถ

#### 4.6 ขอบเขตของระยะทางที่ทำงานได้

ทำการทดลองการทำงานของรถ โดยการเปลี่ยนระยะห่าง แล้วสังเกตการทำงานของรถ

| ระยะทาง (m) | ลักษณะการทำงาน                    |
|-------------|-----------------------------------|
| 0.5         | ทำงานได้ปกติ                      |
| 2           | ทำงานได้ปกติ                      |
| 4           | ทำงานได้ปกติ                      |
| 5           | ทำงานได้ปกติ                      |
| 6           | เกิดการผิดพลาดของการตรวจสอบทิศทาง |
| 7           | ไม่ทำงาน                          |

ตารางที่ 4.4 ตารางบอกขอบเขตของระยะทางที่รถทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 สรุปผลการทดลอง

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ทำให้แน่ใจได้ว่าภาคส่งและภาครับสามารถทำงานได้ในระยะห่างที่เพียงพอต่อการทำโครงการชิ้นนี้ และจากการปรับค่าต่างๆ ก็มีผลต่อการทำงานของารรับส่งคลื่นอัลตราโซนิก ได้แก่

ค่า R ที่ทำการปรับค่าที่ IC 555 เราได้ทำการปรับจนได้แรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์ตัวรับมีค่าสูงสุด และยังคงความถี่ 40 kHz ที่ output ของ IC 555 เพื่อที่จะสามารถผลิตคลื่นอัลตราโซนิกได้

ค่า R ที่ทำปรับระดับแรงดันที่ขาลบของออปแอมป์ที่ทำหน้าที่เป็นคอมพาราเตอร์ และทำงานร่วมกับวงจรกรองความถี่สูงและวงจรยกระดับแรงดัน โดยทำการปรับค่า R จนกว่า เมื่อมีคลื่นอัลตราโซนิกเข้ามาให้ output มีแรงดันเป็น 0 V และถ้าไม่มีคลื่นอัลตราโซนิกเข้ามาให้มีแรงดันเป็น 5 V

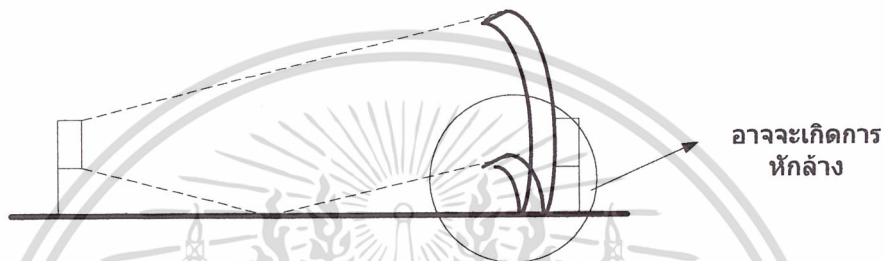
จากการทดลองซิมูเลทเราสามารถยืนยันได้ว่าโปรแกรมสามารถทำงานได้จริงเพราะจากความสัมพันธ์ของค่าเอาพุทจาก PORT2 กับ ค่าของระยะทางที่นำค่าของ TIMER จากการซิมูเลทมีความสัมพันธ์ตรงกับเงื่อนไขที่ตั้งไว้ แต่เมื่อทำการทดลองให้จริง ๆ รถไม่สามารถวิ่งและหยุดได้ตามต้องการ น่าจะเนื่องมาจากค่าเวลาที่ต้องการมีค่าน้อยมาก (มีหน่วยเป็น us) การเขียนโปรแกรมต้องเขียนให้กระชับในการรับอินพุทเพื่อทำการเริ่มจับเวลาและหยุดเวลา เพราะคำสั่งแต่ละคำสั่งใช้เวลาประมาณ 1-2 us ซึ่งมีผลต่อค่าเวลาที่จับได้ทำให้ค่าระยะทางเกิดผิดพลาดไปด้วย เพราะฉะนั้นต้องทำการเปลี่ยน CPU ที่มีการทำงานได้เร็วกว่านี้

## บทที่ 5

### ปัญหา สาเหตุ และแนวทางการแก้ไข

#### 5.1 ตัวรถไม่สามารถจะตรวจสอบระยะทางได้ตามโปรแกรม

ปัญหาที่ 1 สมมติฐานว่าน่าเกิดการหักล้างของคลื่นตามแนวตั้งจากคลื่นที่สะท้อนจากพื้น ทำให้เกิด error ในการจับเวลาของ TIMER



รูปที่ 5.1 แสดงการหักล้างของคลื่นตามแนวตั้ง

แก้ไขที่ 1 ทำการเพิ่มระดับความสูงของตัวส่งและตัวรับ



รูปที่ 5.2 แสดงการแก้ไขของการหักล้างของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาที่ 2 หน้าที่คลื่นไม่โค้งตามที่คาดการณ์ไว้

การรับคลื่นจะรับเพียงส่วนหนึ่งของเส้นโค้ง ถ้าตัวรับอยู่ไกลมาก คลื่นที่เป็นส่วนของเส้นโค้งจะเปรียบได้เป็นเส้นตรง และถ้าตัวรับอยู่ใกล้เข้ามา ส่วนของเส้นโค้งจะมีความโค้งมากขึ้น

การคำนวณระยะทาง ค่าเวลา ( $t$ ) มีความสำคัญมาก ถ้ารับอยู่ใกล้ตัวส่งสัญญาณแล้ว สัญญาณที่ได้รับมีหน้าคลื่นที่มีความโค้งที่เพิ่มขึ้นจากที่เคยสมมติฐานแล้ว ค่าของระยะทางจะไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่เคยคิดไว้



รูปที่ 5.3 รูปการรับคลื่นและการแก้ไขการรับคลื่น

แก้ไขที่ 2 ทำการเพิ่มความกว้างหรือระยะทางระหว่างของตัวรับทรานสดิวเซอร์ให้มาก

ขึ้น

## 5.2 สิ่งรบกวนของระบบ

ปัญหาที่ 1 ผลกระทบจากคลื่นนอกระบบ

จากผลกระทบจะทำให้ระบบทำงานเพิ่มขึ้นไป

แก้ไขที่ 1 ทำงานในสถานที่ที่ไม่มีเสียงรบกวน

ปัญหาที่ 2 ผลกระทบจากคลื่นสะท้อน

จากผลกระทบจะทำให้ระบบทำงานเพิ่มขึ้นไป

แก้ไขที่ 2 ทำงานในสถานที่โล่งๆ กว้างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 เกิดการ error ในการรับอินพุท

#### ปัญหาที่ 1 ปัญหาจากการเขียนโปรแกรม

ผลกระทบคือ โปรแกรมอาจจะทำการรับอินพุทไม่ทัน ทำให้ค่าการนับของ TIMER เกิด error ไม่ตรงกับความเป็นจริง

แก้ไขที่ 1 พยายามเขียน โปรแกรมช่วงการรับอินพุทให้สั้นที่สุดที่จะทำได้

#### ปัญหาที่ 2 การออกแบบ โครงสร้างในตำแหน่งของตัวรับ

ถ้าออกแบบที่วางของตัวรับ ไม่เสถียร อาจจะทำให้แนววางของตัวรับไม่อยู่ในแนวเดียวกัน ซึ่งจะทำให้เกิด error ของค่า t จากความเป็นจริง

แก้ไขที่ 2 ทำที่ยึดตัวรับทั้ง 3 ตัวให้อยู่ในแนวเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### บทสรุปและแนวทางการพัฒนา

#### 6.1 คุณสมบัติของระบบ

1. สามารถนำร่องรถให้รถเคลื่อนที่ไปยังจุดเป้าหมายได้
2. รถสามารถรู้ตำแหน่งและระยะทางเทียบกับเป้าหมายได้
3. สามารถหยุดหรือเลี้ยวเบนไปในทิศทางที่กำหนดได้

#### 6.2 ข้อจำกัดของระบบ

1. ระยะทางและทิศทางเป็นสิ่งสำคัญในการนำร่องไปรถสู่เป้าหมาย เราไม่สามารถจะนำร่องรถได้ถ้าระยะไกลเกินไปเพราะ อาจจะมีกำลังส่งไปไม่ถึงตัวรับ หรือสัญญาณที่รับได้อ่อนเกินไป
2. ทิศทางในการรับส่งก็เป็นอุปสรรค เมื่อตัวรับและตัวส่งอยู่ในแนวตั้งฉากกันหรือมากกว่านั้นทำให้คลื่นอาจเดินทางไม่ถึงกัน
3. สภาพแวดล้อมก็มีความสำคัญมากต่อการรับส่งคลื่นอัลตราโซนิก เนื่องจากถ้าหากมีวัตถุใดๆ ขวาง หรือสอดแทรกเข้ากับทางเดินของคลื่นขณะระบบทำการรับส่งคลื่น ก็จะทำให้การรับการส่งมีความผิดพลาด และมีผลทำให้การประมวลผลทิศทางการเคลื่อนที่ผิดพลาดไปด้วย นอกจากนี้หากระบบอยู่ในสถานที่คับแคบเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาคลื่นสะท้อน มีผลให้คลื่นแทรกสอดกันอาจทำให้การประมวลผลทิศทางการเคลื่อนที่ผิดพลาดได้ รวมถึงการคำนวณระยะทางด้วย
4. สภาพแวดล้อมทางเสียงก็มีผลด้วยเช่นกัน เนื่องจากถ้าหากขณะที่ระบบทำการรับส่งคลื่น เกิดมีเสียงเล็ดลอดเข้ามาผ่านทางเดินของคลื่น ก็อาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้เช่นกัน แต่ก็อาจมีผลไม่มากนักในกรณีเสียงที่ไม่ดังมาก และความถี่ไม่กวนกันคือ 40KHz ซึ่งเป็นความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิก

#### 6.3 บทสรุป และวิจารณ์

จากการทดลองจะเห็นว่า เมื่อเราโปรแกรมให้รถสามารถตรวจสอบทิศทางอย่างเดียวโดยใช้เงื่อนไขหลักการข้างต้น รถสามารถเคลื่อนที่ไปหาเป้าหมายได้ในทิศทางที่กำหนด คือสามารถเลี้ยวซ้ายเลี้ยวขวาวิ่งสู่เป้าหมายได้ แต่ยังไม่สามารถตรวจสอบระยะทางได้ เมื่อเราทำการโปรแกรมให้รถสามารถตรวจสอบระยะทางลงไป รถจึงไม่สามารถหยุดได้ที่ระยะทางที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขัดกับผลการชิมมูเลทที่ขึ้นชั้นได้ว่ารถสามารถคำนวณระยะทาง และหยุดที่ระยะที่กำหนดได้จริง สาเหตุสามารถสมมติฐานได้ว่า จะมาจากสภาพแวดล้อม และลักษณะของคลื่นที่ส่งออกมาจากตัวส่ง และลักษณะการวางตัวของตัวรับทั้ง 3 ตัว ซึ่งความผิดพลาดต่างๆ ได้พยายามทำการแก้ไขแล้วโดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวรับ 3 ตัว เพื่อให้การประมวลผลทำได้ดีขึ้นสามารถตรวจจับได้อย่างชัดเจนขึ้นว่าตัวรับตัวใดเป็นตัวรับคลื่นก่อน รวมทั้งการเพิ่มความสูงของตัวรับขึ้นเพื่อลดการสะท้อนของคลื่นที่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประมวลผล แต่ก็ยังไม่สามารถคำนวณระยะทางได้

