

เครื่องชี้ตำแหน่ง 3 มิติ

3D POINTER



โดย

นายกรสมรรถ เนตตกุล

นางสาวจารุณี ทรัพย์ซ้อน

นายนราธิป มุงเคน

ก ๑๓๐

๒๕๖๖

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **46221**
วัน, เดือน, ปี **21 ส.ค. 2546**

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

ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องชี้ตำแหน่ง 3 มิติ

3D POINTER



ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2544

ภาควิชา อีเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องชี้ตำแหน่ง 3 มิติ

ผู้จัดทำ

1. นายกรสมรรธ เนตตฤด
2. นางสาวจารุณี ทรัพย์ซ้อน
3. นายนราธิป มุงเคน




.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(เทอดศักดิ์ ลือหาทอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องชี้ตำแหน่ง 3 มิติ

3D POINTER

นายกรสมรรถ	เนตตกุล	41014010
นางสาวจารุณี	ทรัพย์ซ้อน	41014071
นายนราธิป	มุงเคน	41014212

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้

(เทอดศักดิ์ ลีวาทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องซีตําแหน่ง 3 มิติ

กรสมรรถ เนตตกุล

จารุณี ทรัพย์ซ้อน

นราธิป มุงเคน

อ.เทอดศักดิ์ ถีวหาทอง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการออกแบบเครื่องหาพิกัด X,Y,Z ของตัวชี้ โดยคำนวณจากระยะเวลาที่ต่างกันในการเดินทางของคลื่น Ultrasonic จากตัวชี้มายังจุดอ้างอิง 4 จุด การทำงานของเครื่องหาพิกัดและตัวชี้เป็นอิสระจากกัน ส่วนประกอบหลักของตัวชี้คือเครื่องส่งคลื่น Ultrasonic และเครื่องหาพิกัดประกอบด้วยเครื่องรับคลื่น Ultrasonic ที่วาง ณ จุดอ้างอิง FPGA ใช้ในการคำนวณหาระยะเวลาในการเดินทางที่ต่างกันของคลื่น Ultrasonic จากตัวชี้มายังตัวรับ 4 จุด จากนั้นจึงส่งข้อมูลของ FPGA ผ่านทาง RS-232 ไปยัง PC เพื่อคำนวณหาพิกัด X,Y,Z

3D-POINTER

Kornsmat Natetakool

Jarunee Subson

Narathip Mungkhen

Thurdsak Leauhatong Advisor

ABSTRACT

A system design of (x,y,z) position measurement of a pointer is purposed in this thesis. The position is calculated by using distances between the pointer and three references pointer. This system uses ultrasonic transducers to detect the distance between the transducer base on delay time. The FPGA measure the delay time and send its data to computer. A computer calculates the position of the pointer from the data from FPGA and display.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญภาพ	IV
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ	2
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก	2
2.2 อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์	9
2.3 ทฤษฎีและการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	14
2.4 การสื่อสารแบบอนุกรม	18
2.5 FPGA (Field Programmable Gate Array)	29
บทที่ 3 การออกแบบและการทำงานของเครื่องชี้ตำแหน่ง 3 มิติ	35
3.1 แนวทางการออกแบบเครื่องชี้ตำแหน่ง 3 มิติ	35
3.2 การทำงานของเครื่องชี้ตำแหน่ง 3 มิติ	37
บทที่ 4 คู่มือการใช้งานโปรแกรมแสดงผลของ 3D-POINTER	48
บทที่ 5 ผลการทดลอง	50
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์	52
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แนวคิดการออกแบบของเครื่องซีดีตำแหน่ง	1
รูปที่ 2.1 แสดงถึงช่วงความถี่ต่างๆ ที่ถูกนำไปใช้งาน	2
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามยาว	3
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามขวาง	4
รูปที่ 2.4 แสดงการบีบตัวของคลื่นเสียง 2 คลื่น	5
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นนิ่ง	5
รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของคลื่นเสียงที่ผ่านช่องแคบๆ จะเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดตัวใหม่	6
รูปที่ 2.7 แสดงการหักเหของคลื่นเสียงในตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน	6
รูปที่ 2.8 แสดงเมื่อคลื่นวงกลมกระทบกับฉากที่เป็นเส้นตรงคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากเป็นคลื่นวงกลมเช่นเดียวกัน	6
รูปที่ 2.9 ผลของเปียโซอิเล็กทริก	10
รูปที่ 2.10 วงจรเสมือนของเปียโซอิเล็กทริก	10
รูปที่ 2.11 แสดงการจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51	16
รูปที่ 2.12 (ก) แสดงตัวอย่างการต่อสัญญาณนาฬิกาโดยตรงจากภายนอก (ข) แสดงการใช้ X-TAL ในการกำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้กับ MCU	17
รูปที่ 2.13 รูปแบบอย่างง่ายที่สุดของข้อมูลอนุกรม	18
รูปที่ 2.14 รูปแบบอย่างง่ายที่สุดของข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส	19
รูปที่ 2.15 การจัดขาของคอนเน็คเตอร์พอร์ตอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232 ทั้งแบบ DB-9 และ DB-25	22
รูปที่ 2.16 การต่ออุปกรณ์ภายนอกกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ในลักษณะต่างๆ	24
รูปที่ 2.17 ไคอะแกรมการทำงานภายในของพอร์ตอนุกรมของเครื่องคอมพิวเตอร์	26
รูปที่ 2.18 ไคอะแกรมแสดงโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของพอร์ตอนุกรม	27
รูปที่ 3.1 แสดงวงจรภาคส่ง	37
รูปที่ 3.2 แสดงสัญญาณที่จุด A ในรูปที่ 3.1	39
รูปที่ 3.3 แสดงสัญญาณที่จุด B ในรูปที่ 3.1	40
รูปที่ 3.4 แสดงวงจรภาครับ	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 แสดงสัญญาณที่จุด D ในรูปที่ 3.4	42
รูปที่ 3.7 แสดงสัญญาณที่จุด E ในรูปที่ 3.4	43
รูปที่ 3.8 แสดงสัญญาณที่จุด F ในรูปที่ 3.4	43
รูปที่ 3.9 แสดงการวางตำแหน่งของตัวส่งและตัวรับ	44
รูปที่ 4.1 แสดงการเลือกพอร์ต	48
รูปที่ 4.2 แสดงการเลือกปุ่ม START	48
รูปที่ 4.3 แสดงหน้าจอโปรแกรมทั้งหมด	49
รูปที่ 4.4 แสดงการกดปุ่ม Exit	49
ภาคผนวก	
รูปที่ 1 แสดง Block Diagram ของ FPGA	
รูปที่ 2 แสดงวงจรในส่วนเชื่อมต่อกับ PC	

สารบัญตาราง

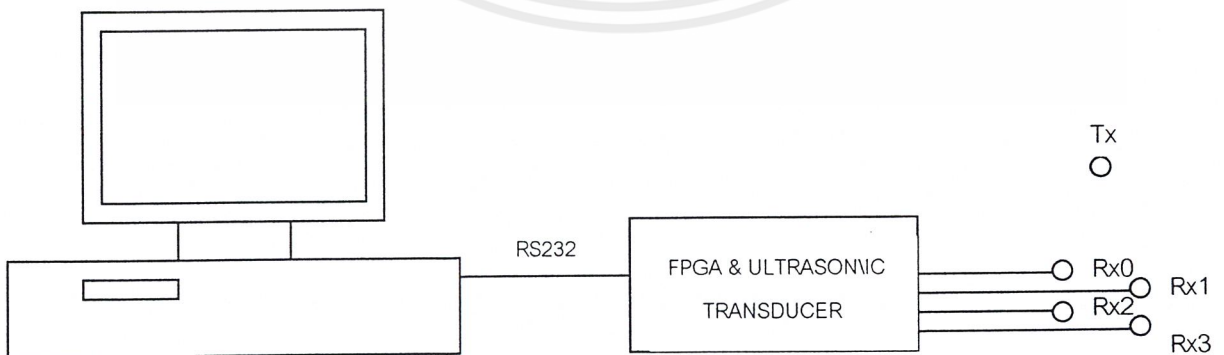
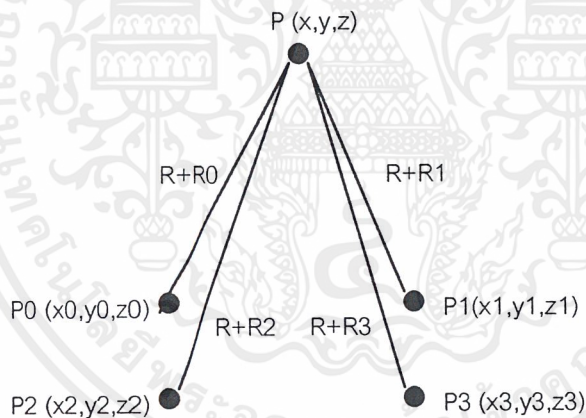
	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลในแอดเดรส 0000:0411H ที่ใช้แจ้งจำนวนพอร์ตอนุกรม	28
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างอุปกรณ์ FPGA	30
ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองวัดค่า ณ ที่พอยเตอร์ตำแหน่งต่างๆ	50
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองวัดระยะที่คำนวณเทียบกับระยะจริงเพื่อหาค่าผิดพลาด	51



บทที่ 1

บทนำ

ปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้เสนอการออกแบบระบบ เพื่อใช้บอกตำแหน่งของตัวชี้ตำแหน่ง บนจอคอมพิวเตอร์ โดยมีหลักการทำงานคร่าวๆ ดังนี้ ในรูปที่ 1.1 จะเป็นในแนวคิดหลักของการหาพิกัดของตัวชี้ตำแหน่ง ซึ่งจะประกอบด้วยตัวชี้ P ณ ตำแหน่ง (x,y,z) และจุดอ้างอิง 4 ตัวคือ P0,P1,P2 และ P3 ตามลำดับ ที่ตำแหน่ง $(x_0,y_0,0)$, $(x_1,y_1,0)$, $(x_2,y_2,0)$ และ $(x_3,y_3,0)$ ตามลำดับ การหาพิกัด (x,y,z) ทำได้โดยการวัดระยะทางระหว่างตัวชี้ไปยังจุดอ้างอิงทั้ง 4 คือ $R+R_0,R+R_1, R+R_2$ และ $R+R_3$ โดยใช้ FPGA เป็นตัวควบคุม จากนั้นก็จะส่งข้อมูลของระยะทางทั้ง 4 ไปยังคอมพิวเตอร์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางสาย RS232 เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำการคำนวณหาค่าพิกัด (x,y,z) และแสดงผลต่อไป



รูปที่ 1.1 แนวคิดการออกแบบของเครื่องชี้ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก

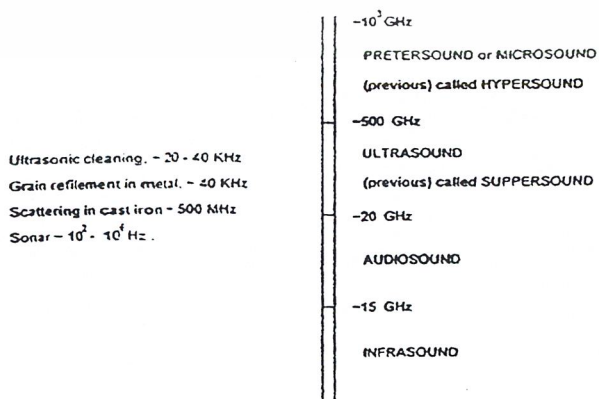
เครื่องซีดำแห่ง 3 มิตินี้ อาศัยหลักการวัดระยะทางด้วยคลื่นอัลตราโซนิก แล้วนำค่าระยะทางที่วัดได้มาคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง โดยทฤษฎีของคลื่นอัลตราโซนิกจะกล่าวโดยสังเขปดังนี้

2.1.1 คุณสมบัติและธรรมชาติของคลื่นอัลตราโซนิก

หลักการของคลื่นเสียง คือฟิวด์ของพลังงานจะถูกส่งออกมาจากตัวส่ง ไปซึ่งถ้าเรานำตัวรับชนิดเดียวกันกับตัวส่งซึ่งมีความถี่ตรงกันแล้วก็จะสามารถรับสัญญาณได้ ซึ่งคลื่นอัลตราโซนิกจะเป็นคลื่นที่มีทิศทางและจะพุ่งออกจากตัวส่งซึ่งจะมีขอบเขตประมาณ 30 องศาจากตัวส่ง เวลาที่ใช้ในการเดินทางในอากาศสามารถที่จะคำนวณระยะทางได้เพราะฉะนั้นการศึกษาถึงธรรมชาติของคลื่น จะสามารถทำให้เข้าใจในการนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างถูกต้อง

2.1.2 คลื่นอัลตราโซนิก

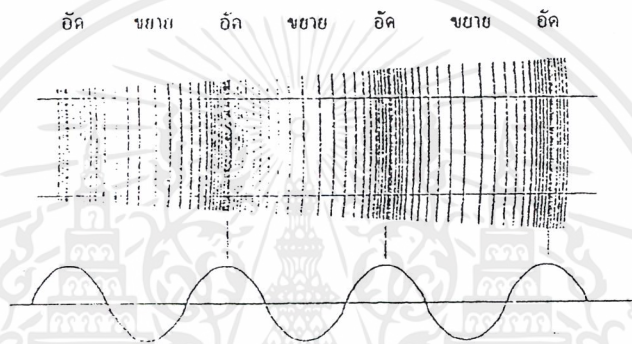
คลื่นอัลตราโซนิก คือ คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินที่มนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วมนุษย์จะได้ยินคลื่นความถี่ประมาณ 20 Hz ถึง 20 kHz ดังนั้นแล้วคลื่นอัลตราโซนิกจึงหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz จนถึง 104 GHz โดยคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า 104 GHz และแอมพลิจูดสูงๆ จะเรียกว่า “ไฮเปอร์ซาวนด์”



2.1.3 ชนิดของคลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นอัลตราโซนิกที่เดินทางผ่านตัวกลางต่างๆ มีหลายชนิดด้วยกันซึ่งแต่ละชนิดแตกต่างกันตามการเคลื่อนของอนุภาคในตัวกลางนั้น

2.1.3.1 คลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) คือคลื่นอนุภาคตัวกลางที่มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่น



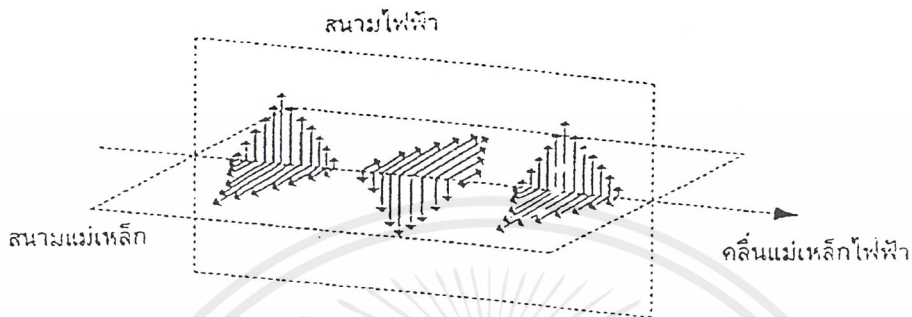
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามยาว

จากรูป 2.2 จะเห็นว่ามีส่วนที่เคลื่อนที่อัด (Compression) ซึ่งก็คือคลื่นช่วงของอนุภาคตัวกลางมีความชันสูงและคลื่นขยาย (Rarefaction) คือที่อนุภาคของตัวกลางมีความดันต่ำและเมื่อนำค่าของความดันที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางมาเขียนกราฟจะได้รูปไซน์ โดยยอดคลื่นจะตรงกับส่วนอัดและท้องคลื่นจะตรงกับส่วนขยาย ระยะทางระหว่างส่วนอัดถึงส่วนอัด หรือส่วนขยายถึงส่วนขยายคือ 1 ความยาวคลื่น และมีคาบเวลาเป็น (t) ซึ่งเท่ากับ $1/f$ โดยจุดที่เป็นแกนนั้นยาว 1 บรรายากาศ

2.1.3.2 คลื่นตามขวาง (Transverse Wave) คือที่ทุกๆ จุดบนคลื่น มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ คลื่นชนิดนี้จะเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็ง คลื่นชนิดนี้ไม่สามารถเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็งและก๊าซได้

คลื่นตามขวางที่ลักษณะเหมือนกับการเกิดขั้วลบและขั้วบวก ซึ่งเป็นเหตุผลที่ว่า การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของอนุภาคเป็นไปในทิศทางเดียว เช่น ในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของคลื่น ที่เคลื่อนที่ไปจากต้นกำเนิดของคลื่นตามขวาง เป็นพื้นที่หน้าเรียบของระนาบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคอันเนื่องมาจากการแกว่ง และความหนาของตัวกลาง จะไม่เปลี่ยนแปลงโดยการเคลื่อนที่ของคลื่นแบบตามขวาง ความเร็วของคลื่นชนิดนี้จะน้อยกว่าความเร็วของคลื่นชนิดตามยาว ในขณะที่การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดินทางผ่านตัวกลางชนิดเดียวกัน ดังนั้นที่ความถี่เดียวกันความยาวของคลื่นตามขวางจะน้อยกว่าคลื่นตามยาวเสมอ



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นตามขวาง

2.1.3.3 คลื่นผิวหน้า (Surface Wave or Rayleigh) คือคลื่นชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายกับคลื่นตามขวางจะต่างกันตรงที่ว่า การเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาค ไม่เป็นไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางที่เคลื่อนที่เพียงอย่างเดียว แต่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ด้วย จึงทำให้คลื่นเคลื่อนที่ไปตามระนาบในแนวนอน ด้วยเหตุนี้คลื่นจึงเดินทางผ่านไปเฉพาะบนผิวของตัวกลางเท่านั้น

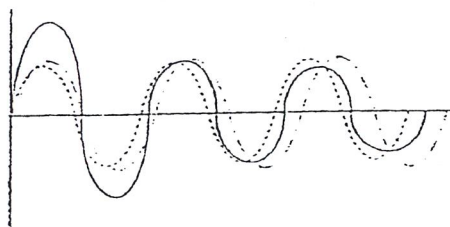
2.1.4 คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นอัลตราโซนิก

คุณสมบัติโดยทั่วไปของคลื่นเสียงจะแสดงได้ 4 แบบคือ

2.1.4.1 การแทรกสอดของเสียง (Interference)

การแทรกสอดของเสียงเกิดจากการรวมกันของคลื่น 2 คลื่นขึ้นไป ขณะเมื่อพบกันในตัวกลางเดียวกัน ซึ่งทำให้เกิดผลได้หลายลักษณะคือ

ก.) การบีตส์ (Beats) ของคลื่นเสียงเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการรวมคลื่นที่มีความถี่ต่างกันหรือต่างเฟสกัน เคลื่อนที่ไปในตัวกลางเดียวกันแล้วรวมเป็นคลื่นใหม่ ซึ่งทำให้แอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในรูปที่ 2.4

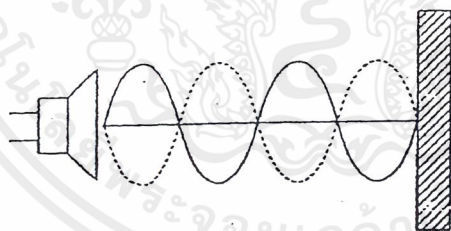


รูปที่ 2.4 แสดงการบัพของคลื่นเสียง 2 คลื่น

จากรูปที่ 2.4 เป็นการแสดงบัพของคลื่น 2 คลื่น ซึ่งคลื่นที่มีแอมพลิจูดเปลี่ยนไปซึ่งประโยชน์ของการบัพของคลื่นนั้น จะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบความถี่ของคลื่นให้แสดงผลออกมาในลักษณะของแอมพลิจูดที่แตกต่างกันนี้

ข.) การเกิดคลื่นนิ่ง (Standing Wave) เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นขุดที่มีแอมพลิจูดเท่ากันและความถี่เท่ากัน แต่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้ามหรือเฟสตรงกันข้าม ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นนิ่งดังรูป เสียงจะมีความเข้มขึ้นสูงสุดที่ตำแหน่ง ก. และเบาที่สุดที่ตำแหน่ง ข. ซึ่งระยะระหว่างขั้วทั้ง 2 เท่ากับ

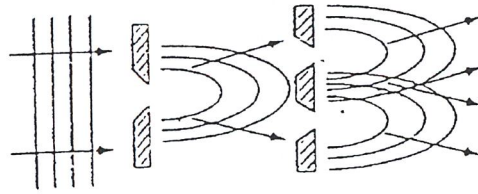
$$d = n\lambda/2 ; (n = 1, 2, 3, \dots)$$



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการเกิดคลื่นนิ่ง

2.1.4.2 การเลี้ยวเบนของคลื่นเสียง (Diffraction)

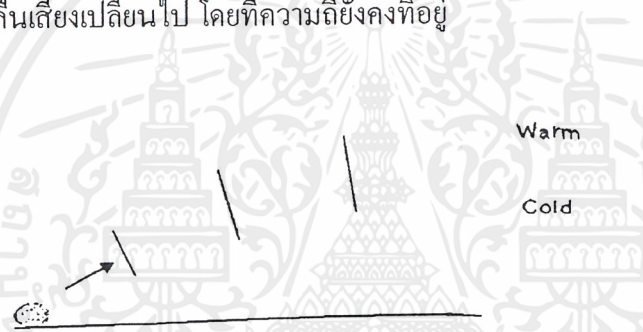
คือคลื่นเสียงจะเลี้ยวเบนอ้อมสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นมุมหรือช่องแคบ ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้พบในชีวิตประจำวันอยู่ตลอดเวลาเช่น ในกรณีที่เราได้ยินเสียงแตรรถที่อยู่คนละมุมถนนของตึก หรือการได้ยินเสียงลอดผ่านช่องเล็กๆ จากอีกห้องหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของคลื่นเสียงที่ผ่านช่องแคบๆจะเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดตัวใหม่

2.1.4.3 การหักเหของคลื่น (Refraction)

