

รตนำร่องด้วยระบบอัลตราโซนิก
CAR GUIDANCE BY USING ULTRASONIC SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ร.น.

๕๒๐๑๙

๕๕๕

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

เลขหมู่..... สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขทะเบียน..... **50328**

ปีการศึกษา 2545

วัน,เดือน,ปี..... **29 เม.ย. 2547**

.b.....

.i.....

.....ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้.....ไปใช้หรือเผยแพร่ต่อบุคคลอื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รณำร่งด้วยระบบอัลตราโซนิก

CAR GUIDANCE BY USING ULTRASONIC SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อปีการศึกษา 2545 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

หลังจากการทำโครงการนี้ทำให้ผู้จัดทำได้รับความรู้มากมาย ทั้งทางเรื่องของคลื่นอัลตราโซนิค มอเตอร์ไฟกระแสตรง อีกทั้ง FPGA และ ด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งความรู้ดังกล่าวนี้ส่วนใหญ่มาจากคำแนะนำของผู้มีอุปการะหลาย ๆ ท่าน ตั้งแต่อาจารย์ที่ปรึกษา อ. เทอดศักดิ์ ลีวหาทอง สำหรับคำแนะนำ และเอื้ออำนวยสถานที่ อีกทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงการครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาคอิเล็กทรอนิกส์ทุก ๆ คนที่ช่วยให้คำปรึกษา และยังคงคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ภาคคอมพิวเตอร์ที่ให้ทั้งคำปรึกษา และข้อเสนอแนะในทุก ๆ ด้านเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ชุมชนอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำปรึกษา และเอื้ออำนวยสถานที่ รวมทั้งอุปกรณ์ในการทำโครงการนี้

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากโครงการนี้ ผู้จัดทำขอมอบแก่ผู้มีอุปการะทุกท่าน

ชานะ เรืองดี วราชนสิน

นายชานะเรืองดี วราชนสิน

ศรัทธา สว่างศรี

นายศรัทธา สว่างศรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2545

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง รตนาร่องด้วยระบบอัลตราโซนิก

ผู้จัดทำ

1. นายชาญณรงค์ วรารณสิน รหัส 42010082
2. นายณัฐวุฒิ เต่งเสริม รหัส 42010111



(Signature)
.....
(เทอดศักดิ์ ถั่วหาทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รณำร่องด้วยระบบอัลตราโซนิก

CAR GUIDANCE BY USING ULTRASONIC SYSTEM

ผู้จัดทำ

1. นายชาญณรงค์ วราชนสิน รหัส 42010082
2. นายณัฐวุฒิ ส่งเสริม รหัส 42010111

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



(เทอดศักดิ์ ลีวาททอง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รตนำร่องด้วยระบบอัลตราโซนิก

นายชาญณรงค์ วรารณสิน รหัส 42010082

นายณัฐวุฒิ ส่งเสริม รหัส 42010111

อ. เทอดศักดิ์ ลีวหาทอง (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์นี้เสนอการสร้างรถเพื่อที่จะวิ่งเข้าหาเป้าหมายโดยที่สามารถกำหนดระยะห่างที่ใกล้ที่สุดจากวัตถุเป้าหมายมายังรถได้ ดังนั้น จุดประสงค์หลักในการสร้าง ประการแรกคือ การสร้างรถที่วิ่งเข้าหาเป้าหมาย และหยุดในระยะที่ต้องการได้ (กำหนดระยะเป็น 1 เมตร) และการที่รถจะสามารถวิ่งได้ พิจารณาปัจจัย 2 อย่าง ซึ่งก็คือ ทิศทาง และ ระยะทาง ปัจจัย 2 อย่างนี้ทำให้สามารถหาพิกัด (x, y) เทียบกับตัวรถได้ ส่วนประการที่สอง คือ ต้องการให้เป้าหมาย และ รถเป็นอิสระจากกัน หมายถึง การทำให้วงจรส่วนที่เป็นเป้าหมาย และ รถทำงานร่วมกันได้โดยใช้ Ultrasonic ซึ่งการใช้ Ultrasonic สามารถทำให้การติดต่อของตัวรับ , ตัวส่งเป็นอิสระจากกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CAR GUIDANCE BY USING ULTRASONIC SYSTEM

Mr. Channarong Waratanasin (ID. 42010082)

Mr. Nuttawut Songserm (ID. 42010111)

Thurdsak Leauhatong (Advisor)