เนื่องจากการทำโครงการนี้เป็นเพียงการศึกษาความเป็นไปได้เท่านั้น ที่ผ่านมาต่างประเทศประสบปัญหามากมาย จึงต้องมีการแก้ไขและปรับปรุงอีกมาก เชื่อแน่ว่าหากได้รับการปรับปรุงอย่างถูกต้องและต่อเนื่องแล้ว ระบบนำร่องรถด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจะมีประโยชน์ต่อระบบอุตสาหกรรมในโรงงาน และอื่นๆอีกมากมาย

### 6.3 แนวทางการพัฒนา

ในการพัฒนาระบบนำร่องรถด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ควรออกแบบให้ระบบสามารถรับส่งคลื่นได้ในระยะทางที่ไกลขึ้นกว่านี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อระบบนำร่อง รวมทั้งการประมวลผลที่ดีขึ้นสามารถหยุดได้ในระยะทางที่กำหนด นอกจากนี้สามารถพัฒนาจากการนำร่องรถด้วยตัวส่งตัวเดียวมาเป็นตัวส่ง 2 ตัว หรือมากกว่า เพื่อให้สามารถนำร่องให้รถเลี้ยวได้ โดยเมื่อรถถูกนำร่องไปถึงตัวส่งตัวแรกแล้ว ตัวส่งตัวต่อมาก็จะส่งคลื่นมานำร่องต่อจนไปถึงเป้าหมาย

เราอาจจะใช้หลักการเดิมมาประยุกต์ใช้กับคลื่นตัวสัญญาณตัวใหม่อย่างเช่น อาจจะเปลี่ยนจากการใช้คลื่นอัลตราโซนิกมาเป็นคลื่นวิทยุได้ซึ่งคลื่นวิทยุจะสามารถส่งสัญญาณได้ไกลมากขึ้น หรืออาจประยุกต์เปลี่ยนจากนำร่องรถมาเป็นเรือแทนก็ได้ ซึ่งใช้ในการนำร่องหลบสิ่งกีดขวางที่อยู่ใต้น้ำได้ หรืออาจจะประยุกต์โดยการติดกล้องที่รถเป็นรถลาดตระเวนโดยอัตโนมัติ ไม่มีผู้บังคับ หรือเป็นรถส่งเอกสารในสำนักงานก็ได้

## บรรณานุกรม

1. ชีรวัดน์ ประกอบผลม , การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์
2. ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล , วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล , เรียนรู้และปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 51
3. การใช้งานอุลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์ , รวมโครงการอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 4
4. อ.วรพล ธิลาเกียรติสกุล , อ. มารุต ตามศรี , พัฒนพล สายกลั่น , C51LAB , SILA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### 1. โปรแกรมที่ใช้ในการส่งคลื่นอุลตราโซนิกเป็นช่วงๆ

```
#include <reg51.h>
sbit P1_0 = P1^0;
void delay(int count) {
int i;
while(count) {
for (i=0; i<226; i++);
count--; }
}
void main(void)
{
TMOD = 0x10; /*กำหนดโหมด 1*/
while (1)
{
P1_0 = 0;
delay(113);
P1_0 = 1;
TH1 = 0xFC ; /*นับ 1000 พัลส์*/
TL1 = 0x18 ;
TR1 = 1;
while (!TF1);
TF1 = 0;
TR1 = 0;
}
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. โปรแกรมที่ในการตรวจทิศทางเคลื่อนที่ของรถ

```
#include <reg51.h>

sbit P1_0 = P1^0;
sbit P1_1 = P1^1;
sbit P1_2 = P1^2;

sbit P2_0 = P2^0;
sbit P2_1 = P2^1;
sbit P2_2 = P2^2;
sbit P2_3 = P2^3;
sbit P2_4 = P2^4;
sbit P2_5 = P2^5;
sbit P2_6 = P2^6;
sbit P2_7 = P2^7;

void delay(int count);

void main(void)
{
    loop1:
    if (P1_0 == 1 && P1_2 == 1 && P1_1 == 0)
    {
        P2_3 = P2_2 ;
        P2_4 = P2_5 ;
        P2_2 = P2_1 ;
        P2_5 = P2_6 ;
        P2_1 = P2_0 ;
    }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        P2_6 = P2_7;
    if (P2_3 == 0 && P2_2 == 0 && P2_1 == 0)
        P2_0 = 1;
    else
        P2_0 = 0;
    if (P2_4 == 0 && P2_5 == 0 && P2_6 == 0)
        P2_7 = 1;
    else
        P2_7 = 0;
        delay(30);
        goto loop1;
    }
    else
        if (P1_0 == 0 && P1_1 == 1 && P1_2 == 1)
        {
            P2_3 = P2_2;
            P2_2 = P2_1;
            P2_1 = P2_0;
            if (P2_3 == 0 && P2_2 == 0 && P2_1 == 0)
                P2_0 = 1;
        }
    else
        P2_0 = 0;
        delay(30);
        goto loop1;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else
if (P1_2 == 0 && P1_0 == 1 && P1_1 == 1)
{
    P2_4 = P2_5 ;
    P2_5 = P2_6 ;
    P2_6 = P2_7 ;