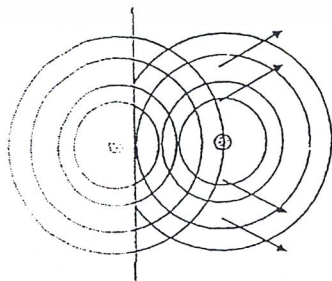
คลื่นเสียงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันจะเกิดการหักเหของคลื่น ซึ่งทำให้ความเร็วของคลื่นเสียงเปลี่ยนไป โดยที่ความถี่ยังคงที่อยู่



รูปที่ 2.7 แสดงการหักเหของคลื่นเสียงในตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน

2.1.4.4 การสะท้อนของคลื่นเสียง (Reflection)

คลื่นเสียงสามารถสะท้อนได้เมื่อตกกระทบตัวกลางโดยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน และจะทำให้เกิดเสียงก้อง ซึ่งที่สะท้อนกลับมาโดยใช้เวลาที่มากกว่า 50 msec จะทำให้เราได้ยินเสียงนี้เป็นครั้งที่ 2



รูปที่ 2.8 แสดงเมื่อคลื่นวงกลมกระทบกับฉากที่เป็นเส้นตรงคลื่นที่สะท้อนกลับมาจะเป็นคลื่นวงกลมเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.5 การเกิดคลื่นอัลตราโซนิก

อัลตราโซนิก เป็นคลื่นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานรูปอื่นให้เป็นพลังงานกล โดยการสั่นไปมา หรือ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกลให้เกิดคลื่นย่านอัลตราโซนิก กระจายออกไปในอากาศ ดังนั้นจึงถือได้ว่าคลื่นที่เกิดเป็นคลื่นกล (Mechanical Wave) อัลตราโซนิกสามารถสร้างได้โดยตัวทรานสดิวเซอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล หลักการสร้างมีหลายวิธีดังนี้

ก.แบบเปียโซอิเล็กทริก (Piezo-electric Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกล โดยมีความถี่เรโซแนนซ์คงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง

ข.แบบแมกนีโตสทริกทีฟ (Magnetostrictive Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างไฟฟ้าในขดลวดกับตำแหน่งความยาวของแกนเหล็กที่สวมขดลวดนั้น

ค.แบบอิเล็กโตรสทริกทีฟ (Electrostrictive Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกล

***สำหรับเปียโซอิเล็กทริกเป็นแบบที่นิยมใช้เพราะมีราคาถูกและหาซื้อง่าย

2.1.4.6 ความถี่และความยาวคลื่น (Frequency and Wave Length)

ความถี่ คือจำนวนของการออสซิลเลทที่สมบูรณ์จากแหล่งกำเนิดคลื่นภายในหนึ่งวินาที คลื่นจะถูกส่งจากแหล่งกำเนิดจะเดินทางด้วยความถี่เดียวกัน

ความยาวคลื่น คือระยะทางที่คลื่นเดินทางระหว่างการสั่นที่สมบูรณ์ หรือการเดินทางครบหนึ่งรอบ (Cycle) สามารถกล่าวได้ว่า ความยาวคลื่นเป็นระยะทางระหว่างการอัดอย่างต่อเนื่อง (Success Compression) หรือการเบาบางของอากาศ (Rare Fraction) การอัดคือการที่บริเวณนั้นมีความหนาแน่นของโมเลกุล และแรงดันมากกว่าบริเวณรอบๆ ส่วนการเบาบางเป็นบริเวณเฉพาะที่เกิดการลดความหนาแน่นของโมเลกุลและแรงดันสัมพันธ์กับแรงดันของอากาศปกติ

ความถี่และความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$c = f\lambda$$

c : ความยาวของการเดินทาง

f : ความเร็ว

λ : ความยาวคลื่น

2.1.4.7 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก

ความเร็วที่ของรับของคลื่น ในอากาศที่อุณหภูมิปกติความสัมพันธ์ที่ใช้จะเป็นดังสมการ

$$V = 331.45 + 0.607T \quad (\text{m/sec})$$

V : ความเร็วของคลื่นในตัวกลางอากาศ

T : อุณหภูมิของคลื่นในอากาศ

2.1.4.8 ปริมาณพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิก

ประมาณพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกจะถูกวัดในรูปความเข้มของคลื่นอัลตราโซนิก มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นการไหลของพลังงานผ่านพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่นใน 1 วินาที

2.1.4.9 การลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิก

เมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลาง ลำคลื่น (Beam) ของคลื่นอัลตราโซนิกจะสูญเสียความเข้มซึ่งเกิดจากการลู่ออกของลำคลื่นอัลตราโซนิกหรือเกิดจากการกระจายพลังงานของคลื่นออกจากลำคลื่น เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของตัวกลาง และอาจเกิดจากการดูดซับพลังงานของคลื่น โดยตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน พลังงานที่ดูดซับนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน การดูดซับพลังงานความร้อนนี้ ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุ ความยืดหยุ่นและความหนาแน่น รวมทั้งความถี่ของคลื่นที่ใช้ยังมีความถี่สูงพลังงานยิ่งถูกดูดซับมาก

2.2 อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์

อัลตราโซนิค หมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน คลื่นอัลตราโซนิค เป็นคลื่นที่มี ทิศทาง ทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการ ได้โดยข้อนี้เป็นคุณสมบัติของคลื่นที่ว่า ยิ่งคลื่นมีความถี่สูงขึ้น ความยาวคลื่นก็จะยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิดที่ให้เสียงนั้นออกมา เช่นคลื่นความถี่ 300 Hz ในอากาศจะมีความยาวถึงประมาณ 1 เมตรซึ่งจะยาวกว่าช่องที่ให้คลื่นเสียงออกมาจากแหล่งกำเนิดเสียง โดยทั่วไปมากมาย คลื่นจะหักเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียงทำให้เกิดการกระจายทิศทางทางคลื่น แต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาอยู่ในย่านอัลตราโซนิค เช่น 40 kHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียงประมาณ 8 มม.เท่านั้น ซึ่งเล็กกว่ารูเปิดของตัวที่ให้กำเนิดเสียงความถี่นี้มากๆ คลื่นเสียงจะ ไม่มีการเลี้ยวเบนที่ขอบ จึงพุ่งออกมาเป็นลำแคบๆ หรือที่เราเรียกว่า มีทิศทาง นั่นเอง

การมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิคทำให้นำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่นนำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (ultrasonic remote control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (ultrasonic cleaner) โดยการทำให้น้ำสั่นที่ความถี่สูง เครื่องวัดความหนาของวัตถุโดยส่งเกตระยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมา เครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ท้องทะเล โซนในเครื่องหาตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกาย ใช้ทดสอบการรั่วของท่อ เป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น ถ้าคลื่นเสียงต้องเดินทางผ่านอากาศแล้ว ความถี่ที่ใช้ก็มักจะจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 kHz เพราะที่ความถี่สูงขึ้นกว่านี้ อากาศจะดูดกลืนคลื่นเสียงเพิ่มขึ้นมาก ทำให้ระดับความแรงของคลื่นเสียงที่ระยะทางห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการใช้งานด้านการแพทย์ซึ่งต้องการรัศมีทำการสั้นๆ คือความถี่ในช่วง 1 MHz – 10 MHz ในขณะที่ความถี่เป็น GHz ก็มีใช้กันในหลายๆการใช้งานที่ตัวกลางไม่ใช่ในอากาศ อุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานในรูปอื่นให้เป็นพลังงานทางกลโดยการสั่นไปมา ซึ่งทำให้เกิดคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิคกระจายไปในอากาศได้หรือแปลงพลังงานทางกลให้เป็นพลังงานในรูปอื่นได้นั้น มีชื่อเรียกทางภาษาเทคนิคว่า อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ (ultrasonic transducer)

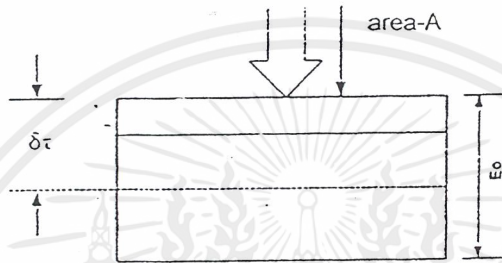
2.2.1 ปฏิกิริยาเพียโซอิเล็กทริก

เพียโซอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่ง ซึ่งทำให้พลังงานเปลี่ยนแปลงจากรูปหนึ่งได้ กล่าวคือถ้าป้อนแรงกลให้แก่ Solid Crystalline Dielectric ดังรูปที่ 2.9 ก็จะทำให้เกิดความเค้น (Stress) ภายในคริสตัลและทำให้ผลึกของคริสตัลผิดรูปไป เช่นพวกควอตซ์ (Quartz) ผลก็คือประจุเปลี่ยนไป การผิดรูปร่างของแลตทิตเป็นผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างการแทนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

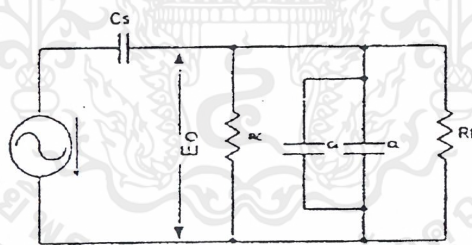
(Displacement) ของประจุบวกและลบในแลททิซเปลี่ยนไป การแทนที่ของประจุภายในจะเท่ากับประจุภายนอกของขั้วที่ตรงข้ามของคริสตอล เรียกว่าผลของเปียโซอิเล็กทริก

การวัดประจุทำได้โดยการต่ออิเล็กโทรด (electrod) เข้าที่ผิวบนและล่าง แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสอง ขนาด (Magnetude) และการมีขั้ว (Polatity) ของประจุบนผิวที่ถูกเหนี่ยวนำ (induce) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดและทิศทางของแรงที่มากระทำ



รูปที่ 2.9 ผลของเปียโซอิเล็กทริก

วงจรเสมือนของเปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์



รูปที่ 2.10 วงจรเสมือนของเปียโซอิเล็กทริก

C_c : คาปาซิแตนซ์ของชิ้นส่วนเปียโซอิเล็กทริก

R_c : Leakage Resistance ของเปียโซอิเล็กทริก ปกติจะมีค่าสูงประมาณ $10^8 - 10^{10}$ ความต้านระหว่างเทอร์มินอล โดยทั่วไปจะเป็นความต้านทานทางโหลด R_L (ในช่วง $10^6 - 10^7$)

C_L : คาปาซิแตนซ์ของ Subsequent (Load) ร่วมกับ Connection Cable

ที่ความถี่ปานกลางและคางถี่สูง โวลเตจ E_0 ที่ร้อมโหลดหาได้โดย C_c และ C_L ค่าเหล่านี้มาได้โดยการแบ่งโวลเตจ โดยโวลเตจ E_0 ได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $E_0 = E (C_c / (C_c + C_L))$ มอนูญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขึ้นกับความถี่ ถ้าเอาที่พหุวัตต์จะมีค่ามากสามารถทำให้ลดลงได้โดยการเพิ่มค่า C_L เช่น การนำค่า C_C ต่อขนานเข้าไปที่ความถี่ต่ำ โวลเตจ E_0 คร่อมโพลคาหาได้โดยค่ารีแอคแตนซ์ของ C_C และอิมพีแดนซ์ของ C_L และ R_L ที่ต่อขนานกัน โวลเตจ E_0 ขึ้นกับความถี่และจะลดลงถ้าความถี่ลดลง การตอบสนองต่อความถี่สามารถปรับปรุงได้โดยการใช้ทรานสดิวเซอร์ที่มีค่าคาปาซิแตนซ์สูงหรือโดยการเพิ่มความต้านทานทาง โพลด R_L

2.2.2 วัสดุเปียโซอิเล็กทริก

วัสดุเปียโซอิเล็กทริกที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น Quartz, Tourmaline sulphate , Barium Titanate และ Zirconate Titanate (TZI) โดยทั่วไปแล้วพวกควอตซ์ และคริสตอลที่เป็นเปียโซอิเล็กทริกธรรมชาติมักจะมีขั้วของมันเองตามธรรมชาติ แต่พวกวัสดุเปียโซอิเล็กทริกที่สังเคราะห์ขึ้นมาเช่น แบเรียม ไททาเนท เซรามิก จะต้องนำมาทำการอบคริสตอลภายในแรงดัน และวางวัสดุที่ได้ขึ้นภายในแรงดัน และวางวัสดุที่ได้นี้ในสนามไฟฟ้าที่มีแรงดันของกระแสตรงมาก หลังจากขึ้นส่วนนี้ถูกนำในสนามแม่เหล็กแล้ว คริสตอลนี้จะมีขั้วตามแนวของทิศทางของสนาม และประพจน์ตัวตามคุณสมบัติของเปียโซอิเล็กทริกสำหรับชิ้นส่วนที่ทำจากวัสดุสังเคราะห์นี้ไม่มีข้อจำกัดทางขนาดของโครงสร้าง ของคริสตอลและยังสามารถทำให้มีรูปร่างและขนาดต่างๆและทิศทางของขั้วก็จะถูกสร้างขึ้นระหว่างขั้นตอนการผลิต

ภายในตัวอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริกจะประกอบด้วยชิ้นสารเซรามิกสี่เหลี่ยมซึ่งมีผิวโลหะเงินฉาบอยู่ทั้ง 2 หน้าเพื่อสำหรับเป็นขั้วของอุปกรณ์ชิ้นสารเซรามิกนี้ประกบขึ้นจากสารเซรามิก 2 ชิ้นประกบกันอยู่ โดยวางให้ขั้วใดโพลทางไฟฟ้าภายในอะตอมของมันมีทิศทางตรงข้ามกัน

ชิ้นสารเซรามิกถูกยึด ในตัวถังอย่างดีเพื่อไม่ให้เกิดการสั่นขณะทำงานอยู่ได้รับผลกระทบกระเทือนจากภายนอก ตัวถังมักจะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและมีความสูงประมาณ 1 ถึง 2.5 ซม. ด้านหน้าทำเป็นช่องเปิดมีตะแกรงติดอยู่เพื่อให้คลื่นอัลตราโซนิคเข้ามาหรือออกจากช่องเปิดได้โดยสะดวก ถ้าตัวถังทำมาจากโลหะก็ควรต่อตัวถังลงกราวด์เพื่อทำหน้าที่ชิลด์สำหรับบางยี่ห้ออาจจะต่อขาหนึ่งติดกับตัวถังมาให้เลย เมื่อพลิกดูขา 2 ขาที่โผล่ออกมาจากตัวถังจะเห็นมีขาหนึ่งติดกับตัวถัง

เมื่อมีสัญญาณแรงดันมาต่อขั้วทั้งสองของชิ้นสารเซรามิก จะทำให้ชิ้นสารโก่งงอมากหรือน้อยหรือในทิศทางใดตามขนาดของสัญญาณนั้นๆ ทำให้เกิดการกดอัดอากาศโดยรอบเกิดเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณนั้นออกไป โดยทั่วๆ ไปกำลังเอาต์พุตที่ออกไปจะมีค่า

ประมาณ 10% ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป แต่กำลังเอาต์พุตจะสูงสุดที่ค่าประมาณนี้ต่อเมื่อความถี่ทางกลตามธรรมชาติสารเซรามิกนั้นๆ ส่วนที่ความถี่อื่นๆกำลังเอาต์พุตจะลดลงกว่านี้มาก

ในการทำงานกลับกันเมื่อมีคลื่นเสียงที่มีความถี่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของชิ้นสารเซรามิกเข้ามาจะทำให้ชิ้นสารโก่งงอไปมา และเกิดสัญญาณแรงดันซึ่งมีขนาดเล็กขึ้นมาคร่อมขั้วทั้งสองของตัวมันเองได้

คุณสมบัติโดยทั่วไปของอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริกก็คือมีค่าความต้านทานไฟตรงสูงมา อาจสูงถึง 100 MΩ นั่นคือเมื่อวัดด้วยมิเตอร์ธรรมดาที่ตั้งสเกลวัดค่าต้านทานสูงๆ ไม่ได้ แต่ในขณะที่มันทำงาน ความต้านทานทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับจะลดลง

2.2.3 ชนิดของเปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

เปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. แบบ Generation-Action Transducer ใช้เป็นตัวรับ โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะหาได้จากแรงดันและความถี่ที่มากระทำต่อวัสดุเปียโซอิเล็กทริก
2. แบบ Motor-Action Transducer ใช้เป็นตัวส่ง โดยการเปลี่ยนของรูปร่างที่ทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิค โดยจะขึ้นกับขนาดความสูงและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ให้ในทั้งสองกรณีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับขนาดของวัตถุ

2.2.4 การทำงานของทรานสดิวเซอร์ตัวส่งตัวรับ

เมื่อทรานสดิวเซอร์ได้รับสัญญาณแรงดันมาคร่อมจะทำให้ชิ้นสารเซรามิกโค้งงอทำให้เกิดการอัดอากาศโดยรอบเป็นคลื่นขึ้นมา ดังนั้นถ้าป้อนสัญญาณเป็นห้วงๆ (Electricity Pulse) จากการออสซิลเลทก็จะให้ชิ้นสาร โก่งงอมากขึ้นหรือทิศทางใดตามขนาดและทิศทางการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ ไฟฟ้าจากการออสซิลเลทนั้นออกไป โดยทั่วไปกำลังเอาต์พุตที่ออกมาจะตกประมาณ 10% ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แต่เอาต์พุตจะสูงที่ค่านี้ โดยประมาณก็ต่อเมื่อความถี่ของสัญญาณออสซิลเลทที่ป้อนเข้าชิ้นสารเซรามิกตรงกับความถี่เรโซแนนซ์เป็นความถี่ทางกลตามธรรมชาติของชิ้นสารเซรามิกนั้นๆ ส่วนที่ความถี่อื่นๆกำลังเอาต์พุตจะลดลงกว่านี้ ส่วนการทำงานของทรานสดิวเซอร์ตัวรับมักมีการทำงานตรงข้ามกับตัวส่ง คือเมื่อมีคลื่นเสียงที่มีความถี่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของชิ้นสารเซรามิกเข้ามา จะทำให้ชิ้นสาร โก่งงอไปมาและเกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กขึ้นมาคร่อมขั้วทั้งสอง

2.2.5 ข้อควรระวังในการใช้งานตัวรับตัวส่งทรานสดิวเซอร์

1. ไม่ควรให้ตัวต้านทานทรานสดิวเซอร์ได้รับการกระแทกหรือตกจากที่สูง เพื่อป้องกันโครงสร้างภายในไม่ให้เสียหาย
2. ทรานสดิวเซอร์ที่มีขายกันโดยทั่วไปจะทนแรงดันตกคร่อมตัวมันได้ไม่เกิน $20 V_{rms}$ ดังนั้นขนาดของสัญญาณที่จะป้อนให้กับตัวทรานสดิวเซอร์ก็ควรอยู่ในขีดจำกัดนี้
3. ความถี่เรโซแนนซ์ของทรานสดิวเซอร์ 40 kHz (Bandwidth) ที่มีขายโดยทั่วไปจะผิดพลาดไม่เกิน $\pm 1\text{kHz}$ และมีแถบความถี่ประมาณ 4.5kHz (Bandwidth) สำหรับตัวส่งและมีแถบความถี่ประมาณ 5.0 kHz (Bandwidth) สำหรับตัวรับ จะเห็นได้ว่าแถบความถี่ของตัวรับจะกว้างกว่าตัวส่งเล็กน้อย เพื่อให้แน่ใจว่าตัวรับจะสามารถรับความถี่ทั้งหมดที่ออกจากตัวส่งได้
4. อุณหภูมิที่ใช้งานของตัวทรานสดิวเซอร์ควรอยู่ในช่วง -20 ถึง 60 องศาเซลเซียส
5. ตัวส่งและตัวรับจะมีทิศทางคล้ายกันมาก กล่าวคือที่ตำแหน่งเบนจากแนวแกนของตัวส่งไปประมาณ 30 องศา ความแรงของคลื่นเสียงที่ถูกส่งออกไปจะลดลงจากแนวแกนประมาณ 10 dB ทำนองเดียวกัน ถ้าคลื่นเสียงพุ่งเข้ามาในแนวที่เบี่ยงเบนไป จากแกนของตัวรับประมาณ 30 องศา ความไวหรือขนาดของแรงดันที่ออกมาจะลด จึงควรทำให้ตัวรับและตัวส่งอยู่ในแนวที่พุ่งตรงมากที่สุด อย่างไรก็ตามในกรณีที่อยู่ในห้องจะเกิดการเบี่ยงเบนกันได้มาก เพราะคลื่นเสียงอัลตราโซนิกจะสะท้อนกับกำแพงและวัตถุที่อยู่ในห้อง ทำให้คลื่นเสียงเข้าไปหาตัวรับได้หลายทาง อัลตราโซนิกนี้สามารถทำให้เป็นลำแคบได้โดยที่ใช้สนัที่เรียกว่า Planacone avelenes วางข้างหน้าของทรานสดิวเซอร์ แต่การทำให้เป็นลำแคบ (Beam) นี้ จะทำให้ near field ตื้นลงและ far field กระจายกว้างขึ้น การทำให้เป็นลำคลื่นเหมาะสำหรับการใช้ทรานสดิวเซอร์ที่สร้างควมถี่สูงที่เหมาะสมสำหรับที่ใช้งานด้านการแพทย์ (ultrasound) ที่มีความถี่ตั้งแต่ $2 - 5\text{ MHz}$ เพื่อใช้ตรวจเนื้อเยื่อมีการส่งเป็นลำแคบ
6. ในกรณีที่ใช้งานตัวรับจะต้องมีความต้านทานต่อขนานกับตัวรับที่ทำหน้าที่เป็นโหลด ตามปกติแล้วตัวต้านทานนี้ควรมีค่าระหว่าง $10\text{ k}\Omega$ ถึง $100\text{ k}\Omega$ จากการทดลองพบว่าถ้าเปลี่ยนจาก $100\text{ k}\Omega$ มาเป็น $10\text{ k}\Omega$ ความไวจะลดลงประมาณ $10 - 12\text{ dB}$ แต่ความถี่จะกว้างขึ้น ถ้าความต้านทานต่ำลงไปอีก ความถี่เรโซแนนซ์จะลดลงไปจากที่ระบุไว้ ถ้าการใช้งานมีสัญญาณรบกวนมากควรใช้โหลดที่มีความต้านทานสูงสักหน่อย เพื่อให้ตัวส่งมีความไวสูงและมีความถี่แคบ
7. ตามปกติแล้วสามารถนำตัวส่งและตัวรับมาใช้แทนกันได้ ในการใช้งานส่วนใหญ่ตัวส่งและตัวรับรุ่นใด ก็สามารถใช้แทนกันได้ในงานส่วนใหญ่ ขอเพียงแต่ให้มีความถี่เรโซแนนซ์เดียวกันเท่านั้น อย่างไรก็ตามในบางกรณีอาจต้องเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสมมูลย์ทางไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้าสลับเพื่อให้เกิดลักษณะผลตอบสนองทางความถี่สอดคล้องกับของเดิม