Academic Year 2002

Abstract

This report presents a method for building a car which has two capabilities. First, it moves to an object which is used to guide the car. Second, it keeps a minimum distance between the car and the object. In order to approach the car, we invent a system which can simultaneously detect direction and distance between the car and the object. The system divides into two parts. First part called guidance is in the object. The guidance employs an ultrasonic transmitter for sending a guiding signal to the car. Second part called detection is in the car. The detection comprises three ultrasonic receivers arranged in line. Receivers detect the guiding signal in different time according to different distance between the transmitter and receivers. We use the different times to calculate position of the object referenced by the car. After that the car is controlled to move to the position of the object and stop when it close to the minimum distance between it and the object.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
สารบัญ	III
สารบัญรูปภาพ	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 หลักการและแนวทางในการออกแบบ	3
2.1 การทำงานทั้งหมดโดยรวม	3
2.2 ภาคส่งสัญญาณ	4
2.3 ภาครับสัญญาณ	4
2.4 หลักการรับส่งสัญญาณอัลตราโซนิกเพื่อหาพิค	5
2.5 การคำนวณหาพิคตำแหน่ง	10
2.6 พิคจําคัดของ Ultrasonic	14
บทที่ 3 การคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ	15
3.1 อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์	15
3.1.1 ตัวส่ง	15
3.1.2 ตัวรับ	15
3.2 ส่วนกำเนิดสัญญาณ 60 Hz (ตัวส่ง)	16
3.3 ส่วนกำเนิดสัญญาณ 40 KHz (ตัวส่ง)	17
3.4 ภาคขยายสัญญาณ (ตัวรับ)	18
3.4.1 วงจรขยายส่วนแรก และ ส่วนที่สอง	19
3.4.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	19
3.5 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator)	20
3.6 ส่วน FPGA	21
3.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์	24
3.8 ส่วนขับเคลื่อนมอเตอร์	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่กระบวนกรจัดทำค่า R, X, Y ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การทดลอง และ ผลการทดลอง	28
4.1 ผลการวัดสัญญาณที่เอาต์พุตส่วนต่าง ๆ	28
4.1.1 สัญญาณเอาต์พุตที่วงจรตัวส่งอัลตราโซนิก	28
4.1.2 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 1.0 เมตร	29
4.1.3 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 2.0 เมตร	30
4.1.4 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 3.0 เมตร	30
4.1.5 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 4.0 เมตร	31
4.1.6 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 5.0 เมตร	31
4.1.7 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 6.0 เมตร	32
4.1.8 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 7.0 เมตร	32
4.1.9 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 8.0 เมตร	33
4.1.10 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 9.0 เมตร	33
4.2 การตรวจสอบอัตราขยายของออปแอมป์	34
4.3 แสดงผลการ Simulate ของ FPGA	36
4.3.1 ผลการ Simulate ส่วนของ Block Control	36
4.3.2 ผลการ Simulate ส่วนของ Block Counter	38
4.3.3 ผลการ Simulate วงจรทั้งหมดของ FPGA	40
บทที่ 5 สรุป และวิจารณ์	42
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	
ภาคผนวก ค	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 แสดงการทำงานโดยรวม	2
รูปที่ 2.1 แสดงส่วนรับและส่ง สัญญาณซึ่งส่วนรับจะทำหน้าที่วิ่งเข้าหาตัวส่ง	3
รูปที่ 2.2 แสดงส่วนต่าง ๆ ของภาคส่ง	4
รูปที่ 2.3 แสดงส่วนภาครับทั้งหมด	5
รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งพิกัดต่าง ๆ	5
รูปที่ 2.5 เวลาต่าง ๆ เมื่อตัวรับรับสัญญาณจากตัวส่ง	6
รูปที่ 2.6 การวางตำแหน่งของตัวส่งและตัวรับแต่ละตัว	7
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา t_{MAX} กับ t ต่าง ๆ	8
รูปที่ 2.8 แสดงการส่งสัญญาณที่มีตัวรับเพียง 2 ตัว	9
รูปที่ 2.9 แสดงการวางตำแหน่ง และ ค่าพิกัดของตัวส่งและตัวรับ	10
รูปที่ 2.10 ซัดจำกัดของการรับสัญญาณอัลตราโซนิก	14
รูปที่ 3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา	17
รูปที่ 3.2 วงจรกำเนิดความถี่ 40KHz	17
รูปที่ 3.3 แสดงส่วนย่อยของภาคขยาย	18
รูปที่ 3.4 แสดงวงจรขยายส่วนแรก และ ส่วนที่สอง	19
รูปที่ 3.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง	20
รูปที่ 3.6 วงจรเปรียบเทียบแรงดันชนิดกลับเฟสแบบวงเปิด	21
รูปที่ 3.7 แสดง Block Diagram การทำงานของ Counter	22
รูปที่ 3.8 แสดงการต่อกับอุปกรณ์ภายนอกของ LM 18245T	26
รูปที่ 4.1 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุทของวงจรตัวส่งอัลตราโซนิก (ขณะยังไม่ใส่ตัวส่งอัลตราโซนิก)	28
รูปที่ 4.2 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุทของวงจรตัวส่งอัลตราโซนิก (ขณะใส่ตัวส่งอัลตราโซนิก)	29
รูปที่ 4.3 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุทของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 1.0 เมตร	29
รูปที่ 4.4 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุทของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 2.0 เมตร	30
รูปที่ 4.5 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุทของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 3.0 เมตร	30