if (P2_4 == 0 && P2_5 == 0 && P2_6 == 0)
    P2_7 = 1;
else
    P2_7 = 0;
    delay(30);
    goto loop1; }
else
    goto loop1;
}
void delay(int count) {
    int i;
    while(count) {
        for (i=0; i<226; i++);
        count--;
    }
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. โปรแกรมที่ใช้ในการตรวจทิศทางการวิ่งและระยะห่างระหว่างตัวส่งคลื่นกับตัวรอด

```
#include <reg51.h>

sbit P1_0 = P1^0;
sbit P1_1 = P1^1;
sbit P1_2 = P1^2;

sbit P2_0 = P2^0;
sbit P2_1 = P2^1;
sbit P2_2 = P2^2;
sbit P2_3 = P2^3;
sbit P2_4 = P2^4;
sbit P2_5 = P2^5;
sbit P2_6 = P2^6;
sbit P2_7 = P2^7;

void delay(int count);

void main(void)
{
    int y = 340;
    unsigned B,C,D;
    float ts,tf,t,s,d = 0.06;
    TMOD = 0X02;
    loop1: TF0 = 0;
    TL0 = 0X00;
    if (P1_0 == 1 && P1_2 == 1 && P1_1 == 0)
    {
        TR0 = 1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
loop2: if (P1_0 == 0 || P1_2 == 0)
```

```
{   TR0 = 0;
```

```
    B = TL0;
```

```
    t = B*0.000001 ; }
```

```
else goto loop2;
```

```
s = (2*d*d-(2*t*t*v*v))/(2*v*t);
```

```
if (s > 0.3)
```

```
{
```

```
    P2_3 = P2_2 ;
```

```
    P2_4 = P2_5 ;
```

```
    P2_2 = P2_1 ;
```

```
    P2_5 = P2_6 ;
```

```
    P2_1 = P2_0 ;
```

```
    P2_6 = P2_7 ;
```

```
if (P2_3 == 0 && P2_2 == 0 && P2_1 == 0)
```

```
    P2_0 = 1;
```

```
else
```

```
    P2_0 = 0;
```

```
if (P2_4 == 0 && P2_5 == 0 && P2_6 == 0)
```

```
    P2_7 = 1;
```

```
else
```

```
    P2_7 = 0;
```

```
    delay(2);
```

```
goto loop1;
```

```
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else goto loop1;
}
else
if (P1_0 == 0 && P1_1 == 1 && P1_2 == 1)
{
TR0 = 1;
loop3: if (P1_1 == 0)
B = TL0;

else goto loop3;
check2: if (P1_2 == 0)
{
TR0 = 0;
D = TL0;
ts = D*0.000001;
tf = B*0.000001; }
else goto check2;

s = (v*v*ts*ts-2*v*v*tf*tf-2*d*d)/(4*v*tf-2*v*ts);
if (s > 0.3)
{
P2_3 = P2_2 ;
P2_2 = P2_1 ;
P2_1 = P2_0 ;

if (P2_3 == 0 && P2_2 == 0 && P2_1 == 0)
P2_0 = 1;
else
P2_0 = 0;
delay(2);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

goto loop1; }

else goto loop1;

}

else

if (P1_2 == 0 && P1_0 == 1 && P1_1 == 1)
{
    TR0 = 1;
loop4: if (P1_1 == 0)
    B = TL0;

else goto loop4;
check4: if (P1_0 == 0)
{
    TR0 = 0;
    D = TL0;
    ts = D*0.000001;
    tf = B*0.000001; }
else goto check4;

s = (v*v*ts*ts-2*v*v*tf*tf-2*d*d)/(4*v*tf-2*v*ts);
if (s > 0.3 )
{
    P2_4 = P2_5 ;
    P2_5 = P2_6 ;
    P2_6 = P2_7 ;

if (P2_4 == 0 && P2_5 == 0 && P2_6 == 0)
    P2_7 = 1;

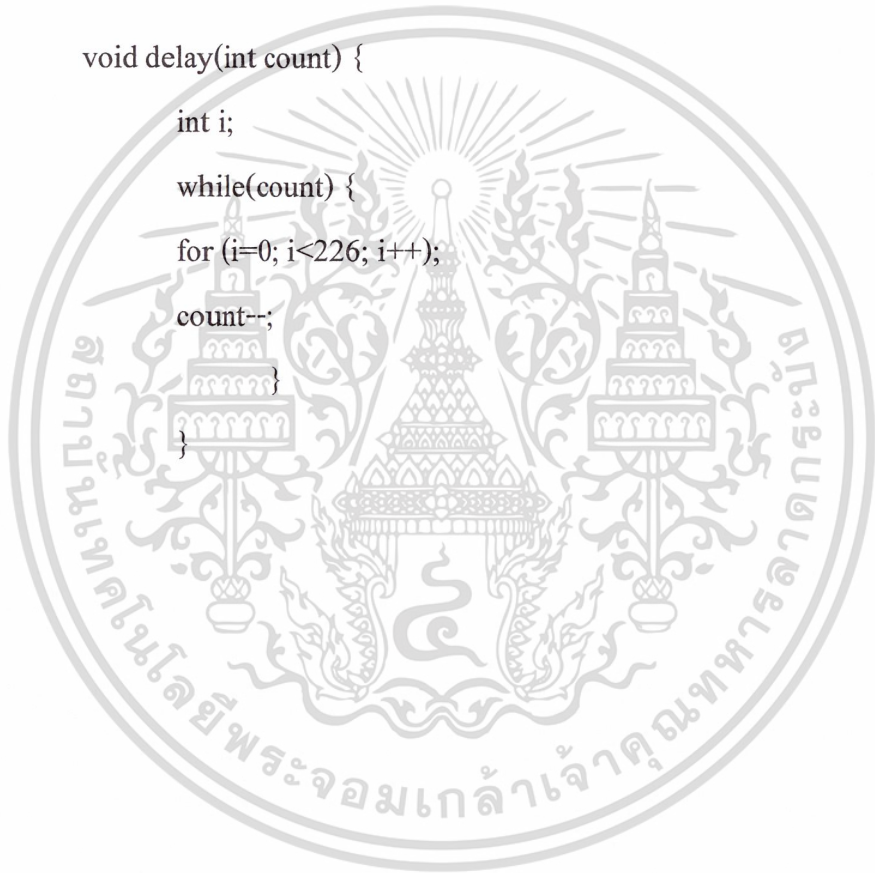
else

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        P2_7 = 0;
        delay(2);
    goto loop1; }
else    goto loop1;}
else    goto loop1;
}
```

```
void delay(int count) {
    int i;
    while(count) {
        for (i=0; i<226; i++);
        count--;
    }
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# LF353

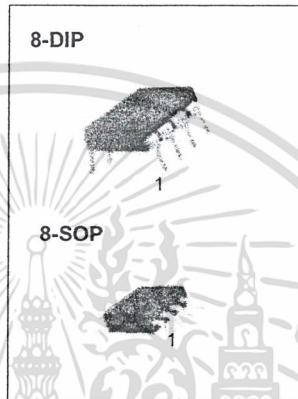
## Dual Operational Amplifier (JFET)

### Features

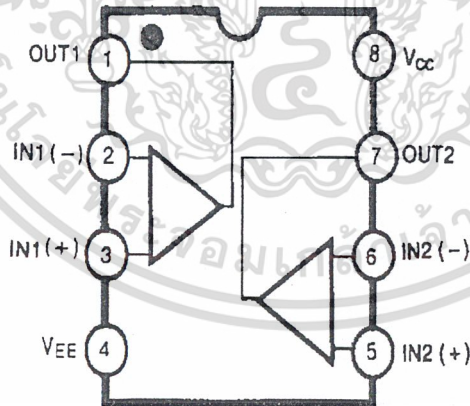
- Internally trimmed offset voltage: 10mV
- Low input bias current: 50pA
- Wide gain bandwidth: 4MHz
- High slew rate: 13V/ $\mu$ s
- High Input impedance:  $10^{12}\Omega$

### Description

The LF353 is a JFET input operational amplifier with an internally compensated input offset voltage. The JFET input device provides wide bandwidth, low input bias currents and offset currents.



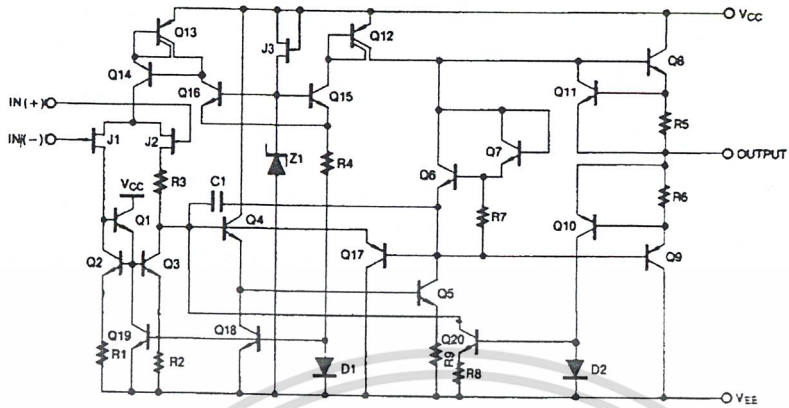
### Internal Block Diagram



Rev. 1.0.0

## Schematic Diagram

(One Section Only)



## Absolute Maximum Ratings

| Parameter                     | Symbol               | Value      | Unit |
|-------------------------------|----------------------|------------|------|
| Power Supply Voltage          | V <sub>CC</sub>      | ±18        | V    |
| Differential Input Voltage    | V <sub>I(DIFF)</sub> | 30         | V    |
| Input Voltage Range           | V <sub>I</sub>       | ±15        | V    |
| Output Short Circuit Duration | -                    | Continuous | -    |
| Power Dissipation             | PD                   | 500        | mW   |
| Operating Temperature Range   | TOPR                 | 0 ~ +70    | °C   |
| Storage Temperature Range     | TSTG                 | -65 ~ +150 | °C   |

## Electrical Characteristics

(VCC = +15V, VEE = -15V, TA = 25 °C, unless otherwise specified)

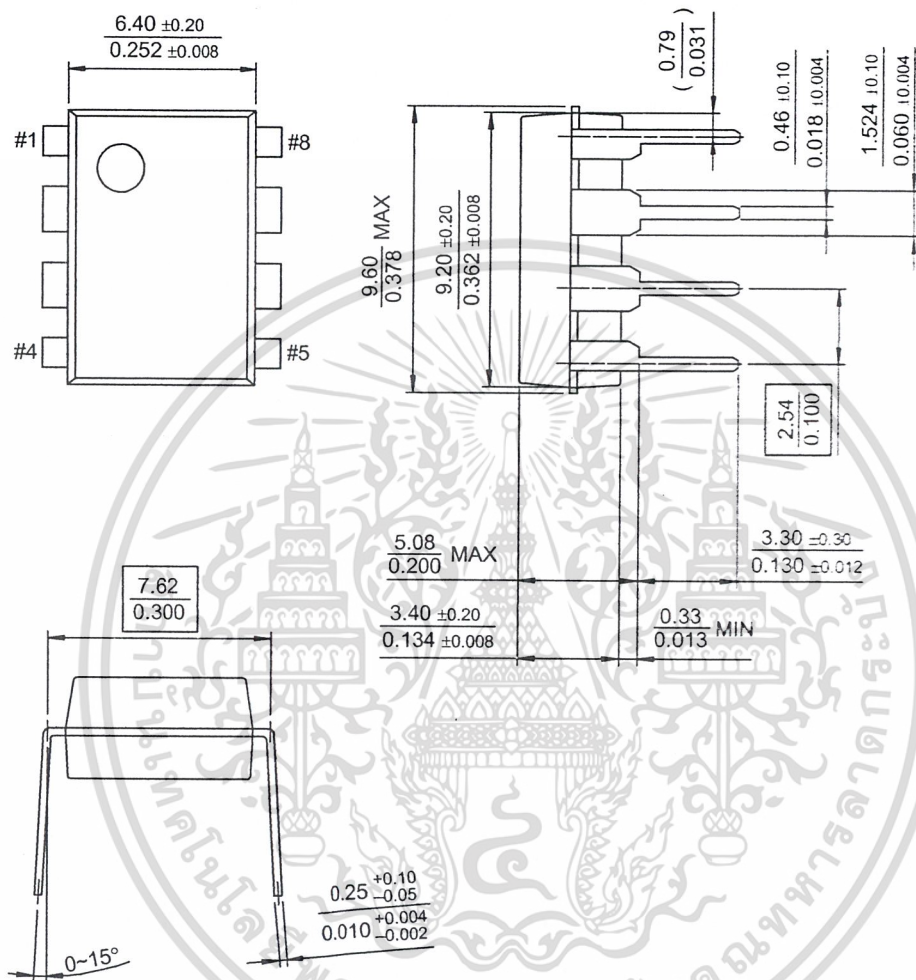
| Parameter                      | Symbol               | Conditions                            | Min.               | Typ.             | Max. | Unit       |       |
|--------------------------------|----------------------|---------------------------------------|--------------------|------------------|------|------------|-------|
| Input Offset Voltage           | V <sub>IO</sub>      | RS=10KΩ                               | -                  | 5.0              | 10   | mV         |       |
|                                |                      | 0 °C ≤ TA ≤ +70 °C                    | -                  | -                | -    | -          |       |
| Input Offset Voltage Drift     | ΔV <sub>IO</sub> /ΔT | RS=10KΩ                               | 0 °C ≤ TA ≤ +70 °C | -                | 10   | -          | μV/°C |
| Input Offset Current           | I <sub>IO</sub>      |                                       |                    | -                | 25   | 100        | pA    |
|                                |                      | 0 °C ≤ TA ≤ +70 °C                    |                    | -                | -    | 4          | nA    |
| Input Bias Current             | I <sub>BIAS</sub>    |                                       |                    | -                | 50   | 200        | pA    |
|                                |                      | 0 °C ≤ TA ≤ +70 °C                    |                    | -                | -    | 8          | nA    |
| Input Resistance               | R <sub>I</sub>       | -                                     | -                  | 10 <sup>12</sup> | -    | Ω          |       |
| Large Signal Voltage Gain      | G <sub>V</sub>       | V <sub>O</sub> (P-P) = ±10V           |                    | 25               | 100  | -          | V/mV  |
|                                |                      | R <sub>L</sub> = 2KΩ                  | 0 °C ≤ TA ≤ +70 °C | 15               | -    | -          | -     |