8. ประโยชน์การใช้งานคลื่นอัลตราโซนิก คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นที่มีทิศทาง ทำให้สามารถเล็งคลื่นไปตามเป้าหมายที่ต้องการได้เจาะจง ยิ่งคลื่นที่มีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นจะยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิด(ที่ทำให้เสียงออกมา) ของตัวที่ทำให้เกิดเสียงความถี่นี้

2.3 ทฤษฎีและการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

2.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ชิปเดี่ยว

ก่อนที่จะทำความรู้จักกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เราควรจะทำความรู้เกี่ยวกับที่มาที่ไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้ เพื่อความเข้าใจที่ดีในการกล่าวถึงไมโครคอนโทรลเลอร์กันก่อน เดิมทีเดียวนั้นในงานควบคุมระบบต่างๆ ได้นำไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้งานควบคุม โดยในการใช้งานนั้นจะต้องมีการต่อร่วมกับอุปกรณ์ภายนอก จำพวกพอร์ต I/O หน่วยความจำ(RAM) หน่วยความจำโปรแกรม(ROM) ทั้งยังมีชิปจำพวก UART(Universal Asynchronous Receiver Transmitter)เพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลแบบอนุกรม โดยมีหน้าที่เปลี่ยนข้อมูลจากรูปแบบขนาน(Parallel) ไปเป็นข้อมูลแบบอนุกรม(Series)สำหรับการส่งชุดข้อมูล และแปลงข้อมูลจากรูปแบบอนุกรมกลับเป็นรูปแบบขนานในขั้นตอนการรับข้อมูล ซึ่งจะเห็นว่าถ้าจะนำไมโครโปรเซสเซอร์ หรือไมโครคอมพิวเตอร์ดังกล่าวมาใช้ในระบบควบคุม โดยเฉพาะนั้นจะค่อนข้างยุ่งยาก สิ้นเปลืองอุปกรณ์ร่วมต่างๆ เพื่อที่จะให้ครอบคลุมการใช้งานควบคุมที่มีประสิทธิภาพ ฉะนั้นจากปัญหาต่างๆ ที่ผ่านมา จึงทำให้มีบริษัทผู้ผลิตชิปที่มีการรวมคุณสมบัติต่างๆ เอาไว้ครบถ้วนเพื่อใช้งานควบคุมโดยเฉพาะ

โดยในชิปจะประกอบด้วย ไมโครโปรเซสเซอร์ ,พอร์ต,หน่วยความจำข้อมูลขนาดเล็กตลอดจนอาจจะมีพอร์ตใช้งานในการรับส่งข้อมูล(UART) และหน่วยความจำโปรแกรม(ROM)เข้าไปด้วยเพื่อใช้ในระบบควบคุมอย่างเต็มประสิทธิภาพ สามารถประยุกต์ใช้งานง่ายและประหยัดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุปกรณ์เสริมต่างๆ ชิปรวมคุณสมบัติต่างๆดังที่กล่าวมาข้างต้นจึงถูกเรียกว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์ชิปเดี่ยว (Microcontroller Unit ; MCU)นั่นเอง โดยบริษัทผู้ผลิตก็ได้ผลิต MCU ออกมาหลายรูปแบบ ซึ่งจะมีคุณสมบัติและความสามารถที่แตกต่างกันเพื่อให้เหมาะกับงานในรูปแบบที่ต่างกัน จึงทำให้มีการแยกประเภทของ MCU ออกเป็นตระกูลต่างๆ หรือเบอร์ต่างๆ โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของ MCU นั้นๆ และบริษัทผู้ผลิตเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยตระกูลที่ได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับกันดีในหมู่นักศึกษา ตลอดทั้งนักอิเล็กทรอนิกส์สมัครเล่นและมีอาชีพก็คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เนื่องจากมีข้อมูลหรือหนังสือที่เกี่ยวกับ MCU ตระกูลนี้อยู่พอสมควร

2.3.2 คุณสมบัติของ MCS-51

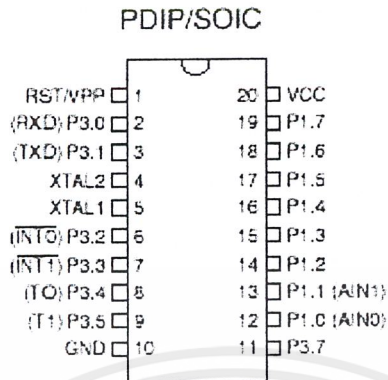
1. ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการสร้างโดยมีทั้งประเภท HMOS, CMOS และ CHMOS ทำงานด้วยแหล่งจ่ายไฟ +5V_{DC} เพียงแหล่งเดียว
 2. มีหน่วยประมวลผลขนาด 8 บิต
 3. สามารถติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกทั้งหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูล
 4. มีพอร์ต I/O 8 บิตแบบขนานสองทิศทาง
 5. พอร์ตใช้งานทุกพอร์ตจะมีลักษณะเป็นพอร์ตแลตช์ (Latch) คงสถานะ
 6. มีขาพอร์ตที่ใช้สำหรับการรับส่งข้อมูลแบบอนุกรม
 7. หนึ่ง Machine cycle จะใช้เวลา 1 ไมโครวินาที โดยใช้ X-TAL 12 MHz
 8. สามารถกำหนดการใช้งานพอร์ต I/O ได้ในระดับ ไบต์หรือ บิตได้โดยตรง
 9. ตัวเลขทางคณิตศาสตร์ใช้ได้ทั้งระบบฐานสองและฐานสิบหก
- ตระกูลของ MCS-51 จะมีทั้งแบบมี EPROM ในตัวหรือไม่มี EPROM ภายในซึ่งจะมีตำแหน่งขาที่เหมือนกัน

2.3.3 ลักษณะการจัดขาภายนอกของ MCS-51

การจัดขาตามลักษณะภายนอก จะมีการแบ่งกลุ่มเป็น 4 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มขาแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง และสัญญาณนาฬิกา
2. กลุ่มขาสำหรับอานาล็อกและรับส่งข้อมูล
3. กลุ่มขาที่ใช้ในการควบคุม
4. กลุ่มขาพอร์ตใช้งานแบบขนานและอนุกรม

พอร์ตใช้งานบางพอร์ตจะทำหน้าที่ได้สองหน้าที่ขึ้นอยู่กับการใช้งานด้วยซอฟต์แวร์หรือการติดตั้งทางฮาร์ดแวร์



รูปที่ 2.11 แสดงการจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

2.3.4 ขาที่สำคัญของไมโครคอนโทรลเลอร์ 1051

1. V_{CC} เป็นขารับแรงดัน ไปกระแสตรง +5 V_{DC}
2. GND เป็นขากราวด์
3. พอร์ต 1 (Port 1) เป็นพอร์ต I/O แบบ 2 ทิศทาง ที่ขาพอร์ต P1.2-P1.7 มีวงจรรยะดับแรงกันภายใน P1.0 และ P1.1 ต้องมีวงจรรยะดับแรงดันต่อภายนอกเมื่อใช้งาน P1.0 และ P1.1 ยังสามารถทำหน้าที่เป็น positive input (AIN0) และ negative input (AIN1) ตามลำดับสำหรับ Analog comparator ที่มีมาพร้อมกับชิป วงจรจับของพอร์ต 1 สามารถขับ โหลดได้ 20 mA และสามารถขับ LED แสดงผลได้โดยตรง
4. พอร์ต 3 (Port 3) เป็นพอร์ต 7 ขา I/O 2 ทิศทางพร้อมวงจรรยะดับแรงดันภายใน P3.6 เป็นขาออกของ Comparator ภายในและไม่สามารถใช้ได้ในการใช้งานทั่วไป วงจรจับ โหลดของพอร์ต 3 สามารถขับได้ 20 mA เมื่อ 1S ถูกส่งไปที่พอร์ต 3 จะถูกยก ระดับแรงดันให้สูงขึ้นโดยวงจรรยะดับแรงดันภายในและสามารถใช้งานเป็นพอร์ต รับข้อมูล
5. ขารีเซต (RST) ใช้สำหรับการรีเซตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยขารีเซต ต้องคงสถานะ high อย่างน้อย 2 Machine cycle ในขณะที่ออสซิลเลเตอร์ยังทำงานอยู่
6. ขา XTAL1 และ XTAL2 เป็นขาใช้งานของวงจรอินเวอร์ตติ้งออสซิลเลเตอร์แอมพลิไฟเออร์ (Inverting Oscillator Amplifier) สำหรับใช้ต่อร่วมกับคริสตอลภายนอก

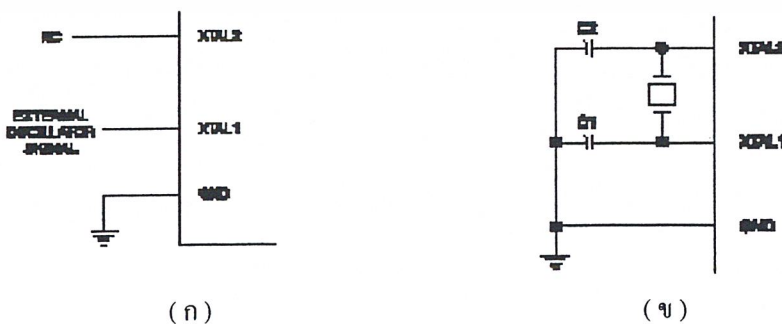
2.3.5 Machine Cycle

ในการทำงานของ MCU นั้นจะถูกกำหนดความเร็วในการทำงานหรือการประมวลผลต่างๆ ด้วยสัญญาณนาฬิกา(Clock)ที่ป้อนให้กับ MCU ไม่ว่าจะเป็นการต่อสัญญาณนาฬิกาโดยตรง ซึ่งวิธีการนี้จะต้องคำนึงถึงชนิดหรือประเภทของ MCU นั้นๆ ด้วยว่าเป็น CMOS, CHMOS หรือ HMOS โดยแต่ละชนิดประเภทจะมีการต่อสัญญาณนาฬิกาโดยตรงที่แตกต่างกันไปจากรูปที่ 2.12 (ก) นั้นจะเป็นตัวอย่างการต่อสัญญาณนาฬิกาโดยตรงจากภายนอกสำหรับ MCU ชนิดประเภท CMOS, HCMOS โดยวิธีการต่อสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกวิธีนี้จะยุ่งยาก และต้องระมัดระวังในการต่อใช้งาน วิธีการที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข) จะเป็นการใช้ X-TAL ในการกำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้กับ MCU ซึ่งจะมีความแน่นอนและมีวงจรการใช้งานที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีแรก แต่ต้องคำนึงถึงการเลือกใช้ความถี่ของ X-TAL ให้เหมาะสมกับประเภทและชนิดของงานด้วย เพราะ X-TAL ยิ่งมีความถี่มากก็จะเป็นตัวกำเนิดสัญญาณรบกวนมากเช่นกัน การแก้ไขสัญญาณรบกวนในเบื้องต้นนั้นให้ทำการชิลด์(Shield)หรือต่อตัวถัง X-TAL ลงกราวด์ก็จะแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนได้บ้าง

สัญญาณนาฬิกาจะเป็นตัวควบคุมการทำงาน การประมวลผลคำสั่งต่างๆ ของ MCU โดยในการประมวลผลคำสั่งของ MCS-51 จะทำงานเป็นรอบวัฏจักรของภาษาเครื่อง หรือที่เรียกว่า Machine Cycle โดย 1 Machine Cycle จะใช้ช่วงเวลาในการทำงานเท่ากับคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาจำนวน 12 ลูก(12 Oscillator period)จากคุณสมบัติข้างต้นเราสามารถ คำนวณเวลาการทำงานใน 1 Machine Cycle โดย 1 Machine Cycle ของ MCS-51 จากความถี่ของ X-TAL ที่เลือกนำมาใช้งานได้จากสมการ

$$1 \text{ Machine Cycle} = 12 / X\text{-TAL oscillator (second)}$$

เมื่อเรารู้ระยะเวลาในการทำงานใน 1 Machine Cycle ของ MCU แล้ว จะช่วยให้สามารถประมาณช่วงเวลาในการทำงานของคำสั่งแต่ละคำสั่งในการเขียนโปรแกรมได้ ซึ่งแต่ละคำสั่งจะถูกกำหนดการทำงานเป็น Machine Cycle เช่นกัน

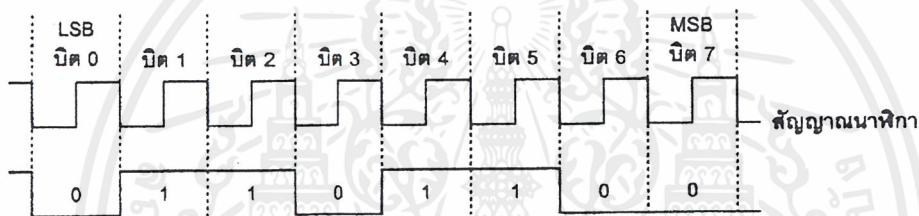


รูปที่ 2.12 (ก) แสดงตัวอย่างการต่อสัญญาณนาฬิกาโดยตรงจากภายนอก

(ข) แสดงการใช้ X-TAL ในการกำเนิดสัญญาณนาฬิกาให้กับ MCU

2.4 การสื่อสารแบบอนุกรม

การสื่อสารแบบอนุกรมนั้นจะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือการสื่อสารอนุกรมแบบซิงโครนัส และการสื่อสารอนุกรมแบบอะซิงโครนัส การสื่อสารแบบซิงโครนัสจะมีสัญญาณนาฬิกา ร่วมอยู่กับการรับและส่งสัญญาณด้วย ตัวอย่างการส่งข้อมูลแบบซิงโครนัสก็คือคีย์บอร์ดของคอมพิวเตอร์ ซึ่งสายเส้นหนึ่งจะเป็นสายของสัญญาณนาฬิกา ส่วนสายอีกเส้นจะเป็นสายของข้อมูล ดังนั้นการติดต่อกันแบบซิงโครนัสนี้จะต้องใช้สายในการเชื่อมต่ออย่างน้อยที่สุด 3 เส้นคือ สัญญาณนาฬิกา ข้อมูล และกราวด์ รูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงไทม์มิงไคอะแกรมของการส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส



รูปที่ 2.13 รูปแบบอย่างง่ายที่สุดของข้อมูลอนุกรม

2.4.1 การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส

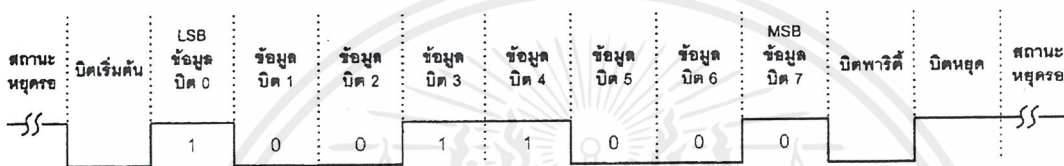
การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัสคือการรับและส่งข้อมูลไปในสายโดยไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิกา ร่วมด้วยเหมือนกับการรับส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส แต่จะใช้การกำหนดค่าสัญญาณนาฬิกาทั้งภาครับและภาคส่งให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งเรียกสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการกำหนดค่าให้ภาครับและภาคส่งนี้ว่า อัตราการถ่ายทอกข้อมูล หรือ บอดเรต (baudrate) มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที (bit per second : bps)

รูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งแบบอะซิงโครนัสประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกันคือ

1. บิตเริ่มต้น (Start Bit) ซึ่งจะมีขนาด 1 บิต
2. บิตข้อมูลแบบอนุกรมจะมีขนาด 5,6,7 หรือ 8 บิต
3. บิตตรวจสอบพาริตี (Parity Bit) จะมีขนาด 1 บิตหรือไม่มี
4. บิตปิดท้าย (Stop Bit) จะมีขนาด 1,1.5 หรือ 2 บิต

รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบของข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส ซึ่งเมื่อไม่มีข้อมูลที่จะส่ง ขา

DATA จะมีสถานะลอจิก “1” ซึ่งจะเรียกสถานะนี้ว่าสถานะหยุดรอ (waiting stage) การเริ่มต้นส่งข้อมูลจะเริ่มจากการให้ขา DATA มีลอจิก “0” ด้วยช่วงระยะเวลา 1 บิต ซึ่งจะเรียกบิตนี้ว่าบิตเริ่มต้น จากนั้นบิตข้อมูลจะถูกส่งออกไป โดยเริ่มจากบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด (LSB) ก่อน ซึ่งข้อมูลในไบต์ที่จะส่งอาจจะมีจำนวนบิต 5,6,7 หรือ 8 บิตก็ได้ จากนั้นจะตามด้วยบิตพาริตี ซึ่งใช้เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งข้อมูล บิตสุดท้ายที่จะส่งคือบิตปิดท้าย ซึ่งจะให้ขา DATA มีสถานะลอจิก 1 อีกครั้งด้วยระยะเวลาอย่างน้อย 1 บิต, 1.5 บิต หรือ 2 บิต เพื่อเป็นการแสดงว่าสิ้นสุดข้อมูลแล้ว



รูปที่ 2.14 รูปแบบอย่างง่ายที่สุดของข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส

อุปกรณ์พิเศษที่ได้รับการออกแบบมาสำหรับการรับและส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสเรียกว่า Universal Asynchronous Receiver/Transmitter หรือ UART อัตราความเร็วในการรับและส่งข้อมูลของการรับส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสคือ ค่าบอดเรต ซึ่งก็คือค่าจำนวนบิตต่อวินาทีที่ใช้ในการรับและส่งข้อมูล บอดเรตมาตรฐานที่ใช้สำหรับพอร์ตอนุกรม RS-232 ได้แก่ 110,150,300,600,1200,2400,4800,9600 และ 19200 บิตต่อวินาที และมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามเทคโนโลยีของคอมพิวเตอร์ซึ่งการรับส่งแบบอนุกรมโดยไม่ผ่านโมเด็มอาจจะสามารถกำหนดค่าบอดเรตได้สูงถึง 115200 บิตต่อวินาที เนื่องจากบอดเรตคือจำนวนบิตของข้อมูลที่สามารถถ่ายทอดได้ภายใน 1 วินาที ยกตัวอย่าง ข้อมูลอนุกรมถูกส่งในลักษณะ 8 บิต ไม่มีการตรวจสอบพาริตี มีบิตเริ่มต้น 1 บิต และบิตปิดท้าย 1 บิต ความยาวของข้อมูลที่ได้รับส่งนี้เท่ากับ 10 บิต ถ้าใช้บอดเรตในการส่งข้อมูลเท่ากับ 9600 บิตต่อวินาที ก็จะสามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็ว 960 ไบต์ต่อวินาที และถ้ามีการใช้พาริตีความเร็วในการรับส่งข้อมูลจะเหลือเป็น 872 ไบต์ต่อวินาที

การตรวจสอบพาริตีสามารถกำหนดให้เป็นแบบคี่ (odd), แบบคู่ (even) หรือไม่มีการตรวจสอบพาริตีก็ได้ การตรวจสอบพาริตีเป็นการตรวจสอบจำนวนรวมของบิตที่เป็นลอจิก “1” ภายในข้อมูลที่ส่งไป 1 ไบต์ว่ามีจำนวนรวมเป็นเลขคู่หรือเลขคี่โดยต้องรวมบิตพาริตีเข้าไปด้วย ยกตัวอย่างข้อมูลที่ทำการส่งมีขนาด 8 บิตและมีค่าเท่ากับ 99 ฐานสิบหก หรือ 10011001 ฐานสอง จะเห็นว่าข้อมูลในไบต์นี้มีจำนวนลอจิก “1” จำนวน 4 ตัวซึ่งเป็นเลขคู่ ดังนั้นถ้ากำหนดค่าพาริตีเป็นคู่ค่าในบิตพาริตี จะต้องมีลอจิกเป็น “0” แต่ถ้าพาริตีเป็นคี่ ค่าที่บิตพาริตีจะต้องเป็น “1” เพื่อให้ข้อมูล 1 ไบต์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมทั้งบิตพาริตีที่มีจำนวนบิตที่เป็นลอจิก “1” มีจำนวนรวมกันเป็นเลขคี่ ในตารางที่ 2.13 แสดงตัวอย่างของบิตพาริตีในการรับส่งข้อมูลอนุกรม

บิตพาริตีถูกสร้างขึ้นจากภาคส่งข้อมูลของ UART ซึ่งทางภาครับจะต้องทำการกำหนดคุณสมบัติการตรวจสอบพาริตีให้ตรงกันว่าจะตรวจสอบพาริตีคี่หรือพาริตีคู่ จากนั้นภาครับของ UART จะทำการตรวจสอบค่าพาริตีที่เกิดขึ้นว่าเป็นคู่หรือเป็นคี่ โดยการนับจำนวนลอจิก “1” ทั้งหมดรวมทั้งบิตพาริตีด้วย กำหนดพาริตีไว้เป็นคู่แต่อ่านค่าตัวเลขในการนับออกมาได้เรียงเลขเป็นคี่ทางภาครับจะแสดงข้อผิดพลาดออกมาให้ผู้ใช้งานทราบ นับเป็นการตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการถ่ายทอดข้อมูลที่ง่ายที่สุด แต่จะเชื่อถือได้เมื่อมีบิตข้อมูลที่ทำการส่งผิดพลาดเพียงบิตเดียวเท่านั้น ถ้าข้อมูลที่ทำการส่งมีบิตที่ผิดพลาดมากกว่า 1 บิต การตรวจสอบด้วยวิธีนี้จะไม่ได้ผล สำหรับการตั้งพาริตีบิตเป็น NONE นั้นทั้งภาครับและภาคส่ง จะไม่มีการตรวจสอบพาริตี