| Output Voltage Swing           | V <sub>O</sub> (P-P) | R <sub>L</sub> = 10KΩ                 | ±12                | ±13.5            | -    | V          |       |
| Input Voltage Range            | V <sub>I</sub> (R)   | -                                     | ±11                | ±15/-12          | -    | V          |       |
| Common Mode Rejection Ratio    | CMRR                 | R <sub>S</sub> ≤ 10KΩ                 | 70                 | 100              | -    | dB         |       |
| Power Supply Rejection Ratio   | PSRR                 | R <sub>S</sub> ≤ 10KΩ                 | 70                 | 100              | -    | dB         |       |
| Power Supply Current           | I <sub>CC</sub>      | -                                     | -                  | 3.6              | 6.5  | mA         |       |
| Slew Rate                      | SR                   | G <sub>V</sub> = 1                    | -                  | 13               | -    | V/μS       |       |
| Gain-Bandwidth Product         | GBW                  | -                                     | -                  | 4                | -    | MHz        |       |
| Channel Separation             | CS                   | f = 1Hz ~ 20KHz<br>(Input referenced) | -                  | 120              | -    | dB         |       |
| Equivalent Input Noise Voltage | V <sub>NI</sub>      | R <sub>S</sub> = 100Ω<br>f = 1KHz     | -                  | 16               | -    | nV/<br>√Hz |       |
| Equivalent Input Noise Current | I <sub>NI</sub>      | f = 1KHz                              | -                  | 0.01             | -    | pA/<br>√Hz |       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Mechanical Dimensions

## Package

### 8-DIP

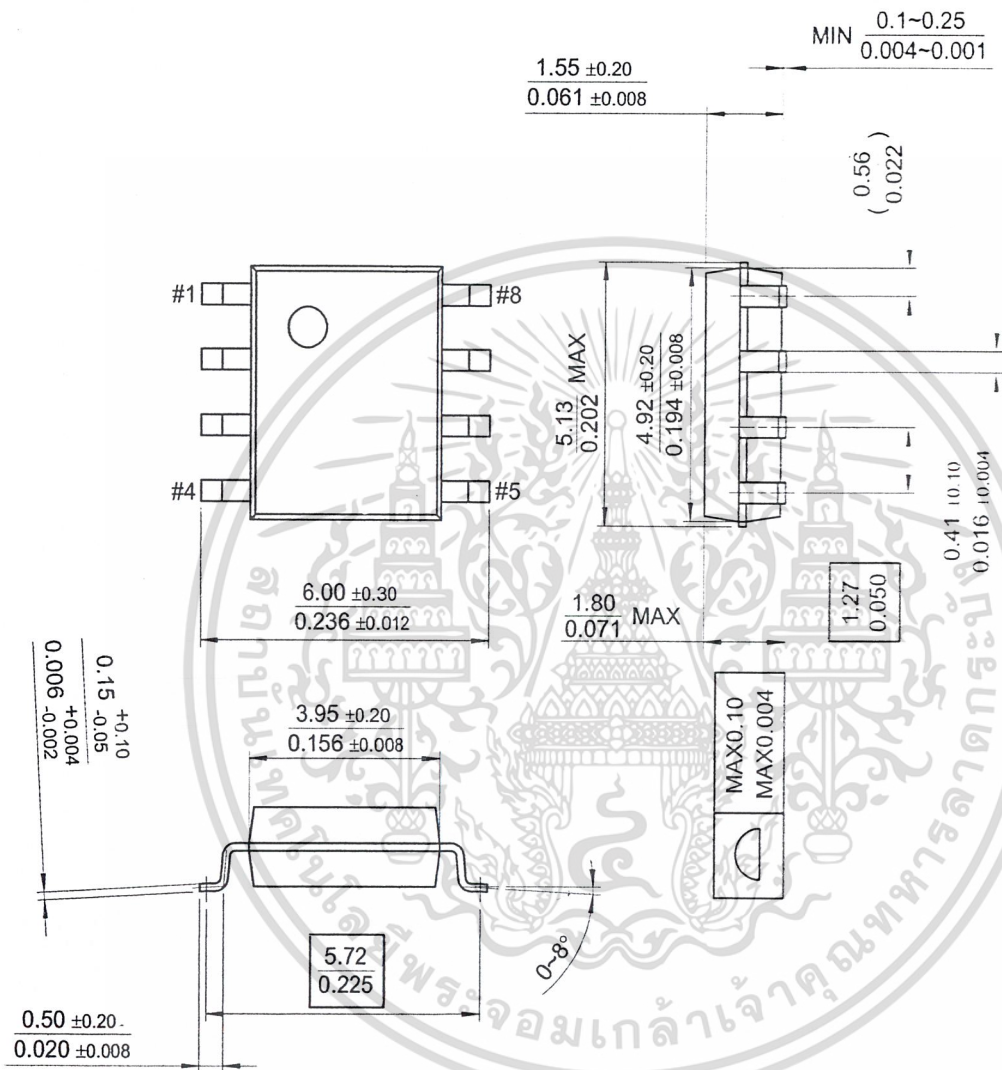


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Mechanical Dimensions

## Package

### 8-SOP



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Ordering Information

| Product Number | Package | Operating Temperature |
|----------------|---------|-----------------------|
| LF353N         | 8-DIP   | 0 ~ + 70°C            |
| LF353M         | 8-SOP   |                       |



### DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

### LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury of the user.
2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

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

6/1/01 0.0m 001  
Stock#DSxxxxxxx

© 2001 Fairchild Semiconductor Corporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# LM193/LM293/LM393/LM2903

## Low Power Low Offset Voltage Dual Comparators

### General Description

The LM193 series consists of two independent precision voltage comparators with an offset voltage specification as low as 2.0 mV max for two comparators which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage. These comparators also have a unique characteristic in that the input common-mode voltage range includes ground, even though operated from a single power supply voltage.

Application areas include limit comparators, simple analog to digital converters; pulse, squarewave and time delay generators; wide range VCO; MOS clock timers; multivibrators and high voltage digital logic gates. The LM193 series was designed to directly interface with TTL and CMOS. When operated from both plus and minus power supplies, the LM193 series will directly interface with MOS logic where their low power drain is a distinct advantage over standard comparators.

### Advantages

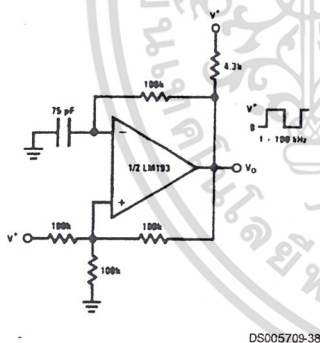
- High precision comparators

- Reduced  $V_{OS}$  drift over temperature
- Eliminates need for dual supplies
- Allows sensing near ground
- Compatible with all forms of logic
- Power drain suitable for battery operation

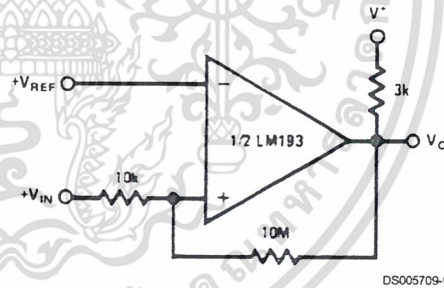
### Features

- Wide supply
  - Voltage range: 2.0V to 36V
  - single or dual supplies:  $\pm 1.0V$  to  $\pm 18V$
- Very low supply current drain (0.4 mA) — independent of supply voltage
- Low input biasing current: 25 nA
- Low input offset current:  $\pm 5$  nA
- Maximum offset voltage:  $\pm 3$  mV
- Input common-mode voltage range includes ground
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Low output saturation voltage.: 250 mV at 4 mA
- Output voltage compatible with TTL, DTL, ECL, MOS and CMOS logic systems

Squarewave Oscillator



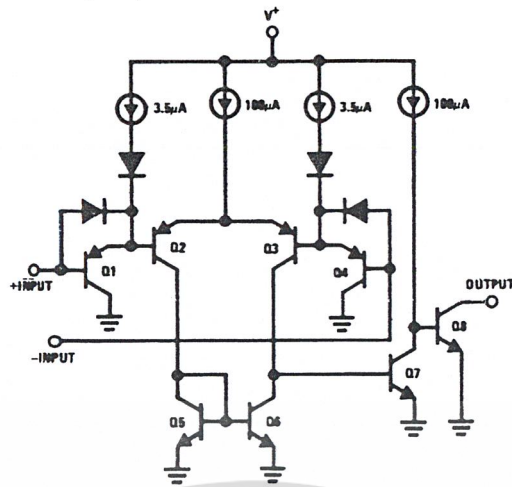
Non-Inverting Comparator with Hysteresis



LM193/LM293/LM393/LM2903 Low Power Low Offset Voltage Dual Comparators

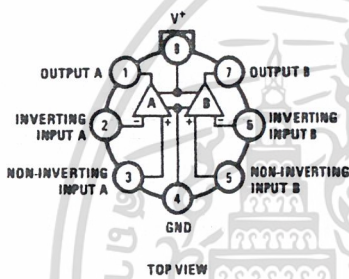
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Schematic and Connection Diagrams



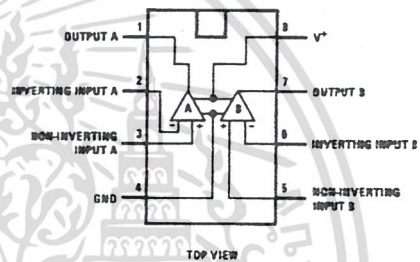
DS005709-2

Metal Can Package



DS005709-3

Dual-In-Line Package



DS005709-1

Order Number LM193H \*  
 LM193H/883, LM193AH-QMLV \*\*  
 LM193AH, LM193AH/883,  
 LM293H or LM393H  
 See NS Package Number H08C

Order Number LM193J/883 \*  
 LM193AJ/883, LM193AJ-QMLV \*\*  
 LM393M, LM393MX, LM2903M,  
 LM2903MX, LM393N or LM2903N  
 See NS Package Number J08A,  
 M08A or N08E

Note: \* Also available per JM38510/11202

Note: \*\* See STD Mil DWG 5962-94526

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Absolute Maximum Ratings** (Note 10)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

|   |                |
|---|----------------|
| Supply Voltage, $V^*$                       | 36V            |
| Differential Input Voltage (Note 8)         | 36V            |
| Input Voltage                               | -0.3V to +36V  |
| Input Current ( $V_{IN} < -0.3V$ ) (Note 3) | 50 mA          |
| Power Dissipation (Note 1)                  |                |
| Molded DIP                                  | 780 mW         |
| Metal Can                                   | 660 mW         |
| Small Outline Package                       | 510 mW         |
| Output Short-Circuit to Ground (Note 2)     | Continuous     |
| Operating Temperature Range                 |                |
| LM393/LM393A                                | 0°C to +70°C   |
| LM293/LM293A                                | -25°C to +85°C |

|   |                 |
|---|-----------------|
| LM193/LM193A  | -55°C to +125°C |
| LM2903  | -40°C to +85°C  |