คอมพิวเตอร์ในรุ่น AT เกือบทั้งหมดจะใช้ UART เบอร์ 16450 และ 16550 ส่วนคอมพิวเตอร์ในรุ่น XT ใช้ UART เบอร์ 8250 UART ชิปเหล่านี้มีระดับแรงดันเป็นแบบทีทีแอล (0 และ +5V) แต่เพื่อให้มีแรงดันเป็นไปตามมาตรฐาน RS-232 และเพื่อให้การรับส่งข้อมูลสามารถทำได้ที่ระยะไกลมากขึ้น ระดับแรงดันทีทีแอลจะถูกแปลงเป็นระดับแรงดันที่สูงขึ้น โดยลอจิก “0” มีระดับแรงดัน +3V ถึง +12V ในขณะที่ลอจิก “1” มีระดับแรงดัน -3V จนถึง -12V

2.4.2 มาตรฐานพอร์ตอนุกรมแบบ RS-232

มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบอนุกรม RS-232 เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลอนุกรมแบบอะซิงโครนัส 2 ทิศทาง โดยมาตรฐาน RS-232 ในอดีตนั้นถูกออกแบบมาเพื่อการส่งผ่านข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ไปยังโมเด็มเพียงอย่างเดียว เพื่อที่จะนำข้อมูลจากโมเด็มนี้สื่อสารผ่านสายโทรศัพท์ไปยังคอมพิวเตอร์อีกชุดซึ่งอยู่ห่างไกลกัน โดยคณะกรรมการที่เรียกว่า สมาคมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Industries association : EIA) ได้วางมาตรฐานที่มีชื่อเรียกกันว่า EIA RS-232 มาตรฐานนี้ในช่วงแรกจะใช้คอนเน็กเตอร์เป็นแบบ DB-25 โดยกำหนดความยาวสูงสุดของสายสัญญาณไว้ที่ 50 ฟุต มีระดับสัญญาณตั้งแต่ -3 ถึง -12V แสดงว่ามีข้อมูล (Mark) และ +3 ถึง +12V แสดงว่าเป็นช่องว่าง (Space)

มาตรฐาน RS-232 ได้กำหนดรูปแบบของอุปกรณ์เชื่อมต่อข้อมูล (Data Terminal Equipment : DTE) กับวงจรข้อมูลปลายทาง (Data Circuit Terminating :DCE) ไว้ว่า อุปกรณ์ DTE จะต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีการประมวลผลในตัวเช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความสามารถในการสร้างบิตข้อมูลแบบอนุกรมได้ ส่วนอุปกรณ์ DCE จะทำหน้าที่เป็นเพียงตัวรับ

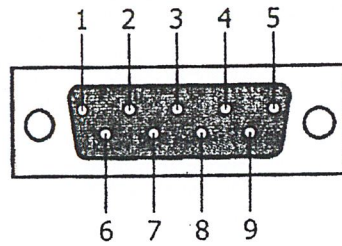
ข้อมูลที่ส่งมาจาก DTE เท่านั้น โดยการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองจะกระทำผ่านมาตรฐาน RS-232

ข้อแตกต่างของอุปกรณ์ DTE และอุปกรณ์ DCE อย่างหนึ่งที่ได้เห็นได้ชัดคือ คอนเน็กเตอร์ของ DTE จะเป็นตัวผู้ ส่วนคอนเน็กเตอร์ของ DCE จะเป็นตัวเมีย ซึ่งพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะเป็นแบบ DTE ส่วนคอนเน็กเตอร์ที่อยู่ทีโมเด็มจะเป็นแบบ DCE

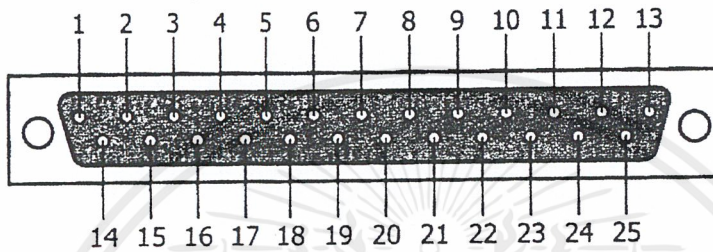
สำหรับการใช้งานบนคอมพิวเตอร์ พอร์ตอนุกรม RS-232 มักถูกใช้เชื่อมต่อกับโมเด็มหรือเมาส์ โดยสามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยความยาวของสายสัญญาณสูงสุดถึง 20 เมตร

2.4.3 คอนเน็กเตอร์สำหรับพอร์ต RS-232 และการเชื่อมต่อ

มาตรฐานการเชื่อมต่อแบบ RS-232 จะใช้คอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 ตัวผู้หรือ DB-9 ตัวผู้ซึ่งคอนเน็กเตอร์แบบ DB-25 จะมีขาต่อใช้งานเพียง 9 เส้นเช่นเดียวกับคอนเน็กเตอร์แบบ DB-9 เนื่องจากขาอื่นๆ ที่เคยใช้งานในอดีต ปัจจุบันมีการใช้งานไม่มากนัก จึงถูกยกเลิกไป โดยแสดงรูปร่างและตำแหน่งขาในรูปที่ 2.15



(ก) คอนเน็กเตอร์อนุกรม 9 ขาหรือแบบ DB-9 (มองจากด้านหลังคอมพิวเตอร์)



(ข) คอนเน็กเตอร์อนุกรม 25 ขาหรือแบบ DB-25 (มองจากด้านหลังคอมพิวเตอร์)

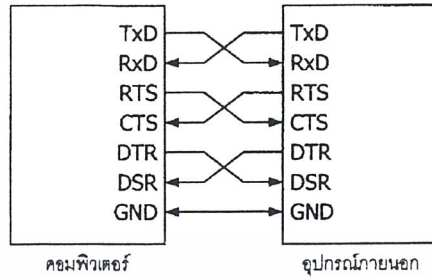
คอนเน็กเตอร์ DB-9	คอนเน็กเตอร์ DB-25	ชื่อของสายสัญญาณ	ชนิดของสายสัญญาณ
1	8	Data Carrier Detect : DCD	อินพุต
2	3	Received Data : RxD	อินพุต
3	2	Transmitted Data : TxD	เอาต์พุต
4	20	Data Terminal Ready : DTR	เอาต์พุต
5	7	Signal Ground : GND	-
6	6	Data Set Ready : DSR	อินพุต
7	4	Request To Send : RTS	เอาต์พุต
8	5	Clear To Send : CTS	อินพุต
9	22	Ring Indicator : RI	อินพุต

รูปที่ 2.15 การจัดขาของคอนเน็กเตอร์พอร์ตอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232 ทั้งแบบ DB-9 และ DB-25

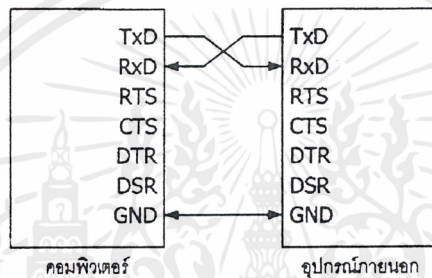
สำหรับการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกแสดงดังในรูปที่ 2.16 ลูกศรในรูปแสดงถึงทิศทางของข้อมูล ในรูปที่ 2.16 (ก) เป็นการเชื่อมต่อแบบ Null modem หรือการเชื่อมต่อแบบต่อโดยตรงโดยไม่ต้องผ่านโมเด็ม โดยมีการตรวจสอบหรือแฮนด์เช็กเต็มรูปแบบ ส่วนในรูปที่ 2.16 (ข) เป็นการเชื่อมต่อแบบ Null modem ในลักษณะที่ใช้สายสัญญาณเพียง 3 เส้น โดยเส้นหนึ่งสำหรับส่งข้อมูล อีกเส้นสำหรับรับข้อมูล และเส้นสุดท้ายเป็นกราวด์ สำหรับรายละเอียดหน้าที่การทำงานในแต่ละขาของพอร์ตอนุกรม RS-232 มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Data Carrier Detect : DCD หรืออาจเรียกว่า Carrier Detect : CD ขานี้จะแอกทีฟเมื่อมีการส่งสัญญาณพาห์จากอุปกรณ์สื่อสารข้อมูล เช่น โมเด็ม สำหรับการใช้งานปกติ ขานี้จะไม่ได้ถูกใช้งานมากนัก
2. Receive Data : RD หรือ RxD ขานี้ใช้เพื่อรับสัญญาณอนุกรมเข้ามายังคอมพิวเตอร์ โดยนำข้อมูลทีอ่านได้เก็บไว้ในรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์
3. Transmitted Data : TD หรือ TxD ขานี้ใช้เพื่อส่งข้อมูลออกจากคอมพิวเตอร์ โดยนำข้อมูลที่เก็บอยู่ในบัฟเฟอร์สำหรับส่งข้อมูลส่งออกไป
4. Data Terminal Ready : DTR เป็นขาสัญญาณที่ส่งออกจากคอมพิวเตอร์เพื่อให้อุปกรณ์ปลายทางรับรู้ว่าการติดต่อด้วย โดยขา DTR นี้จะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของอุปกรณ์ปลายทาง และขา DTR ของอุปกรณ์ปลายทางจะต้องเชื่อมต่อกับขา DSR ของคอมพิวเตอร์ ถ้าใช้การเชื่อมต่อเป็นแบบ Null Modem ซึ่งใช้สายในการเชื่อมต่อเพียง 3 เส้น จะต้องต่อขา DTR และ DSR ของตัวมันเองเข้าด้วยกันและต้องต่อกับขา DCD ด้วย ในกรณีที่โปรแกรมสื่อสารที่ใช้มีการตรวจจับสัญญาณพาห์
5. Signal Ground : GND ขากราวด์ของระบบ
6. Data Set Ready : DSR ขานี้จะถูกใช้คู่กับขา DTR เพื่อตรวจสอบการเชื่อมต่อกันระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ปลายทาง ซึ่งขา DSR นี้จะเป็นขาสำหรับรับข้อมูลจากภายนอกซึ่งถูกส่งมาจากขา DTR
7. Request To Send : RTS เป็นขาสำหรับส่งสัญญาณร้องขอให้ทางอุปกรณ์ปลายทางส่งข้อมูลกับมายังคอมพิวเตอร์ โดยขาที่รับสัญญาณ RTS ก็คือขา CTS ในกรณีที่ใช้การเชื่อมต่อแบบ Null modem 3 สาย จะต้องเชื่อมต่อกับขา RTS และ CTS ของตัวมันเองเข้าด้วยกัน เพื่อให้การรับและส่งข้อมูลสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา
8. Clear To Send : CTS ขานี้จะคอยรับสัญญาณจากขา RTS เมื่อรับสัญญาณได้ ข้อมูลที่ขา TxD จะถูกส่งออกไป ดังนั้นขานี้จึงถูกใช้เพื่อตรวจสอบอุปกรณ์ต่อพ่วงว่าพร้อมที่จะรับข้อมูลหรือไม่
9. Ring indicator : RI ใช้แสดงสถานะสัญญาณเรียกจากสายโทรศัพท์ ปกติในการสื่อสารโดยทั่วไปสายนี้จะไม่ถูกใช้งาน จะใช้งานก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมต่อกับ โมเด็มและโปรแกรมมีการตรวจสอบสัญญาณนี้เท่านั้น



(ก) การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์ แบบ Null modem



(ข) การต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์ แบบ RS-232 โดยใช้สายสัญญาณเพียง 3 เส้น

รูปที่ 2.16 การต่ออุปกรณ์ภายนอกกับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ในลักษณะต่างๆ

2.4.4 UART

UART มาจากคำว่า Universal Asynchronous Receiver Transmitter ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสนั่นเอง สำหรับการสื่อสารอนุกรมบนคอมพิวเตอร์แล้ว UART ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของการสื่อสารอนุกรม

หน้าที่หลักของ UART คือทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบขนานจากคอมพิวเตอร์ให้อยู่ในรูปแบบอนุกรมแบบอะซิงโครนัส แล้วส่งออกไป และทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนุกรมแบบอะซิงโครนัสที่ป้อนเข้ามายัง UART ให้เป็นแบบขนานก่อนที่จะส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ซึ่งนอกจาก UART จะส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์แล้ว ยังแจ้งข้อมูลอื่นๆ ให้คอมพิวเตอร์รับทราบด้วย เช่น อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล (บอดเรต), รูปแบบการส่งข้อมูล, ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างการถ่ายทอดข้อมูล (ผิดพลาดจากพริตตีเฟรมข้อมูล, โอเวอร์รัน) เป็นต้น

ภายในUART จะมีส่วนของวงจรสร้างบอดเรตแบบโปรแกรมได้ (programmable buadrate generator) โดยการกำหนดค่าตัวหารให้กับสัญญาณนาฬิกาของ UART โดยตัวหารนี้มีขนาด 16 บิต ดังนั้นจึงสามารถกำหนดตัวหารอยู่ในช่วง 1-65,535 UART สามารถรับส่งข้อมูลได้ทั้งแบบฮาล์ฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คูเพล็กซ์ (half duplex) และฟูลคูเพล็กซ์ (full duplex) โดยการส่งแบบฮาล์ฟคูเพล็กซ์เป็นการส่งแบบทิศทางเดียว ส่วนการส่งแบบฟูลคูเพล็กซ์นั้นสามารถรับและส่งข้อมูลได้ในคราวเดียวกัน

ชนิดของ UART ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไปมี UART ที่ใช้งานกันอยู่ 2 เบอร์คือ 8250 ซึ่งเป็น UART มาตรฐานที่มีใช้กันมาช้านาน UART เบอร์นี้จะมีบัฟเฟอร์สำหรับรับและส่งข้อมูลตำแหน่งเดียวกัน ทำให้การรับและส่งข้อมูลถูกจำกัดความเร็วอยู่ที่ 57.6 กิโลบิตต่อวินาทีเท่านั้น แต่ UART เบอร์นี้ก็ถือว่าเป็นต้นแบบของ UART ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ โดยคอมพิวเตอร์ทุกๆ รุ่นจะต้องสนับสนุนการทำงานตามรูปแบบของ UART เบอร์นี้

UART อีกเบอร์หนึ่งคือ 16450 มีความสามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็ว 115,200 บิตต่อวินาที และเพิ่มรีจิสเตอร์สำหรับพักข้อมูลสำหรับ UART นอกจากนี้ยังเพิ่มส่วนของชิปรีจิสเตอร์แบบ FIFO (First In First Out) ขนาด 16 ไบต์เข้าไป ทำให้สามารถสนับสนุนความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่ 256 กิโลบิตต่อวินาทีได้ โดยคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันใช้ UART เบอร์นี้หรือใหม่กว่า เช่น เบอร์ TL16C750 ซึ่งมีรีจิสเตอร์แบบ FIFO ขนาด 64 ไบต์ ทำงานได้ที่ระดับแรงดัน +5V และ +3V มีโหมดประหยัดพลังงาน สามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็ว 1 เมกกะบิตต่อวินาที เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz

อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการส่งข้อมูลที่มากมายของ UART เบอร์ใหม่ๆ ก็ไม่ได้ช่วยให้การรับส่งข้อมูลของคอมพิวเตอร์เร็วขึ้น เนื่องจากว่าคอมพิวเตอร์ยังใช้ความถี่ของสัญญาณนาฬิกาในการแปลงข้อมูลเพียง 1.8432 MHz เท่านั้น

2.4.5 วงจรภายในและรีจิสเตอร์ของพอร์ตอนุกรม RS-232

เครื่องคอมพิวเตอร์โดยทั่วไปสามารถต่อพอร์ตอนุกรม RS-232 สูงสุดได้ 4 พอร์ต ซึ่งจะมีชื่อเรียกเป็น COM1, COM2, COM3 และ COM4 ซึ่งพอร์ตอนุกรมแต่ละตัวต่างก็ใช้งาน UART ภายในคอมพิวเตอร์ในการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกเช่นเดียวกัน

ในรูปที่ 2.17 แสดงไคอะแกรมทำงานภายในของพอร์ตอนุกรม ซึ่งประกอบด้วยรีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต 8 ตัวที่ใช้งานร่วมกับ UART แอแดคเรสของรีจิสเตอร์ภายในพอร์ตอนุกรมสามารถคำนวณได้จากค่ารีจิสเตอร์พื้นฐานของพอร์ตอนุกรม ยกตัวอย่าง พอร์ตอนุกรม COM1 มีแอดเดคเรสอยู่ที่ 3F8H ตำแหน่งของรีจิสเตอร์ต่างๆ จะเป็นตำแหน่งที่บวกเข้าไปกับค่า 3F8H โดยรีจิสเตอร์ที่ใช้งานกับพอร์ตอนุกรมมีดังนี้

00H เป็นรีจิสเตอร์บัฟเฟอร์สำหรับเก็บข้อมูลที่รับเข้ามาหรือเตรียมข้อมูลก่อนที่จะส่งออกไป

01H รีจิสเตอร์อีนาเบิ้ลการอินเตอร์รัปต์ ใช้ในการเซตโหมดการอินเตอร์รัปต์ของพอร์ตอนุกรม

02H รีจิสเตอร์แสดงโหมดการอินเตอร์รัปต์ ใช้เพื่อตรวจสอบโหมดของการอินเตอร์รัปต์เมื่อมีการอินเตอร์รัปต์เกิดขึ้น

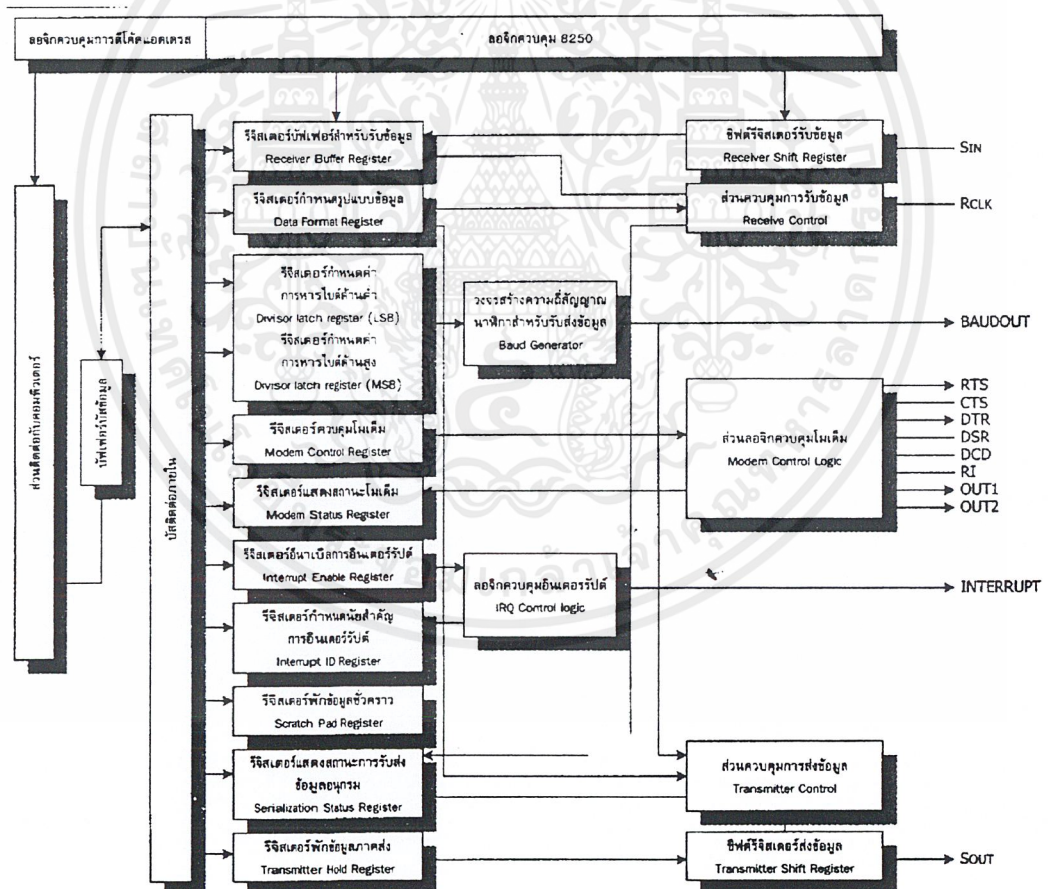
03H รีจิสเตอร์กำหนดรูปแบบของข้อมูล

04H รีจิสเตอร์ควบคุมโมเด็ม ใช้ตรวจสอบบิตสำหรับติดต่อกับ โมเด็ม เช่น RTS หรือ DTR

05H รีจิสเตอร์แสดงสถานะการรับและการส่งข้อมูลแบบอนุกรม

06H รีจิสเตอร์แสดงสถานะของ โมเด็ม ซึ่งจะแสดงสถานะของขา DCD,RI,DSR และ CTS

07H รีจิสเตอร์สำหรับการเก็บข้อมูลชั่วคราว



รูปที่ 2.17 ไคอะแกรมการทำงานภายในของพอร์ตอนุกรมของเครื่องคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.6 ลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของพอร์ต RS-232

สัญญาณเอาต์พุตที่ใช้ควบคุม (RTS และ DTR) และสัญญาณแสดงสถานะอินพุต (CTS, DSR และ DCD) ของพอร์ตอนุกรม RS-232 จะถูกกลับสถานะภายในตัว UART ส่วนสัญญาณข้อมูลทั้งภาคส่งและรับจะไม่ถูกกลับสถานะ UART จะให้ระดับสัญญาณเอาต์พุตออกมาเป็นแบบที่ที่แอลเท่านั้น ดังนั้นเมื่อสัญญาณถูกส่งออกมาจาก UART จึงต้องส่งเข้าสู่วงจรขับเพื่อปรับระดับแรงดันให้ได้ระดับสัญญาณเป็นไปตามมาตรฐาน RS-232 ก่อนส่งออกไปจากคอมพิวเตอร์สำหรับอุปกรณ์ต่อเชื่อมปลายทางก็จะต้องมีวงจรขับในลักษณะนี้เช่นเดียวกัน เพื่อให้ได้ระดับสัญญาณในระดับเดียวกัน แต่วงจรขับที่ใช้ทั้งภายในคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ต่อเชื่อมปลายทางนั้นจะถูกกลับสถานะ ดังแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.18