| Storage Temperature Range   | -65°C to +150°C |
| Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)  | +260°C          |
| Soldering Information   |                 |
| Dual-In-Line Package  |                 |
| Soldering (10 seconds)  | 260°C           |
| Small Outline Package   | 215°C           |
| Vapor Phase (60 seconds)  |                 |
| Infrared (15 seconds)   | 220°C           |
| See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices. |                 |
| ESD rating  |                 |
| (1.5 k $\Omega$ in series with 100 pF)  | 1300V           |

**Electrical Characteristics**(V\* = 5V, T<sub>A</sub> = 25°C, unless otherwise stated)

| Parameter                       | Conditions  | LM193A      |     |             | LM293A, LM393A |     |             | Units   |
|---------------------------------|---|-------------|-----|-------------|----------------|-----|-------------|---------|
|                                 |   | Min         | Typ | Max         | Min            | Typ | Max         |         |
| Input Offset Voltage            | (Note 9)  |             | 1.0 | 2.0         |                | 1.0 | 2.0         | mV      |
| Input Bias Current              | $I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$ with Output In Linear Range, $V_{CM} = 0V$ (Note 5)      |             | 25  | 100         |                | 25  | 250         | nA      |
| Input Offset Current            | $I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$ $V_{CM} = 0V$   |             | 3.0 | 25          |                | 5.0 | 50          | nA      |
| Input Common Mode Voltage Range | $V^+ = 30V$ (Note 6)  | 0           |     | $V^+ - 1.5$ | 0              |     | $V^+ - 1.5$ | V       |
| Supply Current                  | $R_L = \infty$  | $V^+ = 5V$  | 0.4 | 1           | 0.4            | 1   |             | mA      |
|                                 |   | $V^+ = 36V$ | 1   | 2.5         | 1              | 2.5 |             | mA      |
| Voltage Gain                    | $R_L \geq 15 k\Omega$ , $V^+ = 15V$<br>$V_O = 1V$ to 11V                            | 50          | 200 |             | 50             | 200 |             | V/mV    |
| Large Signal Response Time      | $V_{IN} = TTL$ Logic Swing, $V_{REF} = 1.4V$<br>$V_{RL} = 5V$ , $R_L = 5.1 k\Omega$ |             | 300 |             |                | 300 |             | ns      |
| Response Time                   | $V_{RL} = 5V$ , $R_L = 5.1 k\Omega$ (Note 7)  |             | 1.3 |             |                | 1.3 |             | $\mu s$ |
| Output Sink Current             | $V_{IN(-)} = 1V$ , $V_{IN(+)} = 0$ , $V_O \approx 1.5V$                             | 6.0         | 16  |             | 6.0            | 16  |             | mA      |
| Saturation Voltage              | $V_{IN(-)} = 1V$ , $V_{IN(+)} = 0$ , $I_{SINK} \leq 4 mA$                           | 250         | 400 |             | 250            | 400 |             | mV      |
| Output Leakage Current          | $V_{IN(-)} = 0$ , $V_{IN(+)} = 1V$ , $V_O = 5V$                                     | 0.1         |     |             | 0.1            |     |             | nA      |

**Electrical Characteristics**(V\* = 5V, T<sub>A</sub> = 25°C, unless otherwise stated)

| Parameter                       | Conditions   | LM193       |     |             | LM293, LM393 |     |             | LM2903 |     |             | Units |
|---------------------------------|--|-------------|-----|-------------|--------------|-----|-------------|--------|-----|-------------|-------|
|                                 |  | Min         | Typ | Max         | Min          | Typ | Max         | Min    | Typ | Max         |       |
| Input Offset Voltage            | (Note 9)   |             | 1.0 | 5.0         |              | 1.0 | 5.0         |        | 2.0 | 7.0         | mV    |
| Input Bias Current              | $I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$ with Output In Linear Range, $V_{CM} = 0V$ (Note 5) |             | 25  | 100         |              | 25  | 250         |        | 25  | 250         | nA    |
| Input Offset Current            | $I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$ $V_{CM} = 0V$  |             | 3.0 | 25          |              | 5.0 | 50          |        | 5.0 | 50          | nA    |
| Input Common Mode Voltage Range | $V^+ = 30V$ (Note 6)   | 0           |     | $V^+ - 1.5$ | 0            |     | $V^+ - 1.5$ | 0      |     | $V^+ - 1.5$ | V     |
| Supply Current                  | $R_L = \infty$   | $V^+ = 5V$  | 0.4 | 1           | 0.4          | 1   | 0.4         | 1.0    |     |             | mA    |
|                                 |  | $V^+ = 36V$ | 1   | 2.5         | 1            | 2.5 | 1           | 2.5    |     |             | mA    |

**Electrical Characteristics** (Continued)(V<sup>+</sup>=5V, T<sub>A</sub> = 25°C, unless otherwise stated)

| Parameter                  | Conditions  | LM193 |     | LM293, LM393 |     | LM2903 |     | Units |     |     |      |
|----------------------------|---|-------|-----|--------------|-----|--------|-----|-------|-----|-----|------|
|                            |   | Min   | Typ | Max          | Min | Typ    | Max |       | Min | Typ | Max  |
| Voltage Gain               | R <sub>L</sub> ≥ 15 kΩ, V <sup>+</sup> = 15V<br>V <sub>O</sub> = 1V to 11V                                  | 50    | 200 |              | 50  | 200    |     | 25    | 100 |     | V/mV |
| Large Signal Response Time | V <sub>IN</sub> = TTL Logic Swing, V <sub>REF</sub> = 1.4V<br>V <sub>RL</sub> = 5V, R <sub>L</sub> = 5.1 kΩ | 300   |     | 300          |     | 300    |     | 300   |     |     | ns   |
| Response Time              | V <sub>RL</sub> = 5V, R <sub>L</sub> = 5.1 kΩ (Note 7)  | 1.3   |     | 1.3          |     | 1.5    |     | 1.5   |     |     | μs   |
| Output Sink Current        | V <sub>IN</sub> (-) = 1V, V <sub>IN</sub> (+) = 0, V <sub>O</sub> ≤ 1.5V                                    | 6.0   | 16  |              | 6.0 | 16     |     | 6.0   | 16  |     | mA   |
| Saturation Voltage         | V <sub>IN</sub> (-) = 1V, V <sub>IN</sub> (+) = 0, I <sub>SINK</sub> ≤ 4 mA                                 | 250   | 400 |              | 250 | 400    |     | 250   | 400 |     | mV   |