2.4.7 แอดเดรสของพอร์ตอนุกรม

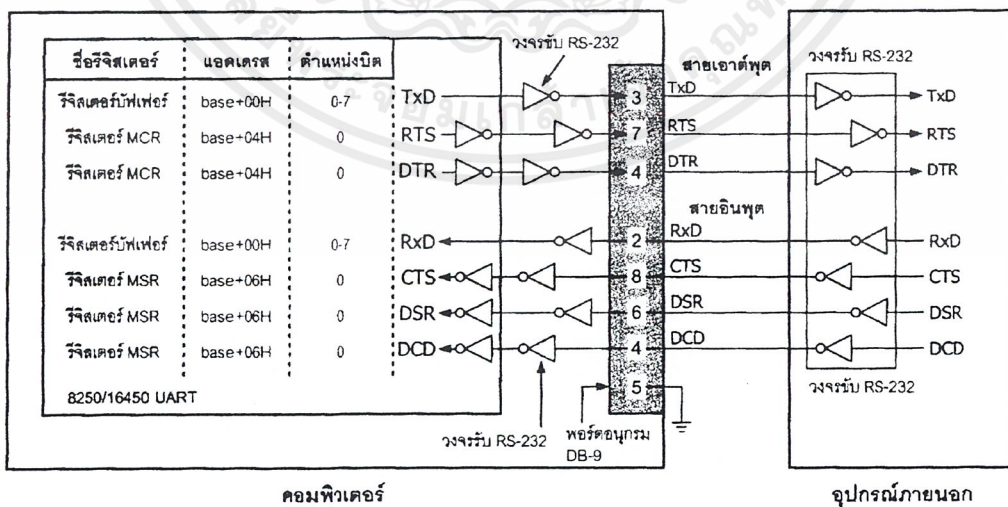
แอดเดรสพื้นฐานของพอร์ตอนุกรมมี 4 ตำแหน่งดังนี้คือ

COM1 : 3F8H

COM2 : 2F8H

COM3 : 3E8H

COM4 : 2E8H



รูปที่ 2.18 ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของพอร์ตอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเริ่มเปิดเครื่องเพื่อใช้งานคอมพิวเตอร์ ไบออสภายในคอมพิวเตอร์จะทำการตรวจสอบแอดเดรสของพอร์ตอนุกรมทั้งหมด ถ้าไบออสตรวจพบแอดเดรสของพอร์ตอนุกรม ไบออสจะนำแอดเดรสที่ตรวจพบไปเก็บไว้ในหน่วยความจำขนาด 2 ไบต์ สำหรับพอร์ตอนุกรม COM1 จะเก็บไว้ที่แอดเดรส 0000:0400H และ 0000:0401H ส่วนตำแหน่งอื่นๆ มีรายละเอียดดังนี้

COM2 = 0000:0402H – 0000:0403H

COM3 = 0000:0404H – 0000:0405H

COM4 = 0000:0406H – 0000:0407H

นอกจากนี้ที่หน่วยความจำแอดเดรส 0000:0411H ยังใช้สำหรับแสดงจำนวนของพอร์ตอนุกรมที่มีอยู่ในคอมพิวเตอร์อีกด้วยโดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.1

บิต3	บิต2	บิต1	จำนวนพอร์ต
0	0	0	ไม่มีพอร์ตอนุกรม
0	0	1	มีพอร์ตอนุกรม 1 พอร์ต
0	1	0	มีพอร์ตอนุกรม 2 พอร์ต
0	1	1	มีพอร์ตอนุกรม 3 พอร์ต
1	0	0	มีพอร์ตอนุกรม 4 พอร์ต

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลในแอดเดรส 0000:0411H ที่ใช้แจ้งจำนวนพอร์ตอนุกรม

2.5 FPGA (Field Programmable Gate Array)

FPGA เป็นชิพในลักษณะของ Programmable Device ที่เราสามารถโปรแกรมตัวมันให้สามารถเป็นวงจรดิจิทัลใดๆ ก็ได้ โครงสร้างข้างในประกอบด้วยอาร์เรย์ของลอจิกเกตต่างๆ มากมาย ซึ่งในปัจจุบันความจุเกิดภายในตัว FPGA chip นั้นได้เพิ่มขึ้นจากระดับไม่กี่พันตัว เป็นถึงล้านตัว ดังนั้นจึงรองรับวงจรดิจิทัลที่สลับซับซ้อนได้รวมถึงความเร็วในการทำงานที่ได้เปรียบอย่างมาก ภายเมื่อเทียบกับไมโครโปรเซสเซอร์ทั่วไป นอกจากนี้ ในด้านการออกแบบ พัฒนาและทดสอบ ก็ทำได้ง่าย เนื่องจากเราสามารถโปรแกรมได้เอง และหลายๆ ครั้ง จึงไม่มีความเสี่ยงใดๆ ทั้งสิ้น และในปัจจุบันการออกแบบที่เป็น FPGA based IC Design นั้นเป็นที่นิยมทำกัน และมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้งานกันมากขึ้นเรื่อยๆ

2.5.1 เทคโนโลยีของ FPGA

เนื่องจากเป็นลักษณะของชิพที่สามารถโปรแกรมได้ นั่นก็คือสามารถกำหนดจุดเชื่อมต่อต่างๆ ภายในได้ เพื่อประกอบเป็นลักษณะของวงจรตามที่เราต้องการ ซึ่งเราสามารถแบ่งลักษณะของจุดเชื่อมต่อต่างๆ ได้ดังนี้

1. Physical Changing
 - 1.1 Fused สามารถโปรแกรมได้เพียงครั้งเดียว หลังจากโปรแกรมจุดเชื่อมต่อจะขาดจากกัน
 - 1.2 Anti-fused สามารถโปรแกรมได้เพียงครั้งเดียว หลังจากโปรแกรมจุดเชื่อมต่อจะเชื่อมถึงกัน
2. Memory-Based จะใช้หน่วยความจำเป็นตัวเก็บข้อมูลที่จะควบคุมให้จุดเชื่อมต่อต่างๆ ทำงานหรือไม่ทำงาน
 - 2.1 ROM based สามารถโปรแกรมได้หลายครั้ง (10,000) และข้อมูลโปรแกรมจะอยู่ได้ตลอดเวลา
 - 2.2 RAM based โปรแกรมได้ตลอดไม่จำกัดครั้ง ข้อมูลโปรแกรมจะอยู่ได้ต้องมีไฟเลี้ยง

ลักษณะแต่ละเทคโนโลยีจะมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบกัน แต่ส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะเป็นลักษณะของ Memory-based เนื่องจากสามารถโปรแกรมได้หลายครั้ง ของ ROM-based มีความจุค่อนข้างต่ำ (ประมาณไม่เกิน 20,000 ตัว) ส่วนของ RAM-based จะมีความจุสูงมาก (เป็นระดับเอกล 10,000-1,000,000 ตัว) สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ ตัวอุปกรณ์ FPGA นั้นก็มีโครงสร้างพื้นฐาน เทคโนโลยีที่ใช้สร้างตลอดจนเทคนิควิธีการโปรแกรมที่แตกต่างสำหรับผู้ผลิตแต่ละราย แสดงดังตารางที่ 1

Product	Gate Count	Architecture	Basic Cell	Programming Method
Actel	2,000-36,000	Gate Array	MUX	Antifirse
Altera	1,000-20,000	Extended PLA	PLA	EPROM
Lucent ORCA	3,500-99,400	Matrix	RAM	SRAM
Xilinx	2,000-62,000	Matrix	RAM block	SRAM

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างอุปกรณ์ FPGA

2.5.2 ออกแบบโดยใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ (Hardware Description Language)

ในการออกแบบวงจรดิจิทัล(digital)นั้น ทำได้โดยการวาดวงจร(schematic drawing) หรือใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ (Hardware Description Language) ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ไม่แตกต่างกันระหว่างการออกแบบด้วย FPGA และ ASIC ในกรณีที่ใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ แต่ในกรณีที่ออกแบบโดยวิธีการวาดวงจรจะต่างกันโดยที่การทำวิธีนี้ผู้ทำการออกแบบต้องคำนึงถึงเทคโนโลยีที่จะใช้ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีก็มีความแตกต่างกันไป จะเห็นได้ว่าออกแบบโดยใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ทำได้สะดวกกว่าเพราะการทำวิธีนี้ผู้ออกแบบไม่ต้องคำนึงถึงเทคโนโลยีที่จะใช้ และทำสำคัญการออกแบบโดยวิธีนี้สามารถแก้ไข โมเดล (model) หรือเปลี่ยนเทคโนโลยีได้สะดวกกว่าเพราะไม่ต้องวาดวงจรใหม่ นั่นคือการออกแบบโดยใช้ภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์จะทำให้โมเดลที่ได้ไม่ขึ้นกับเทคโนโลยี สำหรับภาษาอธิบายฮาร์ดแวร์ที่ใช้ก็มี VHDL และ AHDL แต่ในโครงงานนี้เราจะใช้ภาษา AHDL ในการอธิบายโปรแกรม ในการเขียนโค้ด (code) นั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือ จะต้องเขียนอย่างไรจึงจะสามารถสังเคราะห์เป็นวงจรได้ และให้โมเดลที่มีคุณสมบัติถูกต้องตามข้อกำหนด เพราะลักษณะการเขียน โค้ดจะมีผลโดยตรงกับโมเดลที่ได้ เนื่องจากในการสังเคราะห์วงจรนั้นซอฟต์แวร์สังเคราะห์วงจร (Synthesis Tools) จะสังเคราะห์วงจรตามโค้ด เช่นในการเขียนโค้ด AHDL อธิบายการทำงานของโมเดลวงจรอันเดียวกัน แต่เขียนโค้ดในลักษณะที่ต่างกัน เมื่อสังเคราะห์จะได้วงจรต่างกัน และจากวงจรที่ต่างกัน เมื่อนำไปทำต้นแบบด้วย FPGA แล้วจะได้ไอซีที่มีคุณสมบัติต่างกันทั้งในด้านของขนาดและความเร็ว ดังนั้นในการออกแบบในขั้นตอนนี้ผู้ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ ส่วนการที่จะเขียนโค้ดในลักษณะใดเพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุดนั้นก็ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบ

2.5.3 การสังเคราะห์วงจร (Logic Synthesis)

ในขั้นตอนนี้จะใช้ซอฟต์แวร์สังเคราะห์วงจร (synthesis tools) ทำการสังเคราะห์โค้ด AHDL เพื่อให้ได้เป็นวงจรขึ้นมา ซึ่งทำได้โดยใช้ซอฟต์แวร์อีกเช่นกันแต่ต้องตรวจสอบด้วยว่าซอฟต์แวร์นั้นสนับสนุนเทคโนโลยี FPGA (FPGA Library) ที่ต้องการใช้หรือไม่ ตัวอย่าง FPGA ของบริษัท Xilinx และบริษัท Altera ในการทำ FPGA นั้นมีซอฟต์แวร์หลายตัวที่สามารถใช้ได้ เช่น Exemplar, Maxplus II ในขั้นตอนนี้ซอฟต์แวร์สังเคราะห์วงจรจะแปลงโค้ด AHDL และทำออปติไมซ์ (optimization) เพื่อให้ได้วงจรตามเทคโนโลยีที่เลือกใช้ ในการสังเคราะห์วงจรเพื่อทำ FPGA นั้นวงจรระดับเกต (gate-level) ไม่เหมาะสมกับโครงสร้างที่มีอยู่ในอุปกรณ์ FPGA ดังนั้นในการออปติไมซ์นั้นซอฟต์แวร์สังเคราะห์วงจรจะต้องทำการออปติไมซ์ให้ได้เป็นวงจรที่ประกอบด้วยกลุ่มของลอจิก (logic) ที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ FPGA นั้นๆ จึงจะทำให้ผลที่ได้มีประสิทธิภาพ และในขั้นตอนการสังเคราะห์วงจรนี้ผู้ออกแบบสามารถกำหนดข้อบังคับสำหรับ โมเดลได้เช่น ข้อบังคับในเรื่องของเวลา (timing constraints) หรือข้อบังคับในเรื่องของพื้นที่ (area) หรือกำหนดชนิดและตำแหน่งของ I/O ซึ่งข้อบังคับเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนออปติไมซ์เพื่อให้วงจรที่ได้เป็นไปตามที่กำหนด ส่วนสำคัญในการออปติไมซ์คือการเทียบ (mapping) โมเดลให้เข้ากับเทคโนโลยีที่ใช้เพื่อให้ได้วงจรที่เหมาะสมกับโครงสร้างสถาปัตยกรรมภายในอุปกรณ์ FPGA

เมื่อทำการสังเคราะห์วงจรเสร็จแล้วซอฟต์แวร์การสังเคราะห์วงจรก็จะมีรายงานผลว่าโมเดลที่ออกแบบไปนั้นเป็นอย่างไร เช่น มีความหน่วง (delay) เท่าไร ใช้ทรัพยากรต่างๆ ใน FPGA อะไรบ้าง เมื่อมาถึงขั้นตอนนี้ผู้ออกแบบก็จะทราบว่าโมเดลเป็นไปตามข้อบังคับหรือไม่ ถ้าไม่ก็สังเคราะห์ใหม่จนกว่าจะเป็นไปตามที่กำหนด ในขั้นตอนการสังเคราะห์นี้มีเทคนิคต่างๆ ที่ผู้ออกแบบนำมาใช้เพื่อให้โมเดลเป็นไปตามข้อบังคับที่กำหนด

2.5.4 การแบ่งวงจร (Partitioning)

ขั้นตอนนี้เป็นการแบ่งวงจรที่ได้จากการสังเคราะห์ เป็นส่วนย่อยๆ สำหรับลงใน CLBs, IOBs หรือองค์ประกอบอื่นๆ ภายในอุปกรณ์ FPGA สำหรับเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่งคือให้แต่ละส่วนแยกที่จะแยกออกจากกันมีจำนวนสัญญาณที่เชื่อมต่อกันน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ใช้เพื่อลดค่าการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นในตอนทำการเชื่อมต่อสัญญาณ (routing) ในขั้นตอนนี้จะใช้ซอฟต์แวร์ทำ โดยซอฟต์แวร์จะเทียบส่วนประกอบของวงจรเช่น เกท (gate), ฟลิป-ฟลอป (flip-flop) ลงในทรัพยากรต่างๆ ที่มีอยู่ภายในอุปกรณ์ FPGA

หลังจากทำขั้นตอนนี้เสร็จแล้วผู้ออกแบบสามารถที่จะทราบว่าวงจรใช้จำนวนทรัพยากรภายในอุปกรณ์ FPGA ไปเท่าไร ส่วนข้อมูลทางเวลานั้นผู้ออกแบบจะทราบเฉพาะความหน่วงภายในแต่ละส่วนเท่านั้น หรือที่เรียกว่าความหน่วงลอจิก (logic delay) ส่วนซอฟต์แวร์จะรวมเอาซอฟต์แวร์ย่อยอื่นๆอีก เพื่อให้การทำ PPR (Partitioning, Placement & Routing) เป็นไปอย่างต่อเนื่อง

2.5.5 การวางอุปกรณ์ (Placement)

ขั้นตอนนี้เป็นการเลือกทำเลที่ตั้งของแต่ละส่วนของวงจรที่ผ่านการแบ่งวงจร (Partitioning) มาแล้วว่าจะอยู่ ณ ตำแหน่งไหนในอุปกรณ์ FPGA เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เช่นวงจรส่วนไหนควรอยู่ใกล้กันเพื่อจะได้ค้นหาเส้นทางได้ (route) ง่ายหรือช่วยลดความหน่วง จะเห็นได้ว่าตำแหน่งภายในอุปกรณ์ FPGA นั้นมีความสำคัญเพราะถ้าจัดวางวงจรลงในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมแล้วจะทำให้ความหน่วงเพิ่มขึ้นหรือ Router ทำการค้นหาเส้นทางสัญญาณได้ไม่หมด

การวางอุปกรณ์ที่ดีควรวางส่วนต่างๆ ให้อยู่ใกล้กัน โดยเฉพาะส่วนที่มีการเชื่อมต่อสัญญาณด้วยกัน นอกจากนั้นการกำหนดตำแหน่งขา I/O (I/O pin) ตามตำแหน่งขา I/O ของ FPGA บนแผ่น PCB ก็จะมีผลโดยตรงเลยคือซอฟต์แวร์จะวาง I/O ลงในตำแหน่งที่ผู้ออกแบบกำหนด ซึ่งบางครั้งตำแหน่งที่กำหนดไปไม่เหมาะสม ดังนั้นการกำหนดขา I/O ควรกำหนดตำแหน่งให้เหมาะสม หรือไม่ก็ให้ซอฟต์แวร์จัดการเอง

2.5.6 การเชื่อมต่อสัญญาณ (Routing)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ภายในอุปกรณ์ FPGA ขั้นตอนนี้จะทำต่อเนื่องจากการวางอุปกรณ์ ในกรณีที่ทำการวางอุปกรณ์ไว้ไม่ดีซอฟต์แวร์ก็จะทำการเชื่อมต่อสัญญาณได้ไม่หมด (เนื่องจากจำนวนทรัพยากรสำหรับเชื่อมต่อสัญญาณนั้นมีอยู่จำกัด) หรือเกิดความหน่วงเกินค่าที่กำหนดในข้อบังคับ

ผู้ออกแบบสามารถทำขั้นตอนนี้ได้โดยใช้ซอฟต์แวร์หรือผู้ออกแบบจะทำการเชื่อมต่อสัญญาณด้วยตนเองก็ได้ แต่ทางที่ดีควรใช้ซอฟต์แวร์ทำดีกว่า นอกจากนั้นการกำหนดข้อบังคับทางเวลา จะช่วยให้ผลที่ได้จากการเชื่อมต่อสัญญาณดีขึ้นได้

2.5.7 ความหน่วงด้านเวลา (Delay)

ในการทำ FPGA นั้นความหน่วงที่เกิดขึ้นเป็นความหน่วงที่เกิดจากการวางตำแหน่ง (layout) ของอุปกรณ์ ซึ่งผู้ออกแบบไม่สามารถเข้าไปแก้ไขได้ แต่สามารถทำให้มีความหน่วงน้อยที่สุดได้ สำหรับความหน่วงที่เกิดขึ้นนั้นแยกได้เป็นสองประเภทคือ ความหน่วงลอจิก (Logic delay) เป็นความหน่วงภายในองค์ประกอบของอุปกรณ์ FPGA เอง และความหน่วงที่เกิดจากการเชื่อมต่อสัญญาณ (Routing delay) เป็นความหน่วงที่เกิดจากการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างองค์ประกอบภายในอุปกรณ์ FPGA โดยปกติแล้วค่าความหน่วงลอจิกไม่ควรเกิน 50% ของค่าความหน่วงที่ยอมรับได้ เพราะความหน่วงที่เกิดจากการเชื่อมต่อสัญญาณมักจะมีค่ามากกว่าค่าความหน่วงลอจิก ดังนั้นในการวางอุปกรณ์ และเชื่อมต่อสัญญาณ ผู้ออกแบบควรกำหนดข้อบังคับทางเวลาเพื่อให้ ซอฟต์แวร์ได้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น

ค่าความหน่วงที่ได้หลังจากการวางอุปกรณ์ และเชื่อมต่อสัญญาณแล้วเป็นค่าความหน่วงที่ค่อนข้างแน่นอน ซึ่งผู้ออกแบบสามารถทราบได้ว่าโมเดลที่ออกแบบนั้น เป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่

2.5.8 การโปรแกรมอุปกรณ์ FPGA (Configuration)

หลังจากที่โมเดลผ่านขั้นตอนต่างๆ จนกระทั่งผ่านการทำ PRR (Partirioning, Placement & Routing) แล้วนั้น ถึงตอนนี้ก็สามารถที่จะดาวน์โหลด (download) ลงในอุปกรณ์ FPGA ได้แล้ว ในการดาวน์โหลดนี้ก่อนอื่นต้องแปลงแบบวงจรรวมที่ได้เป็นข้อมูลวงจร (configuration data) ซึ่งอยู่ในรูปของบิตสตรีม (bit-stream) ก่อนแล้วจึงดาวน์โหลดลงไปเพื่อให้อุปกรณ์ FPGA มีฟังก์ชันการทำงานตามโมเดลที่ผู้ออกแบบต้องการ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้วิธีที่แตกต่างกันออกไปสำหรับอุปกรณ์ FPGA ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตคือ ในกรณีที่เป็นการโปรแกรม FPGA ชนิดที่ต้องโปรแกรมโดยวิธี SRAM นั้น ในการใช้งานผู้ออกแบบจะต้องเก็บข้อมูลวงจรไว้ในหน่วยความจำประเภท EPROM หรือ serial PROM ด้วยเพื่อจะใช้งานสะดวกขึ้น คือในการใช้งานโมเดลครั้งต่อไปไม่ต้องดาวน์โหลดข้อมูลวงจรจากเครื่องคอมพิวเตอร์อีก เพราะมีข้อมูลวงจรเก็บอยู่ในหน่วยความจำอยู่แล้ว ใช้เพียงเปิดการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ FPGA เป็นชนิดที่โปรแกรมโดยใช้วิธี EPROM หรือ Antifuse ก็ไม่จำเป็นต้องมีหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลวงจร เพราะว่าอุปกรณ์ FPGA ชนิดนี้เมื่อดาวน์โหลดข้อมูลวงจรลงไปแล้ว ข้อมูลที่ดาวน์โหลดลงไปก็ยังคงอยู่ในอุปกรณ์ FPGA และครั้งต่อไปก็ใช้งานโมเดลที่ออกแบบไว้ได้เลย

2.5.9 การจำลองการทำงานของวงจร (Simulation)