| Output Leakage Current     | V <sub>IN</sub> (-) = 0, V <sub>IN</sub> (+) = 1V, V <sub>O</sub> = 5V                                      | 0.1   |     | 0.1          |     | 0.1    |     | 0.1   |     |     | nA   |

**Electrical Characteristics**(V<sup>+</sup> = 5V) (Note 4)

| Parameter                       | Conditions   | LM193A |     |                      | Units |
|---------------------------------|--|--------|-----|----------------------|-------|
|                                 |  | Min    | Typ | Max                  |       |
| Input Offset Voltage            | (Note 9)   | 4.0    |     |                      | mV    |
| Input Offset Current            | I <sub>IN(+)</sub> - I <sub>IN(-)</sub> , V <sub>CM</sub> = 0V   | 100    |     |                      | nA    |
| Input Bias Current              | I <sub>IN(+)</sub> or I <sub>IN(-)</sub> with Output in Linear Range,<br>V <sub>CM</sub> = 0V (Note 5) | 300    |     |                      | nA    |
| Input Common Mode Voltage Range | V <sup>+</sup> = 30V (Note 6)  | 0      |     | V <sup>-</sup> - 2.0 | V     |
| Saturation Voltage              | V <sub>IN</sub> (-) = 1V, V <sub>IN</sub> (+) = 0, I <sub>SINK</sub> ≤ 4 mA                            | 700    |     |                      | mV    |
| Output Leakage Current          | V <sub>IN</sub> (-) = 0, V <sub>IN</sub> (+) = 1V, V <sub>O</sub> = 30V                                | 1.0    |     |                      | μA    |
| Differential Input Voltage      | Keep All V <sub>IN</sub> 's ≥ 0V (or V <sup>-</sup> , if Used), (Note 8)                               | 36     |     |                      | V     |

**Electrical Characteristics**(V<sup>+</sup> = 5V) (Note 4)

| Parameter                       | Conditions  | LM193 |                      | LM293, LM393 |                      | LM2903 |                      | Units |
|---------------------------------|---|-------|----------------------|--------------|----------------------|--------|----------------------|-------|
|                                 |   | Min   | Typ                  | Max          | Min                  | Typ    | Max                  |       |
| Input Offset Voltage            | (Note 9)  | 9     |                      | 9            |                      | 9      | 15                   | mV    |
| Input Offset Current            | I <sub>IN(+)</sub> - I <sub>IN(-)</sub> , V <sub>CM</sub> = 0V                                      | 100   |                      | 150          |                      | 50     | 200                  | nA    |
| Input Bias Current              | I <sub>IN(+)</sub> or I <sub>IN(-)</sub> with Output in Linear Range, V <sub>CM</sub> = 0V (Note 5) | 300   |                      | 400          |                      | 200    | 500                  | nA    |
| Input Common Mode Voltage Range | V <sup>+</sup> = 30V (Note 6)   | 0     | V <sup>+</sup> - 2.0 | 0            | V <sup>-</sup> - 2.0 | 0      | V <sup>-</sup> - 2.0 | V     |
| Saturation Voltage              | V <sub>IN</sub> (-) = 1V, V <sub>IN</sub> (+) = 0, I <sub>SINK</sub> ≤ 4 mA                         | 700   |                      | 700          |                      | 400    | 700                  | mV    |
| Output Leakage Current          | V <sub>IN</sub> (-) = 0, V <sub>IN</sub> (+) = 1V, V <sub>O</sub> = 30V                             | 1.0   |                      | 1.0          |                      | 1.0    |                      | μA    |
| Differential Input Voltage      | Keep All V <sub>IN</sub> 's ≥ 0V (or V <sup>-</sup> , if Used), (Note 8)                            | 36    |                      | 36           |                      | 36     |                      | V     |

**Note 1:** For operating at high temperatures, the LM393/LM393A and LM2903 must be derated based on a 125°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 170°C/W which applies for the device soldered in a printed circuit board, operating in a still air ambient. The LM193/LM193A, LM293/LM293A must be derated based on a 150°C maximum junction temperature. The low bias dissipation and the "ON-OFF" characteristic of the outputs keeps the chip dissipation very small (P<sub>D</sub> ≤ 100 mW), provided the output transistors are allowed to saturate.

**Note 2:** Short circuits from the output to V<sup>+</sup> can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 20 mA independent of the magnitude of V<sup>+</sup>.

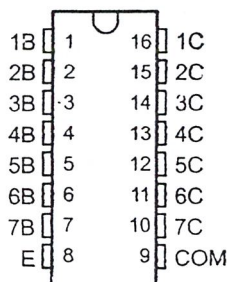
**Note 3:** This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral NPN parasitic transistor action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the comparators to go to the V<sup>-</sup> voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative. This is not destructive and normal output states will re-establish when the input voltage, which was negative, again returns to a value greater than -0.3V.

**Note 4:** These specifications are limited to -55°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ 125°C, for the LM193/LM193A. With the LM293/LM293A all temperature specifications are limited to -25°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ 85°C and the LM393/LM393A temperature specifications are limited to 0°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ 70°C. The LM2903 is limited to -40°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ 85°C.

## HIGH-VOLTAGE HIGH-CURRENT DARLINGTON TRANSISTOR ARRAYS

- 500-mA Rated Collector Current (Single Output)
- High-Voltage Outputs . . . 50 V
- Output Clamp Diodes
- Inputs Compatible With Various Types of Logic
- Relay Driver Applications
- Designed to Be Interchangeable With Sprague ULN2001A Series

D OR N PACKAGE  
(TOP VIEW)

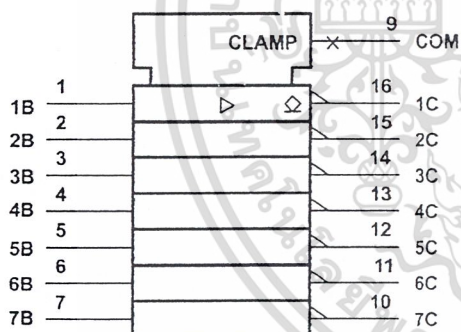


### description

The ULN2001A, ULN2002A, ULN2003A, and ULN2004A are monolithic high-voltage, high-current Darlington transistor arrays. Each consists of seven npn Darlington pairs that feature high-voltage outputs with common-cathode clamp diodes for switching inductive loads. The collector-current rating of a single Darlington pair is 500 mA. The Darlington pairs may be paralleled for higher current capability. Applications include relay drivers, hammer drivers, lamp drivers, display drivers (LED and gas discharge), line drivers, and logic buffers. For 100-V (otherwise interchangeable) versions, see the SN75465 through SN75469.