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่ง เพราะเป็นขั้นตอนที่ผู้ออกแบบตรวจสอบฟังก์ชันการทำงานของโมเดลว่าถูกต้องหรือไม่ มีข้อผิดพลาดตรงไหนเพื่อจะได้ทำการแก้ไขให้ถูกต้องในขั้นตอนนี้จะมีซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับทำการจำลองการทำงานของวงจรที่ใช้อยู่เช่น ModelSim ของบริษัท Model Technology หรือ MAXPLUS II ของบริษัท Altera ในการจำลองการทำงานของวงจรควรทำทุกครั้งหลังจากที่มีการทำแต่ละขั้นตอนหลักเสร็จแล้ว เพื่อจะได้ทราบว่าข้อผิดพลาดของโมเดลเกิดจากขั้นตอนไหน จะได้แก้ไขข้อผิดพลาดตรงขั้นตอนนี้ๆ ได้เลย ไม่ต้องมาคอยตรวจหาขั้นตอนที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาด นั่นคือการทำจำลองการทำงานของวงจร ต้องทำทั้งหลังการเขียนโค้ด, การตั้งเคราะห์วงจร และการทำ PRR การจำลองการทำงานของวงจรหลังจากที่เขียนโค้ดเสร็จแล้วนั้น ผู้ออกแบบสามารถทราบได้แค่โมเดลทำงานถูกต้องหรือไม่เท่านั้น (functional test) แต่ยังไม่สามารถตรวจสอบการทำงานในเชิงเวลาได้ถูกต้อง ในการจำลองการทำงานของวงจรหลังจากที่สังเคราะห์เป็นวงจรแล้ว เพื่อตรวจสอบว่าฟังก์ชันการทำงานยังคงถูกต้องอยู่หรือไม่ และค่าความหน่วงที่เกิดขึ้นเป็นไปตามข้อบังคับหรือไม่ มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นหรือไม่ ถ้ามีจะได้แก้ไขให้ถูกต้อง ในการจำลองการทำงานของวงจรหลังจากที่ทำการวางอุปกรณ์ การเชื่อมต่อสัญญาณ (post layout simulation) แล้วก็มีความสำคัญเช่นกันเพราะผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรในตอนนี้จะเป็นผลลัพธ์ของโมเดลเลย ซึ่งผู้ออกแบบนอกจากจะตรวจสอบฟังก์ชันการทำงานแล้วยังต้องตรวจสอบคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความหน่วงที่ได้จากการทำ PPR ในรูปแบบค่าความหน่วงมาตรฐาน (Standard Delay Format : SDF) ว่าตรงตามที่กำหนดหรือไม่ หรือตรวจสอบว่าแบบวงจรรวมสามารถใช้งานที่ความถี่สูงสุดเท่าไรนั่นเอง ในการจำลองการทำงานของ วงจรควรใช้ ซอฟต์แวร์ตัวเดียวกันตลอดเพื่อจะได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากขั้นตอนต่างๆ

บทที่ 3

การออกแบบและการทำงานของเครื่องชี้ตำแหน่ง 3 มิติ

3.1 แนวทางการออกแบบเครื่องชี้ตำแหน่ง 3 มิติ

3.1.1 จุดประสงค์ก่อนออกแบบ

1. วงจรภาคส่งและรับคลื่นอัลตราโซนิกสามารถทำงานได้
2. ควบคุมให้สามารถวัดระยะทางระหว่างตัวรับ ตัวส่งได้
3. นำระยะทางที่ได้มาคำนวณหาพิกัดตำแหน่งบนระนาบ 3 มิติ
4. สามารถแสดงผลของพิกัดตำแหน่งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ได้

3.1.2 ขั้นตอนการออกแบบ

การออกแบบระบบ เพื่อใช้บอกตำแหน่งของตัวชี้ตำแหน่ง บนจอคอมพิวเตอร์ โดยมีหลักการทำงานคร่าวๆ ดังนี้ ในรูปที่ 1.1 จะเป็นในแนวคิดหลักของการหาพิกัดของตัวชี้ตำแหน่ง ซึ่งจะประกอบด้วยตัวชี้ P ณ ตำแหน่ง (x,y,z) และจุดอ้างอิง 4 ตัวคือ P0,P1,P2 และ P3 ตามลำดับ ที่ตำแหน่ง $(x_0,y_0,0)$, $(x_1,y_1,0)$, $(x_2,y_2,0)$ และ $(x_3,y_3,0)$ ตามลำดับ การหาพิกัด (x,y,z) ทำได้โดยการวัดระยะทางระหว่างตัวชี้ไปยังจุดอ้างอิงทั้ง 4 คือ R+R0,R+R1, R+R2 และ R+R3 โดยใช้ FPGA เป็นตัวควบคุม จากนั้นก็จะส่งข้อมูลของระยะทางทั้ง 4 ไปยังคอมพิวเตอร์ โดยใช้โมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางสาย RS232 เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำการคำนวณหาพิกัด (x,y,z) และแสดงผลต่อไป

ภาคส่งคลื่น

เนื่องจากตัวส่งสัญญาณ Ultrasonic จะมีความถี่ใช้งานที่ 40 kHz วงจรภาคส่งจึงเป็นวงจรผลิตความถี่ 40 kHz ป้อนให้กับตัวส่ง แต่เนื่องจากต้องเป็นตัวป้อนสัญญาณเพื่อเป็นจุดอ้างอิงให้กับ FPGA ด้วย ซึ่งสัญญาณที่จะป้อนให้กับ FPGA ต้องเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ต่ำๆ ดังนั้น วงจรภาคส่งนี้จะทำหน้าที่ผลิตความถี่ 40 kHz และผลิตสัญญาณพัลส์แล้วนำมาผสมกันป้อนให้กับตัวส่งอัลตราโซนิกและสัญญาณพัลส์ที่ผลิตขึ้นมานี้ก็จะถูกส่งให้กับ FPGA ด้วยพร้อมๆ กัน

ภาครับคลื่น

วงจรในส่วนของภาครับคลื่น จะต้องสามารถรับสัญญาณที่ส่งมาจากตัวส่ง ซึ่งเป็นสัญญาณที่ถูกผสมกันระหว่างความถี่สูง 40 kHz กับสัญญาณพัลส์ความถี่ต่ำ 100Hz แล้วทำการกรองเอาเฉพาะสัญญาณพัลส์ 100 Hz เพื่อเป็นสัญญาณให้กับ FPGA โดยจะสร้างวงจรรับขึ้นมา 4 ชุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวงจรภาครับตัวใดตัวหนึ่งได้รับสัญญาณเป็นตัวแรก เคน์เตอร์ตัวอื่นจะเริ่มนับและหยุดเมื่อวงจรภาครับชุดนั้นได้รับสัญญาณส่วนวงจรภาครับชุดแรกที่ได้รับสัญญาณเคน์เตอร์จะนับได้เป็นศูนย์ ซึ่งค่าที่เคน์เตอร์ทั้ง 4 ตัว นั้นได้จะนำไปคำนวณหาตำแหน่งของตัวชี้ต่อไป

ภาคประมวลผล

วงจรในส่วนนี้จะรวมไปถึงส่วนของการแสดงผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วย โดยแยกเป็น

1. วงจรในส่วนของ FPGA ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจากวงจรภาครับเปรียบเทียบและนับระยะเวลาที่เกิดขึ้นระหว่างตัวส่งกับตัวรับแต่ละจุด โดยใช้ในการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา VHDL ค่าเวลาที่ได้จะส่งให้กับ MCS-51 ซึ่งทำหน้าที่ส่งค่าเวลาที่นับได้ให้กับคอมพิวเตอร์คำนวณผ่านทางพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรม

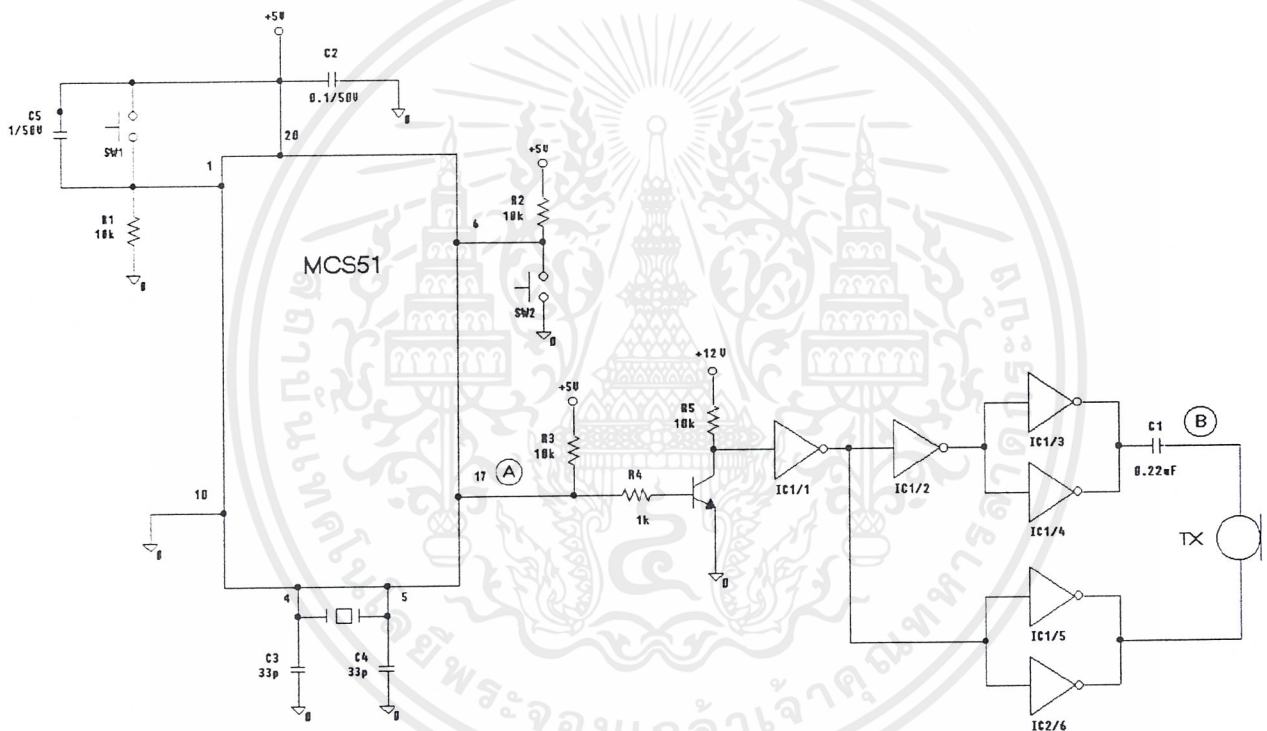
2. ส่วนของการคำนวณและแสดงผล ซึ่งเป็นการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ จะรับค่าการนับจาก MCS-51 ทำการคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง และแสดงผล โดยใช้โปรแกรม Delphi



3.2 การทำงานของเครื่องชี้ตำแหน่ง 3 มิติ

3.2.1 วงจรภาคส่งคลื่น

ภาคส่งสัญญาณจะทำหน้าที่ในการให้กำเนิดสัญญาณซึ่งเป็นคลื่น Ultrasonic ความถี่ 40 kHz โดยเป็นความถี่ที่ตัวส่งสัญญาณสามารถทำงานได้ดีที่สุด สามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุด ผสมอยู่กับสัญญาณความถี่ต่ำ 100 Hz ป้อนให้กับตัวส่ง วงจรภาคส่งสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรภาคส่ง

วงจรจะทำงานโดยใช้ MCS-51 เบอร์ 1051 จะเป็นตัวกำเนิดคลื่นความถี่ 40 kHz ผสมกับความถี่ต่ำ 100 Hz ซึ่งเขียนโปรแกรมให้ 1051 ได้ดังนี้

```

ORG      0000H
MOV      P0,#00H
MOV      P3,#00011111B
MOV      R0,#26H
    
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้สำหรับงานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MAIN:  CPL          P0.0
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        DJNZ       R0,MAIN
        CLR        P0.0
        MOV        R1,#71H
EN:     NOP
        NOP
        DJNZ       R1,EN
        NOP
        NOP
        JNB        P3.2,CLICK
        AJMP       BE
CLICK:  MOV        R2,#0FH
M2:     CPL          P0.0
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        DJNZ       R2,M2
        CLR        P0.0
        MOV        R3,#0B8H
NEXT:  NOP
        NOP
        DJNZ       R3,NEXT
        NOP
        JNB        P3.2,CLICK
        AJMP       BE
        END

```

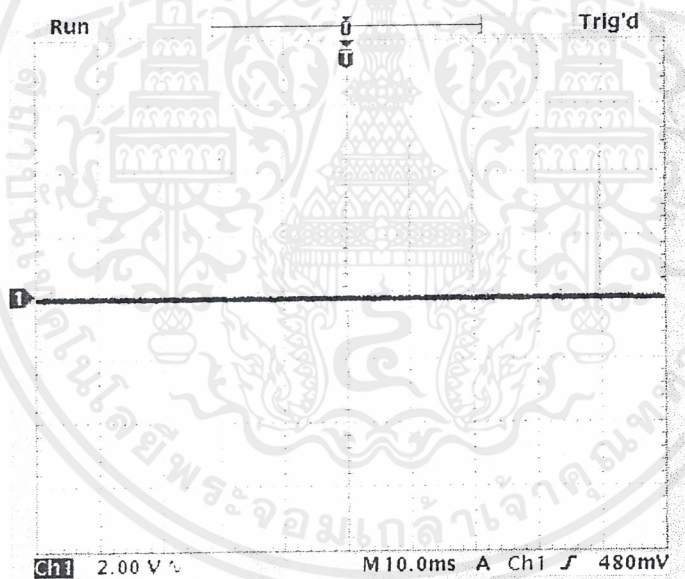
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณดังกล่าวจะผ่านส่วนของ Buffer ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณที่มีขนาดเป็นสองเท่าของแรงดันไฟเลี้ยง สัญญาณที่ได้ทางด้านบวกจะให้ผ่านตัวเก็บประจุค่าหนึ่งซึ่งในที่นี้มีค่าประมาณ $0.22 \mu F$ ซึ่งจะมีความต้านทานประมาณ 18 โอห์มที่ความถี่ 40 kHz ทำหน้าที่ในการป้องกันแรงดันไฟตรงที่จะผ่านเข้าไปทำความเสียหายแก่ตัวส่ง

ดังนั้นแรงดันที่ได้ดังกล่าวจะตกคร่อมอยู่ที่ตัวส่ง ทำให้เกิดการส่งคลื่นที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของสัญญาณที่ป้อนให้กับตัวส่งออกอย่างมีทิศทาง ซึ่งความถี่ดังกล่าวนี้จะถูกส่ง ไปยังตัวรับ โดยวงจรในภาครับจะได้กล่าวเป็นลำดับต่อไป

จากรูปที่ 3.1 รูปสัญญาณ ณ จุดต่างๆ เป็นดังต่อไปนี้

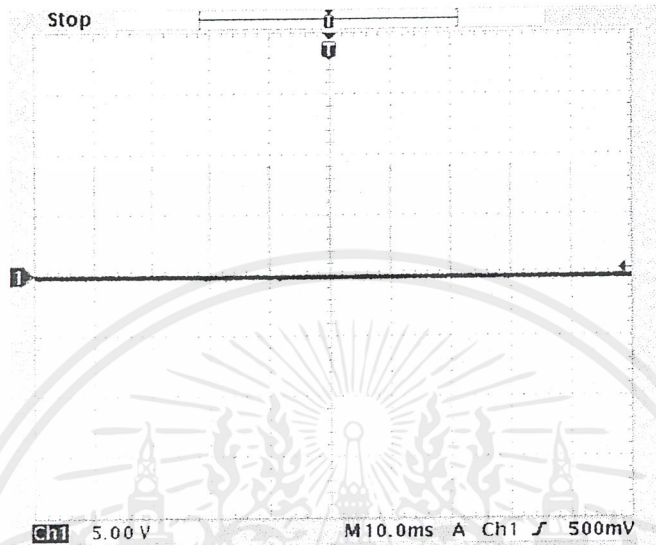
1) รูปสัญญาณ ณ จุด A



รูปที่ 3.2 แสดงสัญญาณที่จุด A ในรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

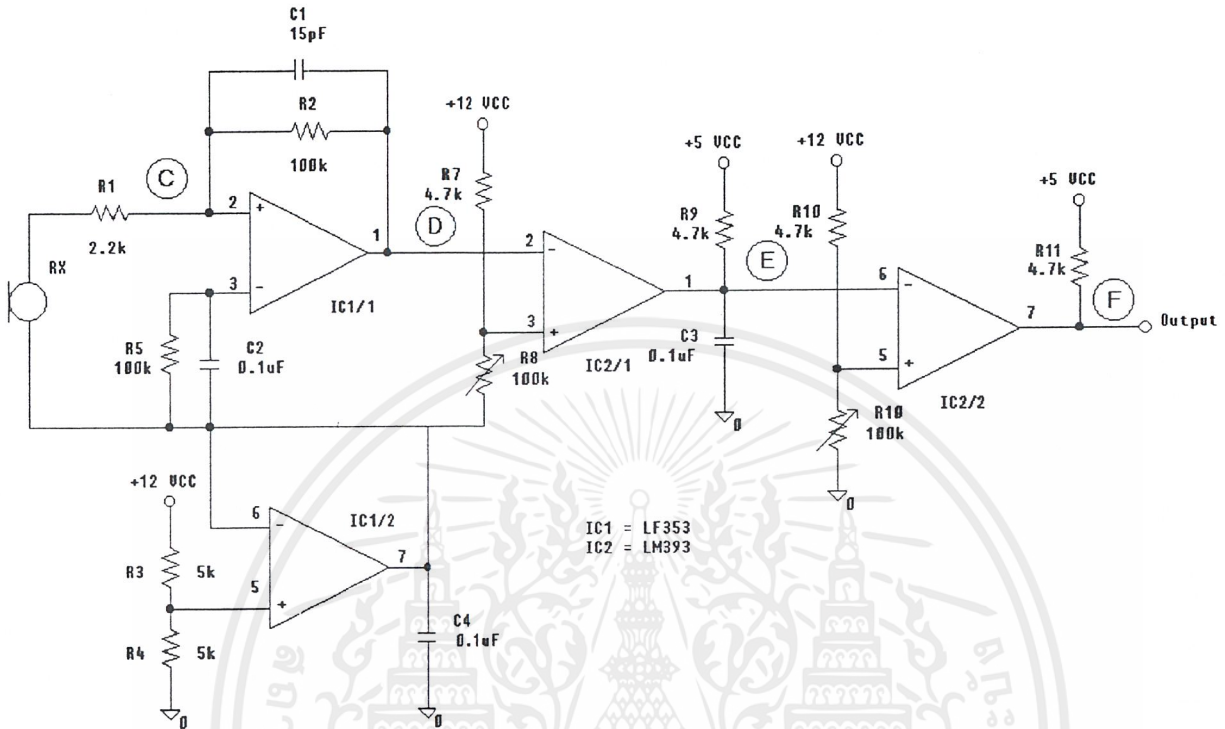
2) รูปสัญญาณ ณ จุด B



รูปที่ 3.3 แสดงสัญญาณที่จุด B ในรูปที่ 3.1

3.2.2 วงจรภาครับคลื่น

หน้าที่ของวงจรภาครับคลื่นคือการแปลงสัญญาณที่รับมาในรูปของสัญญาณที่ถูกผสมกันมาระหว่างสัญญาณความถี่สูง (40kHz) กับสัญญาณความถี่ต่ำ (100Hz) ให้เป็นพัลส์ขนาด 5 V แล้วหลังจากนั้นก็ทำการส่งเป็นสัญญาณ Interrupt ให้ FPGA เพื่อทำการประมวลผลต่อไป วงจรภาครับแสดงดังรูปที่ 3.2



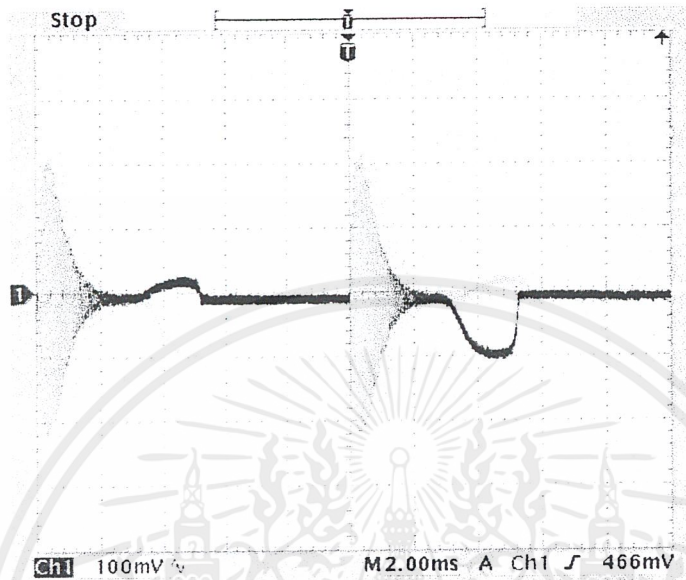
รูปที่ 3.4 แสดงวงจรรูปรับ

การทำงานของวงจรมีอธิบายได้ดังนี้ โดยเริ่มจากเมื่อมีสัญญาณคลื่นความถี่ประมาณ 40 kHz มาตกกระทบกับตัวรับซึ่งจะเป็นผลให้เกิดแรงดันค่าน้อยๆ อยู่ในระดับมิลลิโวลต์ ขึ้นที่ขั้วของตัวรับ ค่าแรงดันดังกล่าวจะถูกนำไปขยายและผ่านวงจรคอมพาราเตอร์ สัญญาณที่ออกมาจากเอาต์พุตของวงจรรวมพาราเตอร์ ยังคงเป็นลักษณะของสัญญาณความถี่สูงรวมมากับสัญญาณความถี่ต่ำ สุดท้ายสามารถที่จะกำจัดสัญญาณความถี่สูงได้ โดยนำสัญญาณดังกล่าวมาผ่านวงจรแถบความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ซึ่งประกอบไปด้วย C 0.1 μ F และตัวต้านทานปรับค่าได้ 100 Ω สัญญาณที่ได้จะเหลือเฉพาะสัญญาณความถี่ต่ำ ซึ่งมีค่าประมาณ 100 Hz และนำสัญญาณดังกล่าวผ่านวงจรรวมพาราเตอร์อีกครั้ง เพื่อให้พัลส์ที่ได้ตรงแล้วจึงส่งไปยัง FPGA เพื่อนำไปประมวลผลและควบคุมต่อไป