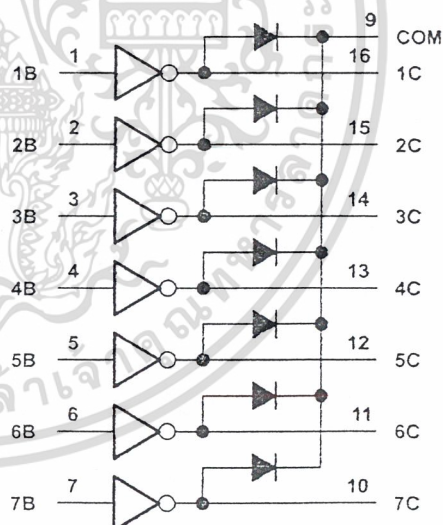
The ULN2001A is a general-purpose array and can be used with TTL and CMOS technologies. The ULN2002A is specifically designed for use with 14- to 25-V PMOS devices. Each input of this device has a zener diode and resistor in series to control the input current to a safe limit. The ULN2003A has a 2.7-k $\Omega$  series base resistor for operation directly with TTL or 5-V CMOS devices. The ULN2004A has a 10.5-k $\Omega$  series base resistor to allow its operation directly from CMOS devices that use supply voltages of 6 to 15 V. The required input current of the ULN2004A is below that of the ULN2003A, and the required voltage is less than that required by the ULN2002A.

### logic symbol†



† This symbol is in accordance with ANSI/IEEE Std 91-1984 and IEC Publication 617-12.

### logic diagram



PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

 **TEXAS  
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

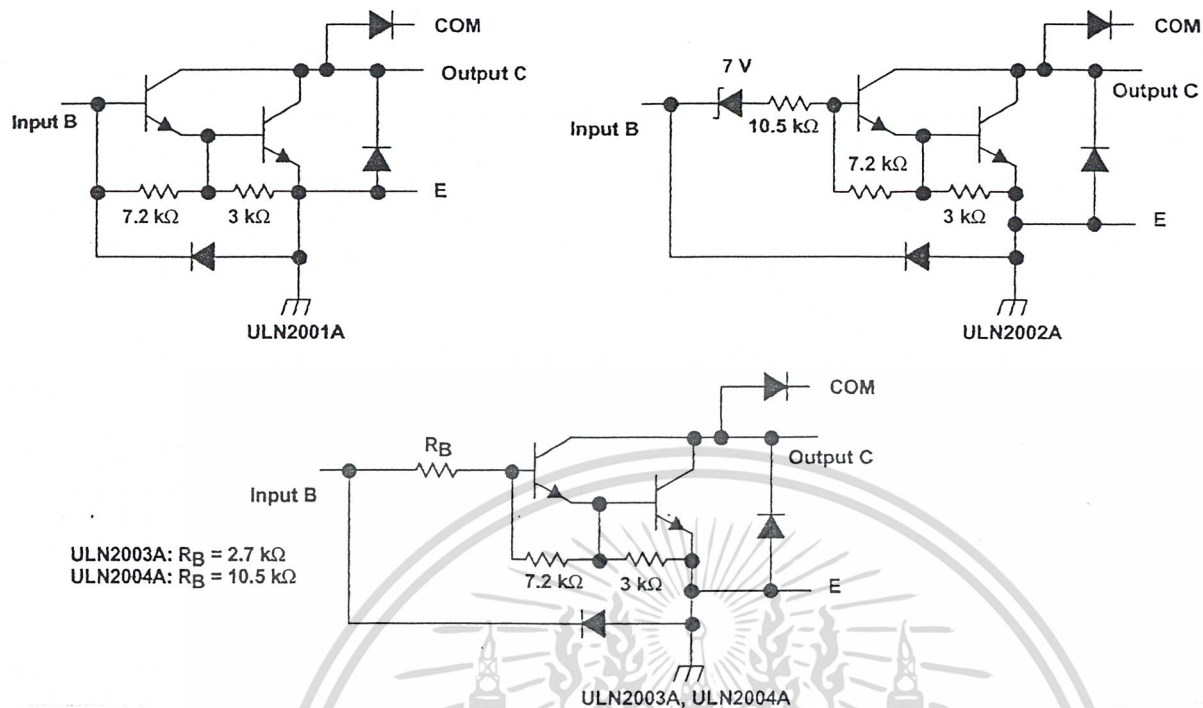
Copyright © 1993, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ULN2001A, ULN2002A, ULN2003A, ULN2004A DARLINGTON TRANSISTOR ARRAYS

SLRS027 – DECEMBER 1976 – REVISED APRIL 1993

## schematics (each Darlington pair)



All resistor values shown are nominal.

## absolute maximum ratings at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)

|  |                              |
|--|------------------------------|
| Collector-emitter voltage                                    | 50 V                         |
| Input voltage, $V_I$ (see Note 1)                            | 30 V                         |
| Peak collector current (see Figures 14 and 15)               | 500 mA                       |
| Output clamp current, $I_{OK}$                               | 500 mA                       |
| Total emitter-terminal current                               | -2.5 A                       |
| Continuous total power dissipation                           | See Dissipation Rating Table |
| Operating free-air temperature range, $T_A$                  | -20°C to 85°C                |
| Storage temperature range, $T_{stg}$                         | -65°C to 150°C               |
| Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds | 260°C                        |

NOTE 1: All voltage values are with respect to the emitter/substrate terminal E, unless otherwise noted.

DISSIPATION RATING TABLE

| PACKAGE | $T_A = 25^\circ\text{C}$<br>POWER RATING | DERATING FACTOR<br>ABOVE $T_A = 25^\circ\text{C}$ | $T_A = 85^\circ\text{C}$<br>POWER RATING |
|---------|--|---|--|
| D       | 950 mW                                   | 7.6 mW/°C   | 494 mW                                   |
| N       | 1150 mW                                  | 9.2 mW/°C   | 598 mW                                   |

 **TEXAS  
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ULN2001A, ULN2002A, ULN2003A, ULN2004A DARLINGTON TRANSISTOR ARRAYS

SLRS027 – DECEMBER 1976 – REVISED APRIL 1993

## electrical characteristics, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

| PARAMETER  | TEST FIGURE | TEST CONDITIONS  | ULN2001A |     |     | ULN2002A |      |      | UNIT          |
|--|-------------|--|----------|-----|-----|----------|------|------|---------------|
|  |             |  | MIN      | TYP | MAX | MIN      | TYP  | MAX  |               |
| $V_{I(on)}$ On-state input voltage                 | 6           | $V_{CE} = 2\text{ V}$ , $I_C = 300\text{ mA}$                                |          |     |     |          |      | 13   | V             |
| $V_{CE(sat)}$ Collector-emitter saturation voltage | 5           | $I_I = 250\ \mu\text{A}$ , $I_C = 100\text{ mA}$                             |          | 0.9 | 1.1 |          | 0.9  | 1.1  | V             |
|  |             | $I_I = 350\ \mu\text{A}$ , $I_C = 200\text{ mA}$                             |          | 1   | 1.3 |          | 1    | 1.3  |               |
|  |             | $I_I = 500\ \mu\text{A}$ , $I_C = 350\text{ mA}$                             |          | 1.2 | 1.6 |          | 1.2  | 1.6  |               |
| $V_F$ Clamp forward voltage                        | 8           | $I_F = 350\text{ mA}$  |          | 1.7 | 2   |          | 1.7  | 2    | V             |
| $I_{CEX}$ Collector cutoff current                 | 1           | $V_{CE} = 50\text{ V}$ , $I_I = 0$   |          |     | 50  |          |      | 50   | $\mu\text{A}$ |
|  | 2           | $V_{CE} = 50\text{ V}$ , $T_A = 70^\circ\text{C}$ , $V_I = 6\text{ V}$       |          |     | 100 |          |      | 100  |               |
| $I_{I(off)}$ Off-state input current               | 3           | $V_{CE} = 50\text{ V}$ , $T_A = 70^\circ\text{C}$ , $I_C = 500\ \mu\text{A}$ | 50       | 65  |     | 50       | 65   |      | $\mu\text{A}$ |
| $I_I$ Input current                                | 4           | $V_I = 17\text{ V}$  |          |     |     |          | 0.82 | 1.25 | mA            |
| $I_R$ Clamp reverse current                        | 7           | $V_R = 50\text{ V}$ , $T_A = 70^\circ\text{C}$                               |          |     | 100 |          |      | 100  | $\mu\text{A}$ |
|  |             | $V_R = 50\text{ V}$  |          |     | 50  |          |      | 50   |               |
| $h_{FE}$ Static forward current transfer ratio     | 5           | $V_{CE} = 2\text{ V}$ , $I_C = 350\text{ mA}$                                | 1000     |     |     |          |      |      |               |
| $C_i$ Input capacitance                            |             | $V_I = 0$ , $f = 1\text{ MHz}$   |          | 15  | 25  |          | 15   | 25   | pF            |

## electrical characteristics, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

| PARAMETER  | TEST FIGURE | TEST CONDITIONS  | ULN2003A              |      |      | ULN2004A |      |     | UNIT          |   |
|--|-------------|--|-----------------------|------|------|----------|------|-----|---------------|---|
|  |             |  | MIN                   | TYP  | MAX  | MIN      | TYP  | MAX |               |   |
| $V_{I(on)}$ On-state input voltage                 | 6           | $V_{CE} = 2\text{ V}$  | $I_C = 125\text{ mA}$ |      |      |          |      |     | 5             | V |
|  |             |  | $I_C = 200\text{ mA}$ |      |      | 2.4      |      |     | 6             |   |
|  |             |  | $I_C = 250\text{ mA}$ |      |      | 2.7      |      |     | 7             |   |
|  |             |  | $I_C = 275\text{ mA}$ |      |      | 3        |      |     | 8             |   |
|  |             |  | $I_C = 300\text{ mA}$ |      |      | 3        |      |     |               |   |
|  |             |  | $I_C = 350\text{ mA}$ |      |      |          |      |     |               |   |
| $V_{CE(sat)}$ Collector-emitter saturation voltage | 5           | $I_I = 250\ \mu\text{A}$ , $I_C = 100\text{ mA}$                             |                       | 0.9  | 1.1  |          | 0.9  | 1.1 | V             |   |
|  |             | $I_I = 350\ \mu\text{A}$ , $I_C = 200\text{ mA}$                             |                       | 1    | 1.3  |          | 1    | 1.3 |               |   |
|  |             | $I_I = 500\ \mu\text{A}$ , $I_C = 350\text{ mA}$                             |                       | 1.2  | 1.6  |          | 1.2  | 1.6 |               |   |
| $I_{CEX}$ Collector cutoff current                 | 1           | $V_{CE} = 50\text{ V}$ , $I_I = 0$   |                       |      | 50   |          |      | 50  | $\mu\text{A}$ |   |
|  | 2           | $V_{CE} = 50\text{ V}$ , $T_A = 70^\circ\text{C}$ , $V_I = 1\text{ V}$       |                       |      | 100  |          |      | 100 |               |   |
| $V_F$ Clamp forward voltage                        | 8           | $I_F = 350\text{ mA}$  |                       | 1.7  | 2    |          | 1.7  | 2   | V             |   |
| $I_{I(off)}$ Off-state input current               | 3           | $V_{CE} = 50\text{ V}$ , $T_A = 70^\circ\text{C}$ , $I_C = 500\ \mu\text{A}$ | 50                    | 65   |      | 50       | 65   |     | $\mu\text{A}$ |   |
| $I_I$ Input current                                | 4           | $V_I = 3.85\text{ V}$  |                       | 0.93 | 1.35 |          |      |     | mA            |   |
|  |             | $V_I = 5\text{ V}$   |                       |      |      | 0.35     | 0.5  |     |               |   |
|  |             | $V_I = 12\text{ V}$  |                       |      |      | 1        | 1.45 |     |               |   |
| $I_R$ Clamp reverse current                        | 7           | $V_R = 50\text{ V}$  |                       |      | 50   |          |      | 50  | $\mu\text{A}$ |   |
|  |             | $V_R = 50\text{ V}$ , $T_A = 70^\circ\text{C}$                               |                       |      | 100  |          |      | 100 |               |   |
| $C_i$ Input capacitance                            |             | $V_I = 0$ , $f = 1\text{ MHz}$   |                       | 15   | 25   |          | 15   | 25  | pF            |   |



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ULN2001A, ULN2002A, ULN2003A, ULN2004A DARLINGTON TRANSISTOR ARRAYS

SLRS027 - DECEMBER 1976 - REVISED APRIL 1993

switching characteristics,  $T_A = 25^\circ\text{C}$

| PARAMETER  | TEST CONDITIONS  | MIN        | TYP  | MAX | UNIT          |
|--|--|------------|------|-----|---------------|
| $t_{PLH}$ Propagation delay time, low-to-high-level output | See Figure 9   |            | 0.25 | 1   | $\mu\text{s}$ |
| $t_{PHL}$ Propagation delay time, high-to-low-level output |  |            | 0.25 | 1   | $\mu\text{s}$ |
| $V_{OH}$ High-level output voltage after switching         | $V_S = 50\text{ V}$ ,<br>See Figure 10 $I_O \approx 300\text{ mA}$ , | $V_S - 20$ |      |     | mV            |

## PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

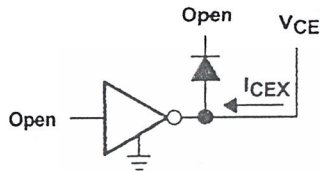


Figure 1.  $I_{CEX}$  Test Circuit

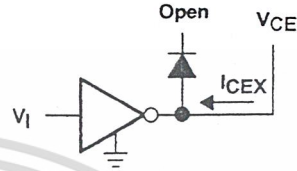


Figure 2.  $I_{CEX}$  Test Circuit

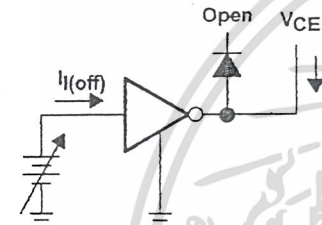


Figure 3.  $I_{I(off)}$  Test Circuit

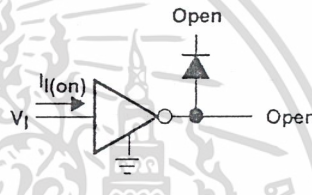
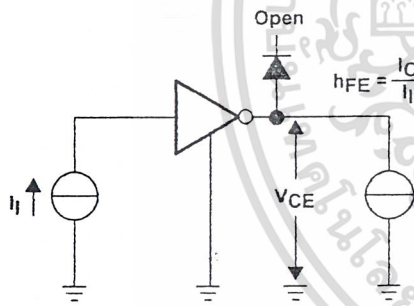


Figure 4.  $I_I$  Test Circuit



NOTE:  $I_I$  is fixed for measuring  $V_{CE(sat)}$ , variable for measuring  $h_{FE}$ .

Figure 5.  $h_{FE}$ ,  $V_{CE(sat)}$  Test Circuit

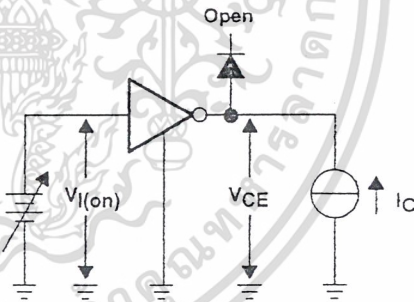


Figure 6.  $V_{I(on)}$  Test Circuit

**TEXAS  
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

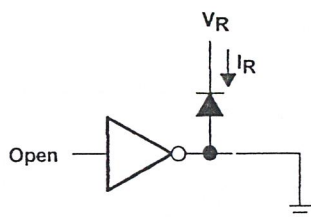


Figure 7.  $I_R$  Test Circuit

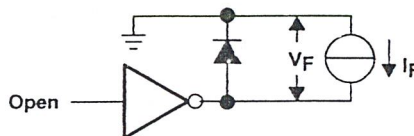
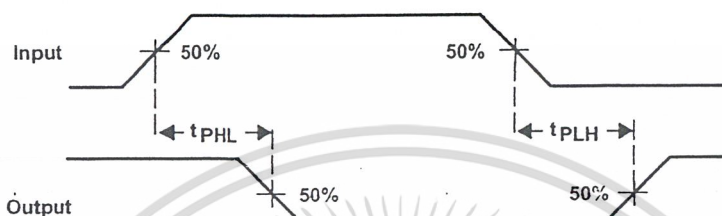
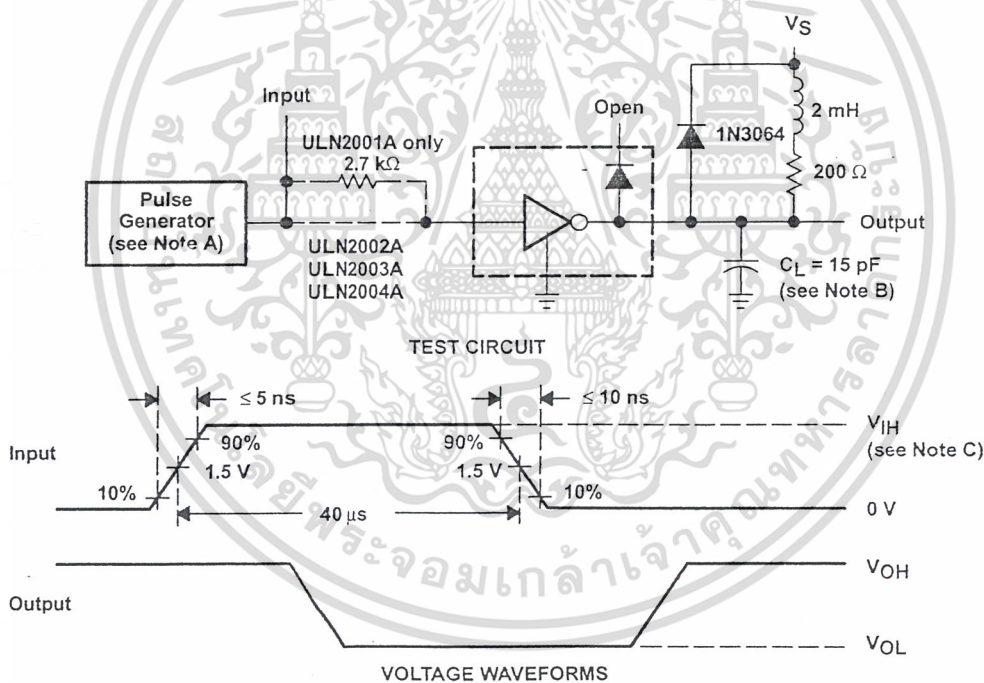


Figure 8.  $V_F$  Test Circuit



VOLTAGE WAVEFORMS

Figure 9. Propagation Delay Time Waveforms



VOLTAGE WAVEFORMS

- NOTES: A. The pulse generator has the following characteristics: PRR = 12.5 kHz,  $Z_O = 50 \Omega$ .  
 B.  $C_L$  includes probe and jig capacitance.  
 C. For testing the ULN2001A and the ULN2003A,  $V_{IH} = 3 \text{ V}$ ; for the ULN2002A,  $V_{IH} = 13 \text{ V}$ ; for the ULN2004A,  $V_{IH} = 8 \text{ V}$ .

Figure 10. Latch-Up Test Circuit and Voltage Waveforms



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TYPICAL CHARACTERISTICS**

**COLLECTOR-EMITTER SATURATION VOLTAGE  
 VS  
 COLLECTOR CURRENT  
 (ONE DARLINGTON)**

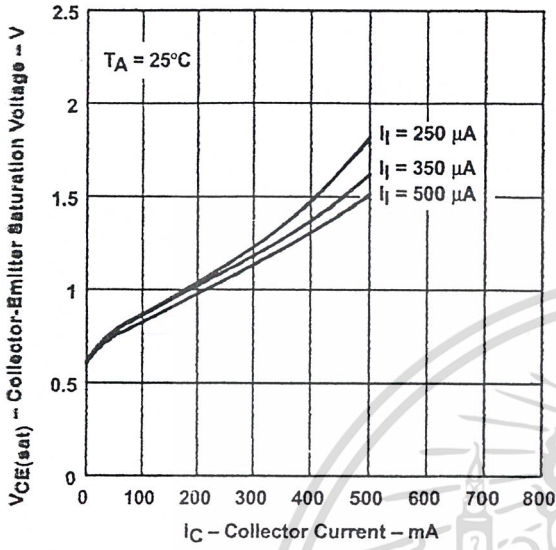


Figure 11

**COLLECTOR-EMITTER SATURATION VOLTAGE  
 VS  
 TOTAL COLLECTOR CURRENT  
 (TWO DARLINGTONS PARALLELED)**

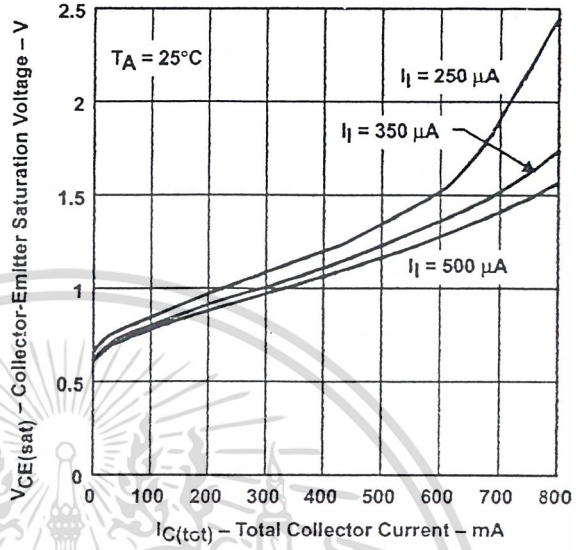


Figure 12

**COLLECTOR CURRENT  
 VS  
 INPUT CURRENT**

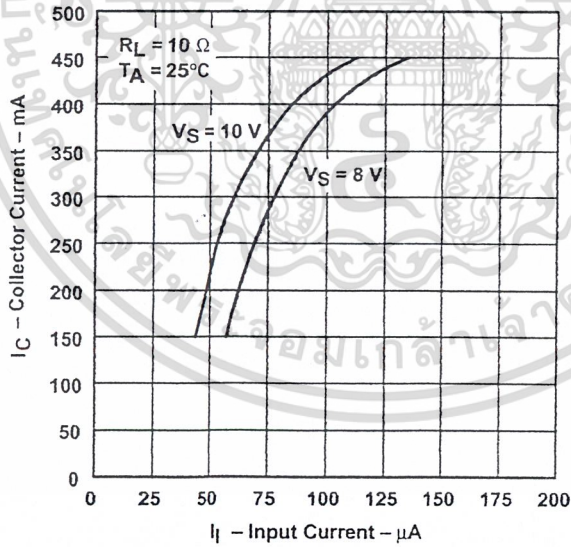


Figure 13



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

THERMAL INFORMATION

D PACKAGE  
MAXIMUM COLLECTOR CURRENT  
VS  
DUTY CYCLE

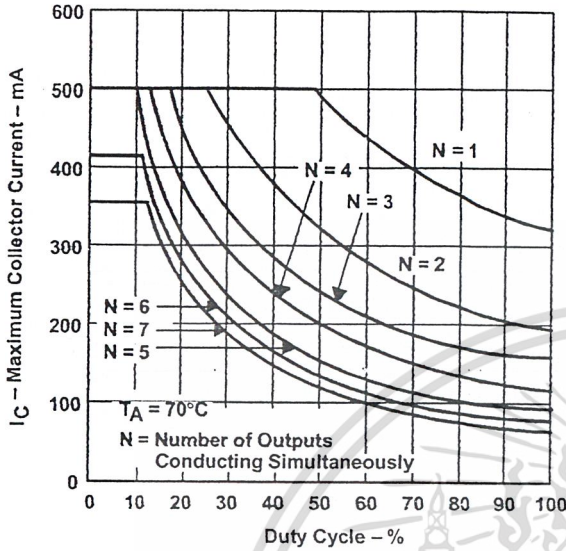


Figure 14

N PACKAGE  
MAXIMUM COLLECTOR CURRENT  
VS  
DUTY CYCLE

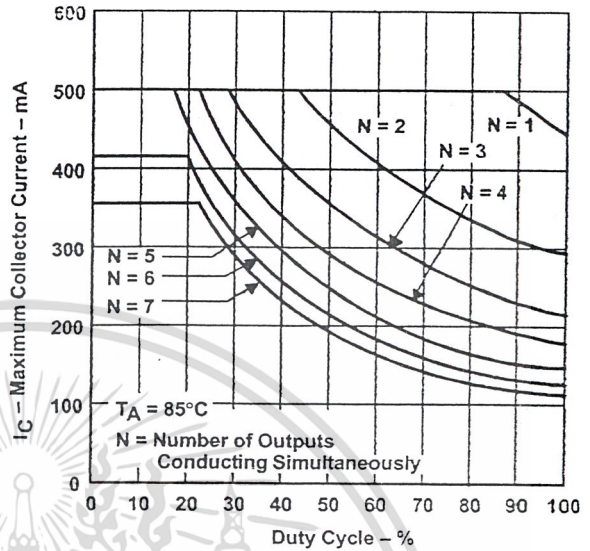


Figure 15



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION INFORMATION

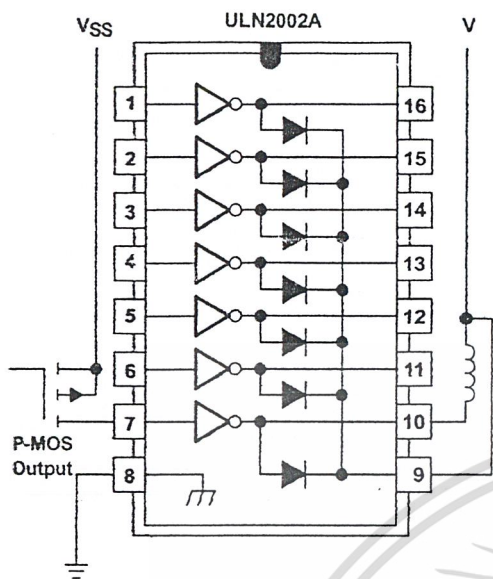


Figure 16. P-MOS to Load

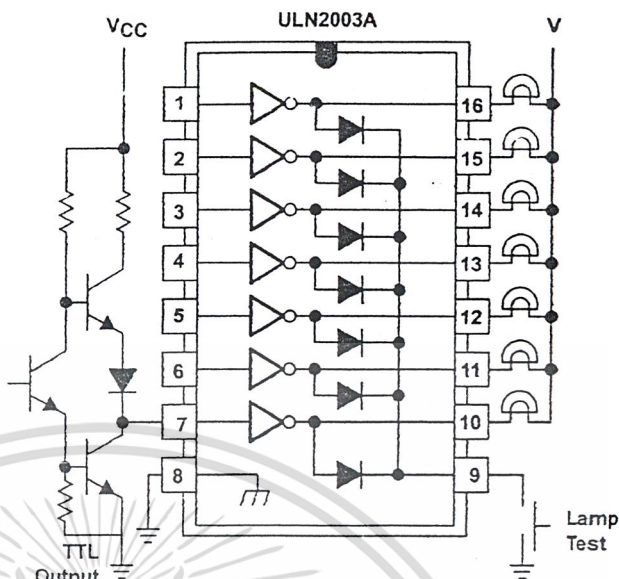


Figure 17. TTL to Load

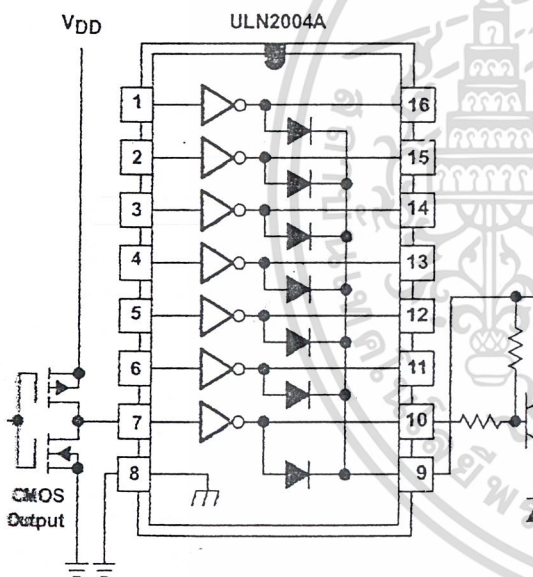


Figure 18. Buffer for Higher Current Loads

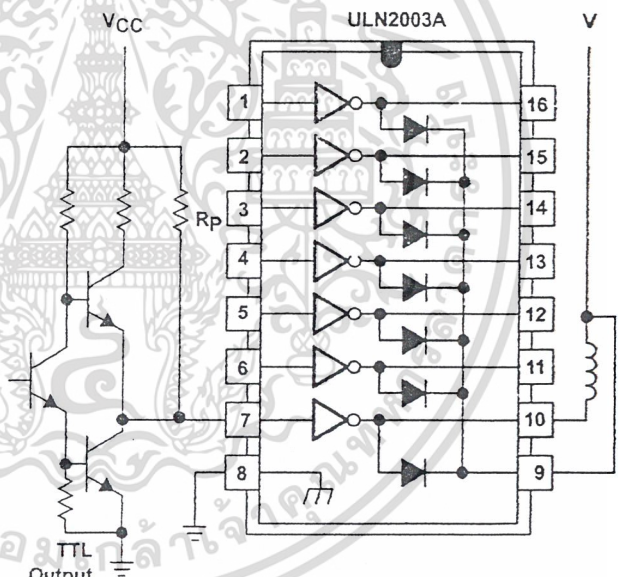


Figure 19. Use of Pullup Resistors to Increase Drive Current



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้