จากรูปที่ 3.4 รูปสัญญาณ ณ จุดต่างๆ เป็นดังต่อไปนี้

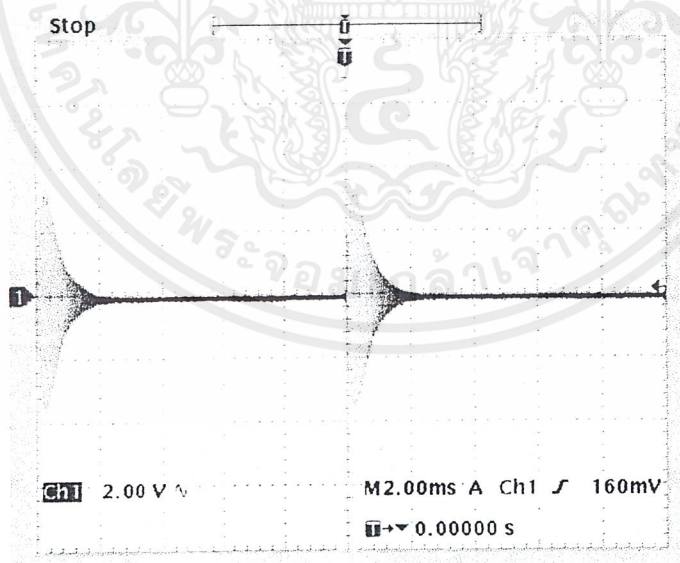
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) รูปสัญญาณ ณ จุด C



รูปที่ 3.5 แสดงสัญญาณที่จุด C ในรูปที่ 3.4

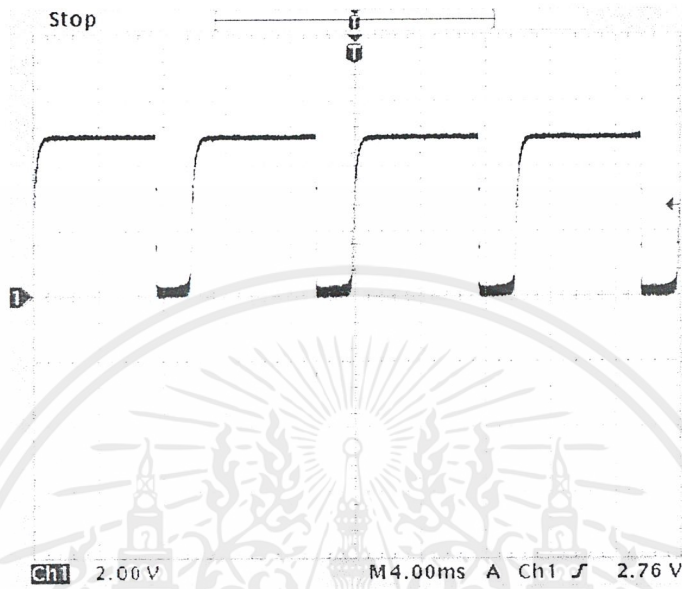
2) รูปสัญญาณ ณ จุด D



รูปที่ 3.6 แสดงสัญญาณที่จุด D ในรูปที่ 3.4

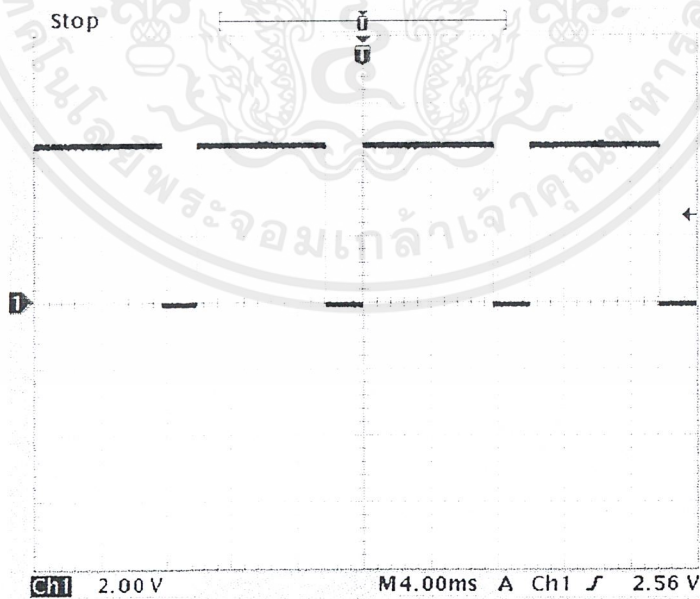
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) รูปสัญญาณ ณ จุด E



รูปที่ 3.7 แสดงสัญญาณที่จุด E ในรูปที่ 3.4

4) รูปสัญญาณ ณ จุด F



รูปที่ 3.8 แสดงสัญญาณที่จุด F ในรูปที่ 3.4

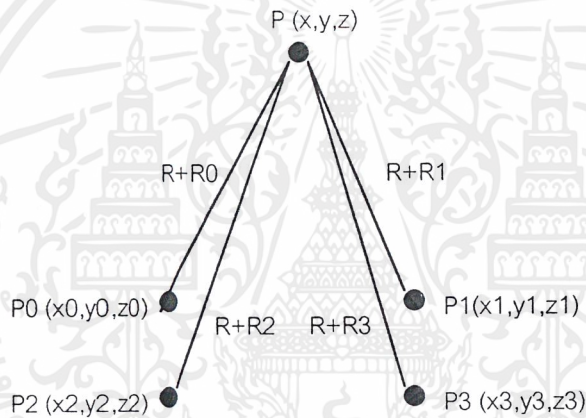
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 วงจรภาคประมวลผล

วงจรในส่วนของภาคประมวลผลจะประกอบไปด้วย FPGA และส่วน MCS-51 ซึ่งในส่วน
ของ FPGA จะเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษา VHDL ซึ่งเป็นตัวนับ (Counter) 4 ตัว และส่งต่อไปเข้า
MCS-51 โดยผ่าน latch 4 ตัว ทำหน้าที่เป็นตัวพักข้อมูลทั้ง 4 ค่าต่อ 1 ชุด ซึ่งวงจรในส่วน MCS-51

3.2.4 การคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง

การคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง อาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้



รูปที่ 3.10 แสดงการวางตำแหน่งของตัวส่งและตัวรับ

สมมติว่าตัวส่งอยู่ที่ตำแหน่ง (x,y,z) และเราทำการวางตำแหน่งของตัวรับทั้ง 4 ตัว ตามจุด
ดังรูปที่ 3.9 เมื่อส่งสัญญาณอัลตราโซนิกจากตัวส่งไปยังตัวรับทั้ง 4 ตัว ระยะเวลาที่คลื่นเดินทาง
ระหว่างตัวส่งกับตัวรับจะเก็บไว้ในไทม์เมอร์และส่งไปให้คอมพิวเตอร์คำนวณผ่านพอร์ตอนุกรม

สัญญาณจากภาคส่งคลื่นจะมีลักษณะเป็น Sin Wave ที่มีความถี่ 40 kHz เป็นช่วงๆ มี
ลักษณะคล้ายๆ พัลส์ ความถี่ 100 Hz ส่งไปที่ภาครับ โดยภาครับจะแปลงสัญญาณที่ได้เป็นพัลส์ที่มี
ความถี่ 100 Hz เพื่อไปใช้งานต่อไป

เมื่อตัวรับตัวแรกได้รับสัญญาณดังกล่าวแล้วจะทำให้เคาน์เตอร์เริ่มทำงานเมื่อตัวต่อไปได้
รับสัญญาณจะทำให้เคาน์เตอร์ตัวนั้นหยุดนับ เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนครบทุกตัว เพราะฉะนั้นจะได้
เวลาที่ต่างกันกับตัวแรกที่ได้รับ ค่าที่ได้จะไปคำนวณหาค่า R_0, R_1, R_2, R_3 ออกมาแล้วนำค่า
 R_0, R_1, R_2, R_3 ไปคำนวณหาค่า x, y, z ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การคำนวณเพื่อให้ได้ค่า R_0, R_1, R_2, R_3

เมื่อเราได้ค่าที่เคาน์เตอร์แต่ละตัวนับได้(N) เราสามารถหาเวลาที่ใช้ได้(T) จากสูตร

ต่อไปนี้

$$T = N/f$$

โดย T คือ เวลาที่แตกต่างกันระหว่างตัวรับตัวแรกกับตัวรับตัวนั้น

N คือ จำนวนที่เคาน์เตอร์นับได้

f คือ ความถี่ที่เคาน์เตอร์ใช้นับ

และเราสามารถหาค่า R_0, R_1, R_2, R_3 ได้จากสูตรต่อไปนี้

จาก $S = VT$

จะได้ $R_0 = VN_0/f$

$$R_1 = VN_1/f$$

$$R_2 = VN_2/f$$

$$R_3 = VN_3/f$$

โดย V คือ ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก

R_0, R_1, R_2, R_3 คือ รัศมีที่แตกต่างกันระหว่างตัวรับตัวนั้นกับตัวรับตัวที่ใกล้ตัวส่งมากที่สุด

หลังจากนั้นเราจะนำค่า R_0, R_1, R_2, R_3 ไปคำนวณหาค่า x, y, z ต่อไป

2. การคำนวณหาค่า x, y, z

จากรูปที่ 3.3 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + Z^2 = (R + R_0)^2 \quad \text{.....①}$$

$$(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + Z^2 = (R + R_1)^2 \quad \text{.....②}$$

$$(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + Z^2 = (R + R_2)^2 \quad \text{.....③}$$

$$(X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + Z^2 = (R + R_3)^2 \quad \text{.....④}$$

จาก ①

$$X^2 - 2X_0X + X_0^2 + Y^2 - 2Y_0Y + Y_0^2 + Z^2 = R^2 + 2R_0R + R_0^2$$

$$X^2 + Y^2 + Z^2 - R^2 = 2X_0X + 2Y_0Y + 2R_0R - X_0^2 - Y_0^2 + R_0^2 \quad \text{.....⑤}$$

เอกสารในทำนองเดียวกันจาก ②, ③, ④ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X^2+Y^2+Z^2-R^2 = 2X_1X+2Y_1Y+2R_1R- X_1^2- Y_1^2+R_1^2 \dots\dots\dots(6)$$

$$X^2+Y^2+Z^2-R^2 = 2X_2X+2Y_2Y+2R_2R- X_2^2- Y_2^2+R_2^2 \dots\dots\dots(7)$$

$$X^2+Y^2+Z^2-R^2 = 2X_3X+2Y_3Y+2R_3R- X_3^2- Y_3^2+R_3^2 \dots\dots\dots(8)$$

จากสมการ ⑤ - ⑧ จะได้ 3 สมการ ⑤ = ⑥ , ⑤ = ⑦ , ⑤ = ⑧

จาก ⑤ = ⑥ จะได้

$$2X_0X+2Y_0Y+2R_0R- X_0^2- Y_0^2+R_0^2 = 2X_1X+2Y_1Y+2R_1R- X_1^2- Y_1^2+R_1^2$$

$$(2 X_0-2X_1)X+(2Y_0+2Y_1)Y+(2R_0-2R_1)R = X_0^2+Y_0^2-X_1^2-Y_1^2+R_1^2-R_0^2$$

ในทำนองเดียวกัน จะได้

$$(2 X_0-2X_2)X+(2Y_0+2Y_2)Y+(2R_0-2R_2)R = X_0^2+Y_0^2-X_2^2-Y_2^2+R_2^2-R_0^2$$

$$(2 X_0-2X_3)X+(2Y_0+2Y_3)Y+(2R_0-2R_3)R = X_0^2+Y_0^2-X_3^2-Y_3^2+R_3^2-R_0^2$$

กำหนดให้

$$A1 = 2 X_0-2X_1$$

$$A2 = 2 X_0-2X_2$$

$$A3 = 2 X_0-2X_3$$

$$B1 = 2Y_0+2Y_1$$

$$B2 = 2Y_0+2Y_2$$

$$B3 = 2Y_0+2Y_3$$

$$C1 = 2R_0-2R_1$$

$$C2 = 2R_0-2R_2$$

$$C3 = 2R_0-2R_3$$

$$D1 = X_0^2+Y_0^2-X_1^2-Y_1^2+R_1^2-R_0^2$$

$$D2 = X_0^2+Y_0^2-X_2^2-Y_2^2+R_2^2-R_0^2$$

$$D3 = X_0^2+Y_0^2-X_3^2-Y_3^2+R_3^2-R_0^2$$

จะได้

$$A1X + B1Y + C1R = D1$$

$$A2X + B2Y + C2R = D2$$

$$A3X + B3Y + C3R = D3$$

$$\begin{bmatrix} A1 & B1 & C1 \\ A2 & B2 & C2 \\ A3 & B3 & C3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D1 \\ D2 \\ D3 \end{bmatrix}$$

กำหนดให้

$$\Delta = \begin{vmatrix} A1 & B1 & C1 \\ A1 & B1 & C1 \\ A1 & B1 & C1 \end{vmatrix}$$

จะได้

$$X = \frac{\begin{vmatrix} D1 & B1 & C1 \\ D2 & B2 & C2 \\ D3 & B3 & C3 \end{vmatrix}}{\Delta}$$

$$Y = \frac{\begin{vmatrix} A1 & D1 & C1 \\ A2 & D2 & C2 \\ A3 & D3 & C3 \end{vmatrix}}{\Delta}$$

$$R = \frac{\begin{vmatrix} A1 & B1 & D1 \\ A2 & B2 & D2 \\ A3 & B3 & D3 \end{vmatrix}}{\Delta}$$

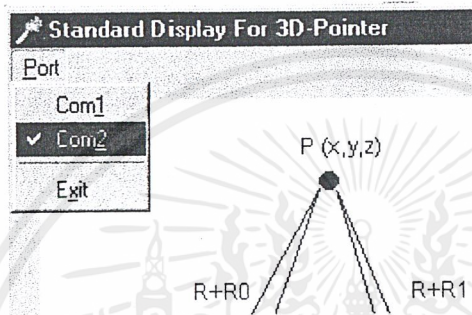
$$Z = \sqrt{R^2 - (X-X_0)^2 - (Y-Y_0)^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

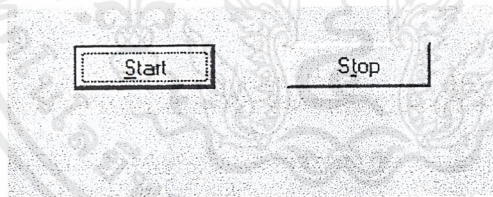
คู่มือการใช้งานโปรแกรมแสดงผลของ 3D-POINTER

1. เมื่อเข้าโปรแกรมแล้ว ให้ทำการเลือกพอร์ตดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการเลือกพอร์ต

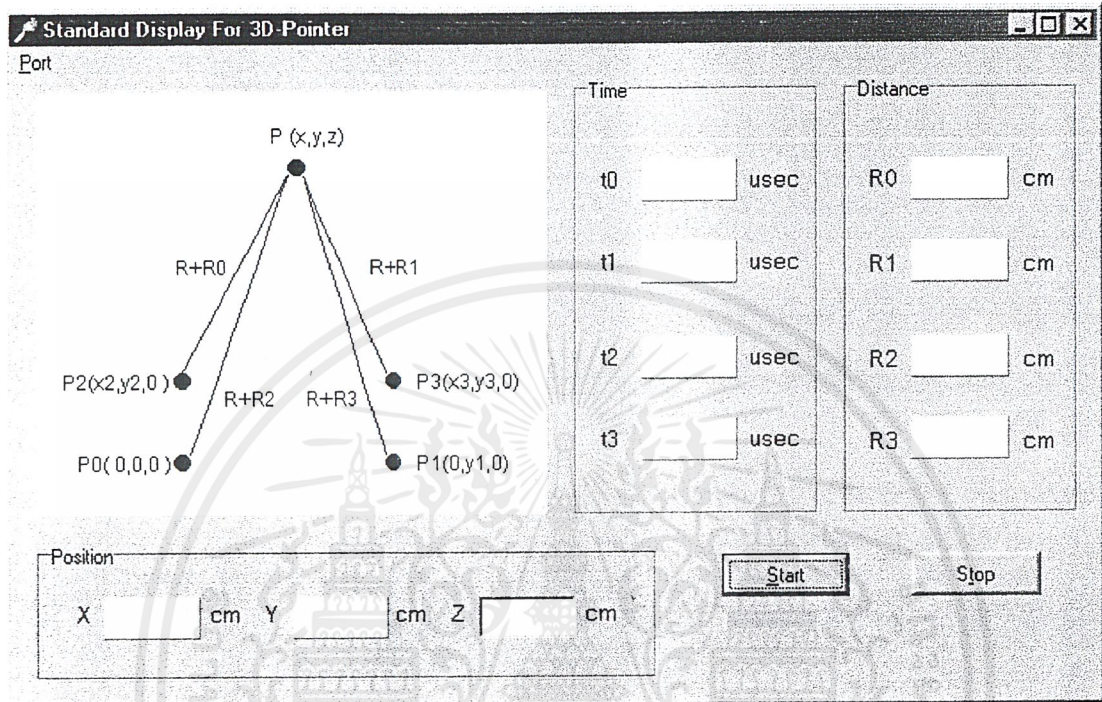
2. ทำการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และให้โปรแกรมเริ่มทำงานโดยกดปุ่ม START ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการเลือกปุ่ม START

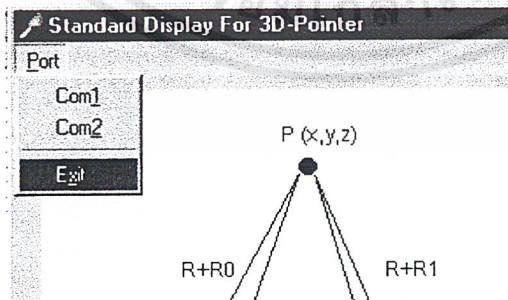
3. ผลที่ได้จากข้อ 2 จะได้ผลของตำแหน่งพอยต์เตอร์ซึ่งจะแสดงค่าออกมาทั้งค่าแกน X, Y, Z ระยะทาง R_0, R_1, R_2, R_3 และตำแหน่งพิกัด X, Y, Z ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงหน้าจอ โปรแกรมทั้งหมด

4. เมื่อต้องการหยุดค่าต่างๆ สามารถทำได้โดยกดปุ่ม STOP ดังรูปที่ 4.3
5. เมื่อต้องการออกจากโปรแกรมสามารถทำได้โดยเลือก Port แล้วกดปุ่ม Exit ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงการกดปุ่ม Exit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลอง

ผลการทดลอง

ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

- ตารางที่ 5.1 ทดสอบวัดค่าตำแหน่งจากระยะต่างๆ เพื่อให้เห็นว่าวัดได้จริง
- ตารางที่ 5.2 วัดระยะทางเทียบกับระยะทางจริงที่วัดเทียบโดยใช้ตลับเมตรเพื่อหา
ค่าผิดพลาด

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองวัดค่า ณ ที่พอยเตอร์ตำแหน่งต่างๆ

ครั้งที่	จำนวนครั้งที่นับได้ (ครั้ง)				ค่าผลต่างระยะทางของตัวส่ง (cm)				ค่าตำแหน่งพิกัด 3 มิติ (cm)		
	Counter 1	Counter 2	Counter 3	Counter 4	R0	R1	R2	R3	X	Y	Z
1	125	23	70	0	21.25	3.91	11.90	0	8.57	2.44	25.58
2	95	78	0	200	16.15	13.26	0	34	6.85	12.26	9.26
3	45	0	96	45	7.65	0	16.32	7.65	33.72	-8.72	64.36
4	0	97	36	156	0	16.49	6.12	26.52	24.08	40.29	18.29
5	125	28	71	0	21.25	4.76	12.07	0	6.85	-0.05	31.30
6	0	101	40	173	0	17.17	6.80	29.41	24.67	39.67	11.65
7	47	0	197	47	7.99	0	33.15	7.99	20.26	4.74	19.16
8	55	0	195	64	9.35	0	33.15	10.88	25.17	1.32	23.65
9	61	133	0	53	10.37	22.61	0	9.01	-6.06	28.87	40.28

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองวัดระยะที่คำนวณเทียบกับระยะจริงเพื่อหาค่าผิดพลาด

โดยในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการวัดโดยผ่านโปรแกรมคำนวณกับใช้ตลับเมตรเพื่อหาระยะทางระหว่างตัวส่งกับตัวรับ

ครั้งที่	ค่าจริง (cm)				ค่าคำนวณ (cm)				ค่าผิดพลาด (%)			
	R0	R1	R0	R1	R2	R3	R2	R3	R0	R1	R2	R3
1	20.00	2.50	10.00	0	21.25	3.91	11.90	0	5.88	36.06	15.97	0
2	15.50	13.00	0	32.50	16.15	13.26	0	34	4.02	1.96	0	4.41
3	6.50	0	14.90	6.50	7.65	0	16.32	7.65	15.03	0	8.70	15.03
4	0	15.20	5.00	25.30	0	16.49	6.12	26.52	0	7.82	18.30	4.60
5	19.90	3.60	10.90	0	21.25	4.76	12.07	0	6.35	24.37	9.69	0
6	0	16.00	5.50	28.10	0	17.17	6.80	29.41	0	6.81	19.12	4.45
7	6.70	0	32.00	6.70	7.99	0	33.15	7.99	16.15	0	3.47	16.15
8	8.40	0	32.20	9.30	9.35	0	33.15	10.88	10.16	0	2.87	14.52
9	9.10	21.30	0	7.90	10.37	22.61	0	9.01	12.25	5.79	0	12.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์

สรุปและวิจารณ์

การออกแบบเครื่องแสดงตำแหน่ง 3 มิติ สามารถทำได้หลายแบบและเลือกอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้แทน ตัวรับตัวส่งแบบอัลตราโซนิกก็มีหลายชนิด ซึ่งสาเหตุที่เลือกใช้อัลตราโซนิกก็เพราะสามารถหาซื้อได้ง่ายกว่าในบ้านเราและการนำมาใช้งานก็สามารถทำได้ง่ายกว่าการเลือกใช้อุปกรณ์อื่น เช่น อินฟราเรด อีกทั้งการวางตำแหน่งของตัวรับกับตัวส่ง ซึ่งที่ผู้จัดทำได้ลองออกแบบคู่มือเป็นทางเลือกหนึ่งเท่านั้น ซึ่งโปรแกรมการทำงานและประมวลผลก็ออกแบบมาเฉพาะ ทำให้ต้องเปลี่ยนวงจรก็มี ค่อยแล้วใช้ไม่ได้ก็มี โดยจะแยกสรุปเป็นส่วนๆ ดังนี้

6.1 ภาคส่งสัญญาณ

ภาคส่งนี้มีขนาดเล็กและวงจรไม่ได้ซับซ้อนทำให้การแก้ไข และการปรับความถี่ที่จะทำการส่งทำได้สะดวก โดยการเลือกตัวส่งที่ดี ก็จะทำให้สามารถทำการส่งได้เป็นไปตามที่ต้องการ แต่มีปัญหาในช่วงแรกๆ ก็คือเมื่อตอนที่ยังไม่ได้ทำแผ่นปริ้นซ์ แต่จะใช้โปรโตบอร์ดต่อวงจรแทนนั้นจะประสบกับปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวน แต่เมื่อใช้แผ่นปริ้นซ์ปัญหาดังกล่าวก็หมดไป

6.2 ภาครับสัญญาณ

ภาครับจะมีปัญหามากในเรื่องของสัญญาณจากภาคส่งและสัญญาณความถี่ต่ำเข้ารบกวนทำให้เมื่อตัวรับอยู่ห่างจากตัวส่งระยะหนึ่ง สัญญาณรบกวนข้างต้นจะมีค่ามากกว่าสัญญาณจากตัวส่งทำให้ไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นในการออกแบบวงจรจึงต้องออกแบบให้สัญญาณรบกวนเข้ามาได้น้อยที่สุดเพื่อว่าเมื่อตัวส่งอยู่ใกล้ ตัวรับและภาครับยังสามารถแยกแยะสัญญาณได้ถูกต้อง ซึ่งเมื่อทำปริ้นซ์แล้วปัญหาดังกล่าวก็ลดลง

6.3 ภาคประมวลผลและเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย FPGA และ MCS-51 การเขียนโปรแกรมของ FPGA นั้นจะใช้ภาษา VHDL ซึ่งเป็นภาษาที่ไม่ค่อยยากแต่ยากตรงที่ต้องเขียนโปรแกรมให้ป้องกันข้อผิดพลาดต่างๆ เช่น มีวัตถุมาบังตัวรับตัวใดตัวหนึ่ง ซึ่งถ้าไม่มีการป้องกันก็จะผิดพลาดไปหมดและ ข้อเสียของ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่แจ้งชื่อผู้จัดทำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FPGA คือมีความจุโปรแกรมค่อนข้างน้อย บางครั้งมีสัญญาณรบกวนตอนกำลังโหลดโปรแกรมทำให้โปรแกรมผิดพลาดไปได้ ทำให้แก้ไขได้ลำบาก แต่ในส่วนของ MCS-51 ไม่ค่อยมีปัญหาอะไร

6.4 ส่วนของการแสดงผลโดยใช้ Delphi

ในส่วนการเขียนโปรแกรมแสดงออกหน้าจอไม่ค่อยมีปัญหา แต่ที่มีปัญหาคือ การเขียนโปรแกรมรับจากพอร์ตอนุกรม ซึ่งต้องหาซอร์สโค้ดจากหนังสือมาแก้ไขอีกค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน และหนังสือของ Delphi ที่เกี่ยวกับการติดต่อกับพอร์ตมีน้อยมาก จึงเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก

6.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 15-30 พฤศจิกายน 2544 : ค้นคว้าหาวิธีและโปรแกรมที่นำมาแสดงผล
- 1-20 ธันวาคม 2544 : ศึกษาและเขียนโปรแกรม Delphi
- 21-30 ธันวาคม 2544 : ทดลองโปรแกรมบน MCS-51 เพื่อติดต่อกับคอมพิวเตอร์
- 5-30 มกราคม 2544 : ศึกษาและค้นคว้าการเขียนโปรแกรม VHDL และการใช้บอร์ด FPGA
- 1-28 กุมภาพันธ์ 2544 : พิมพ์รายงานเพิ่มเติมและเขียนโปรแกรมใช้งานจริง
- 1-11 มีนาคม 2544 : นำฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์มาประยุกต์ใช้ร่วมกันและทดสอบประสิทธิภาพ

6.6 สรุปคุณสมบัติของ 3D-Pointer

อัตราการประมวลผลค่าตำแหน่ง ประมาณ 10 ครั้งต่อวินาที
 ความละเอียดในการวัดระยะทาง ประมาณ 2-4 มิลลิเมตร
 ระยะที่วัดได้ค่าสูงสุด ประมาณ 10 เซนติเมตร
 ระยะที่วัดได้ไกลสุด ประมาณ 200 เซนติเมตร แต่การใช้งานปรกติกับพอยต์เตอร์ จะแสดงผลได้ที่ไม่เกิน 70 เซนติเมตรจากตัวรับ

6.7 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองวัดระยะทางและคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง ค่าระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับทั้ง 4 ตัว สามารถที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง ค่าการนับของ Counter ใน FPGA สามารถส่งให้กับคอมพิวเตอร์ได้อย่างถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการคำนวณเพื่อหาพิกัดตำแหน่ง ยังไม่มีความแน่นอนนัก เนื่องจากค่าที่ส่งมาจาก MCS-51 มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและค่าการนับมีค่าไม่คงที่ อีกทั้งเกิดสัญญาณรบกวนการทำงานของวงจร ซึ่งมีผลทำให้การวัดระยะทางผิดพลาด ทำให้ตำแหน่งที่คำนวณได้ผิดพลาดไปด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา อ.เทอดศักดิ์ และเพื่อนๆ ที่ให้การแนะนำช่วยเหลือในทุกๆ
สิ่ง ในเรื่องปัญหาต่างๆ รวมทั้ง นายกรสมรรถ เนตตกุล (อ๋น) เพื่อนที่ดีของเราที่ได้ล่วงลับไปแล้ว
ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ชัยวัฒน์ ลีมพรจิตรวิไล และวราพจน์ กรแก้ววัฒนกุล, “เรียนรู้และปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลช”, บริษัท อีโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด กรุงเทพมหานคร
2. กฤษดา ใจเย็น , อรรถพล บุญยะโกคา และ ชัยวัฒน์ ลีมพรจิตรวิไล, “เรียนรู้และปฏิบัติการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกผ่านพอร์ตอนุกรม”, บริษัท อีโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด กรุงเทพมหานคร
3. “คู่มือคูหาไอซีฉบับฉบับไว”, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน) กรุงเทพมหานคร , 2540
4. “รวมบทความทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์”, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน) กรุงเทพมหานคร , 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

รายการอุปกรณ์

- | | |
|------------------------------|--------|
| 1. IC | |
| 1.1 MCS-51 เบอร์ AT89C1051 | 1 ตัว |
| 1.2 เบอร์ LM 393 | 4 ตัว |
| 1.3 เบอร์ LF 353 | 4 ตัว |
| 1.4 เบอร์ 4049 | 1 ตัว |
| 2. Transistor | |
| 2.1 เบอร์ 7805 | 1 ตัว |
| 2.2 เบอร์ 7812 | 1 ตัว |
| 3. Diode | |
| 3.1 Bridge Diode เบอร์ FI201 | 2 ตัว |
| 4. Resister (5% , 1/4 W) | |
| 4.1 10 k Ω | 3 ตัว |
| 4.2 2.2 k Ω | 4 ตัว |
| 4.3 100 k Ω | 8 ตัว |
| 4.4 5 k Ω | 8 ตัว |
| 4.5 4.7 k Ω | 4 ตัว |
| 5. VR แบบ Trimpod | |
| 5.1 100 k Ω | 8 ตัว |
| 6. Capaciter | |
| 6.1 1 μ F | 1 ตัว |
| 6.2 0.1 μ F | 15 ตัว |
| 6.3 33 pF | 2 ตัว |
| 6.4 15 pF | 4 ตัว |
| 6.5 2200 μ F | 2 ตัว |
| 6.6 10 μ F | 2 ตัว |
| 7. อุปกรณ์อื่นๆ | |

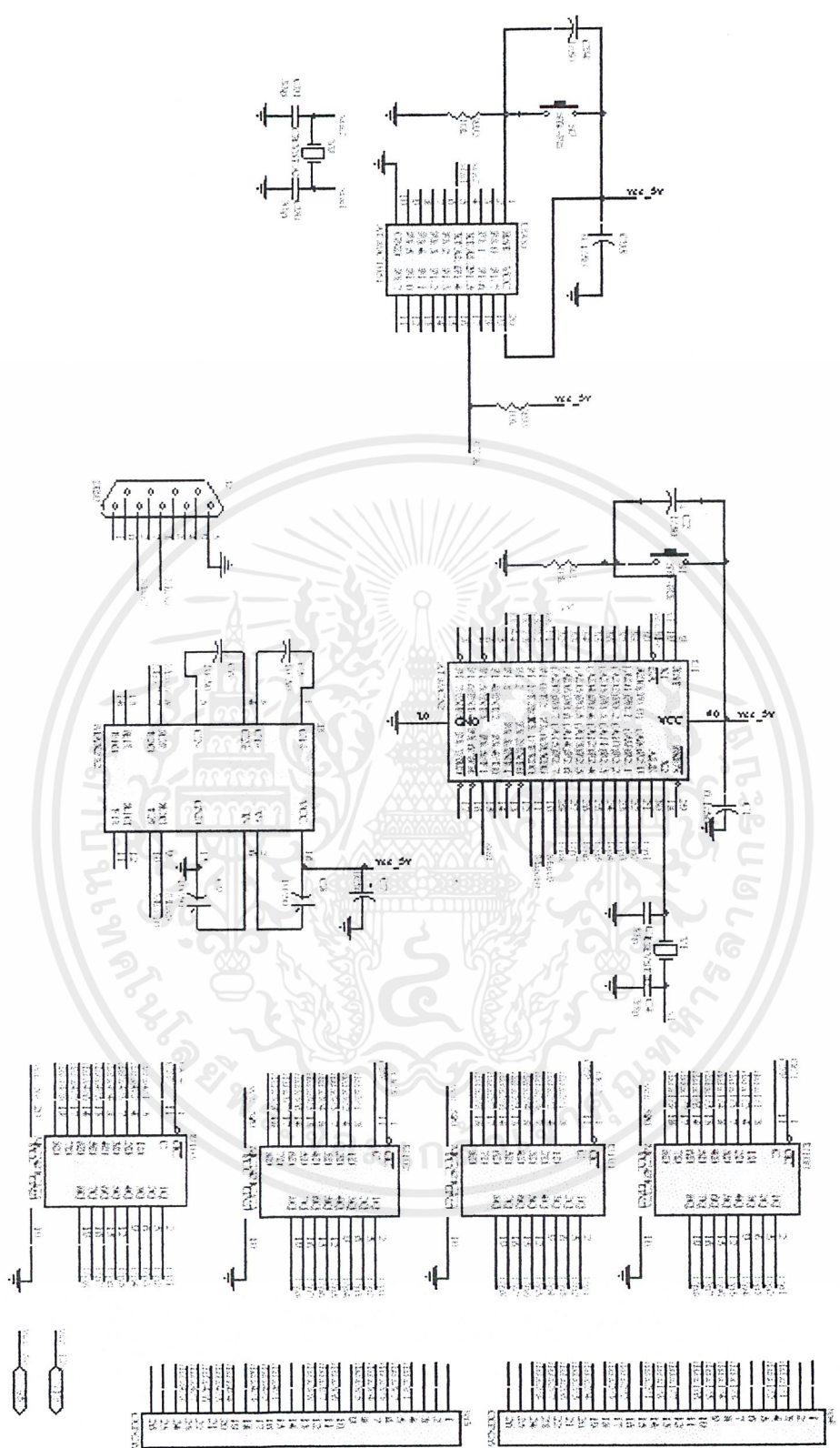
เอกสารนี้ 7.1 Switch (NO) ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ 2 ตัว
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2	ตัวส่งอัลตราโซนิก	1	ตัว
7.3	ตัวรับอัลตราโซนิก	4	ตัว
7.4	หม้อแปลง		
7.5	แผ่นปริ้นซ์เนกประสงค์		
7.6	Connecter		
7.7	Crystal 11.0592 MHz		
7.8	ถ่าน 6V , 12V		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

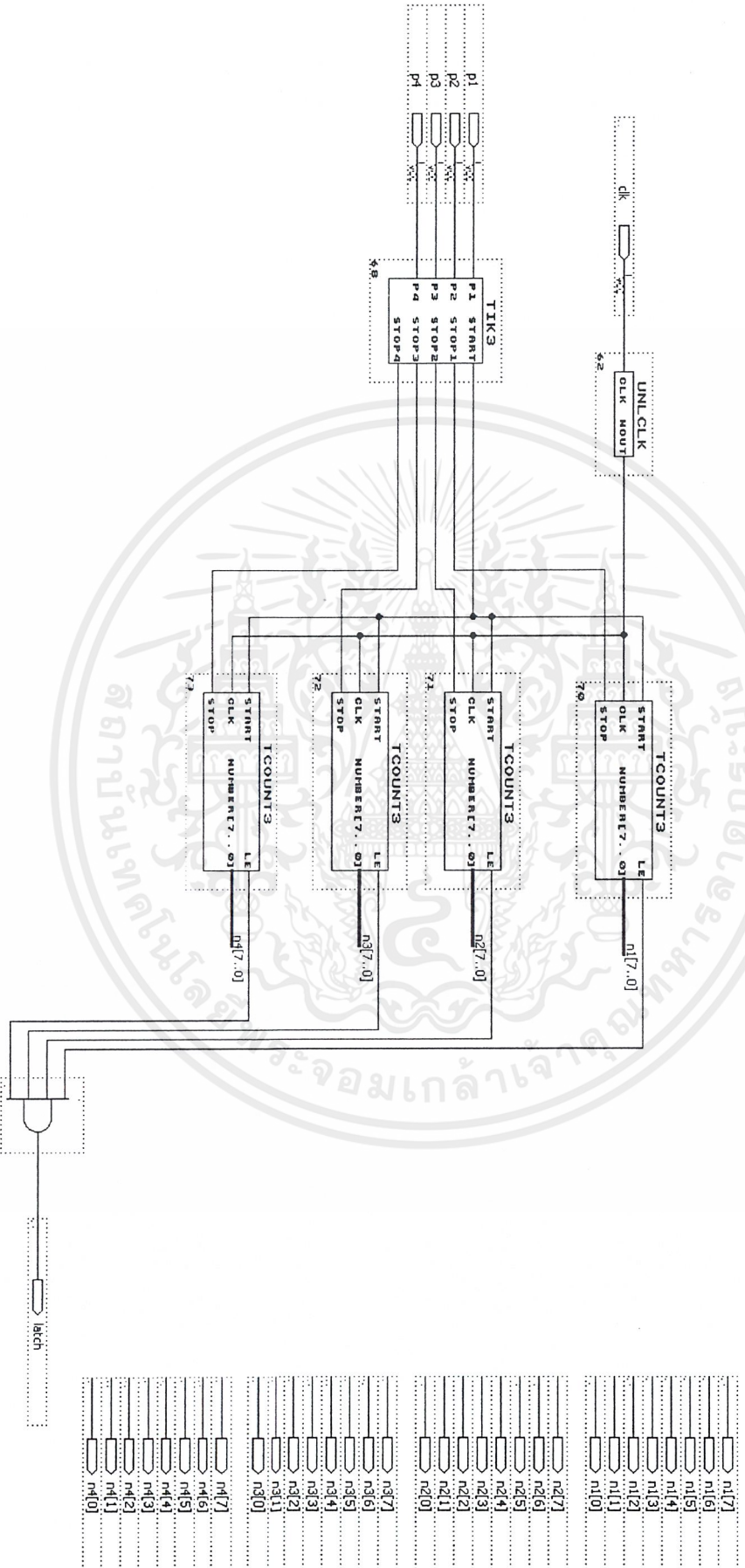
ส่วนของ MCS-51



รูปที่ 2 แสดงวงจรในส่วนเชื่อมต่อกับ PC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วน FPGA



รูปที่ 1 แสดง Block Diagram ของ FPGA

```

ENTITY tik3 IS
PORT (
    p1 : IN BIT;
    p2 : IN BIT;
    p3 : IN BIT;
    p4 : IN BIT;
    start : OUT BIT;
    stop1 : OUT BIT;
    stop2 : OUT BIT;
    stop3 : OUT BIT;
    stop4 : OUT BIT);

```

```
END tik3;
```

```
ARCHITECTURE un OF tik3 IS
```

```
BEGIN
```

```
PROCESS (p1,p2,p3,p4)
```

```

    VARIABLE sp1 : INTEGER RANGE 0 TO 2;
    VARIABLE sp2 : INTEGER RANGE 0 TO 2;
    VARIABLE sp3 : INTEGER RANGE 0 TO 2;
    VARIABLE sp4 : INTEGER RANGE 0 TO 2;
    VARIABLE np1 : INTEGER RANGE 0 TO 2;
    VARIABLE np2 : INTEGER RANGE 0 TO 2;
    VARIABLE np3 : INTEGER RANGE 0 TO 2;
    VARIABLE np4 : INTEGER RANGE 0 TO 2;

```

```
BEGIN
```

```

IF (p1'EVENT AND p1 = '1') THEN np1 := np1+1; END IF;
IF (p2'EVENT AND p2 = '1') THEN np2 := np2+1; END IF;
IF (p3'EVENT AND p3 = '1') THEN np3 := np3+1; END IF;
IF (p4'EVENT AND p4 = '1') THEN np4 := np4+1; END IF;
IF (np1 = 2 OR np2 = 2 OR np3 = 2 OR np4 = 2) THEN
    IF (np1 = 2) THEN np1 := 1; stop1 <= '1'; ELSE np1 := 0; stop1 <= '0'; END IF;
    IF (np2 = 2) THEN np2 := 1; stop2 <= '1'; ELSE np2 := 0; stop2 <= '0'; END IF;
    IF (np3 = 2) THEN np3 := 1; stop3 <= '1'; ELSE np3 := 0; stop3 <= '0'; END IF;
    IF (np4 = 2) THEN np4 := 1; stop4 <= '1'; ELSE np4 := 0; stop4 <= '0'; END IF;

```

```
ELSE
```

```

    sp1 := np1;
    sp2 := np2;
    sp3 := np3;
    sp4 := np4;
    IF (sp1=1) THEN stop1 <= '1'; ELSE IF (sp1=0) THEN stop1 <= '0'; END IF; END IF;
    IF (sp2=1) THEN stop2 <= '1'; ELSE IF (sp2=0) THEN stop2 <= '0'; END IF; END IF;
    IF (sp3=1) THEN stop3 <= '1'; ELSE IF (sp3=0) THEN stop3 <= '0'; END IF; END IF;
    IF (sp4=1) THEN stop4 <= '1'; ELSE IF (sp4=0) THEN stop4 <= '0'; END IF; END IF;

```

```
END IF;
```

```
IF (p1='0' AND p2='0' AND p3='0' AND p4='0') THEN start <= '1';
```

```
ELSE start <= '0'; END IF;
```

```
END PROCESS;
```

```
END un;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการถือลิขสิทธิ์ ลิขสิทธิ์ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ENTITY tcount3 IS
PORT (
    start : IN BIT;
    clk   : IN BIT;
    le    : OUT BIT;
    stop  : IN BIT;
    number : OUT INTEGER RANGE 0 TO 255);
END tcount3;

```

```

ARCHITECTURE ut OF tcount3 IS
BEGIN

```

```

    PROCESS (start,clk,stop)

```

```

        VARIABLE num : INTEGER RANGE 0 TO 255;

```

```

    BEGIN

```

```

        IF (clk'EVENT AND clk = '1') THEN

```

```

            IF (stop = '0' AND start = '0') THEN

```

```

                num := num+1;

```

```

            END IF;

```

```

        END IF;

```

```

        IF (start = '1') THEN num := 0; END IF;

```

```

        IF (stop = '1' AND start = '0') THEN number <= num; le <= '1';

```

```

        ELSE

```

```

            le <= '0';

```

```

            number <= 0;

```

```

        END IF;

```

```

    END PROCESS;

```

```

END ut;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ENTITY unclk IS
PORT (
    clk : IN BIT;
    nout : OUT BIT);
END unclk;

ARCHITECTURE be OF unclk IS
BEGIN
    PROCESS(clk)
        VARIABLE n : INTEGER RANGE 0 TO 55;
    BEGIN
        IF (clk'EVENT AND clk = '1') THEN
            n := n+1;
        END IF;
        IF (n = 50) THEN
            n := 0;
        END IF;
        IF (n < 25) THEN
            nout <= '1';
        ELSE
            nout <= '0';
        END IF;
    END PROCESS;
END be;

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านทำธุรกิจ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วน DELPHI

Na : จำนวนที่ Counter นับได้จากตัวรับตัวที่ 1
Nb : จำนวนที่ Counter นับได้จากตัวรับตัวที่ 2
Nc : จำนวนที่ Counter นับได้จากตัวรับตัวที่ 3
Nd : จำนวนที่ Counter นับได้จากตัวรับตัวที่ 4

if (Na-Nb-Nc+Nd)<>0 then

begin

Ra:=0.17*Na;

Rb:=0.17*Nb;

Rc:=0.17*Nc;

Rd:=0.17*Nd;

Cb:=2*(Ra-Rb);

Cc:=2*(Ra-Rc);

Cd:=2*(Ra-Rd);

Db:=sqr(Rb)-sqr(Ra)-625;

Dc:=sqr(Rc)-sqr(Ra)-625;

Dd:=sqr(Rd)-sqr(Ra)-1250;

n:=2500*(Cb+Cc-Cd);

X:=50*((Cc*Db)+(Cd*Dc)-(Cc*Dd)-(Cb*Dc))/n;

Y:=50*((Cb*Dc)+(Cd*Db)-(Cc*Db)-(Cb*Dd))/n;

R:=2500*(Db+Dc-Dd)/n;

Z:=sqrt(sqr(R)-sqr(X)-sqr(Y));

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้