เอกสารรูปที่ 4.6 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุทของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 4.0 เมตร นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ารูปที่ 4.7 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุทของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 5.0 เมตร สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 6.0 เมตร	32
รูปที่ 4.9 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 7.0 เมตร	32
รูปที่ 4.10 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 8.0 เมตร	33
รูปที่ 4.11 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 9.0 เมตร	33
รูปที่ 4.12 แสดงภาพสัญญาณที่ขาของอัลตราโซนิก	34
รูปที่ 4.13 แสดงรูปสัญญาณที่ขา 1 ของออปแอมป์ LF353	35
รูปที่ 4.14 แสดงภาพสัญญาณที่วัดได้ในส่วนเปรียบเทียบสัญญาณภาคสุดท้าย	36
รูปที่ 4.15 แสดงภาพส่วน Block Control	37
รูปที่ 4.16 แสดงภาพวงจรการทำงานภายใน Block Control	37
รูปที่ 4.17 แสดง Timing Diagram ของ Block Control ที่ได้จากการ Simulate	38
รูปที่ 4.18 แสดงภาพส่วน Block Counter	38
รูปที่ 4.19 แสดงภาพวงจรการทำงานภายใน Block Counter	39
รูปที่ 4.20 แสดง Timing Diagram ของ Block Counter ที่ได้จากการ Simulate	39
รูปที่ 4.21 แสดงภาพวงจรการทำงานทั้งหมดของ FPGA	40
รูปที่ 4.22 แสดง Timing Diagram วงจรการทำงานทั้งหมดของ FPGA	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความจริงของการรับข้อมูลจากFPGA	24
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าตารางความจริงของการทำงานส่วนควบคุมทิศทาง	25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ปริญญานิพนธ์นี้เสนอการสร้างรถนำร่องด้วย Ultrasonic ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังนี้

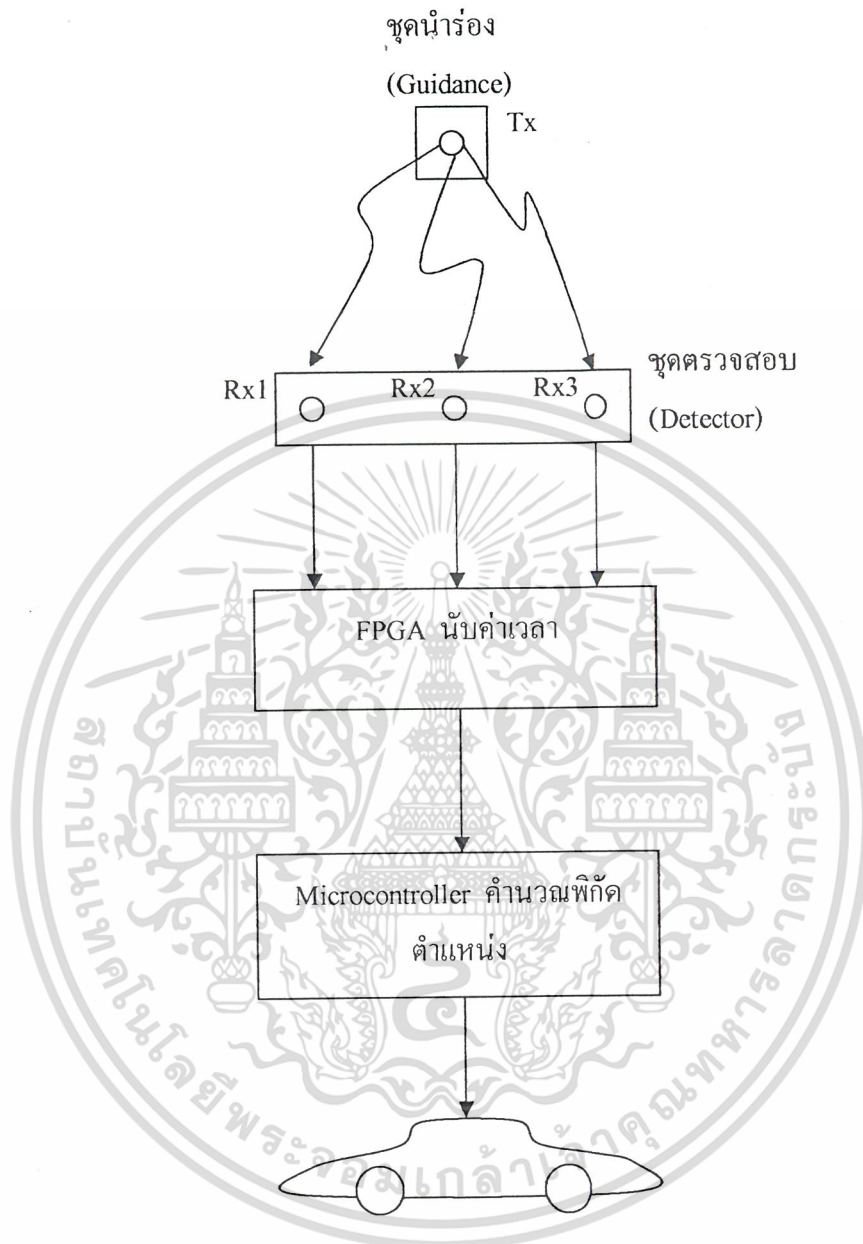
1. รถและวัตถุเป้าหมายมีการทำงานที่เป็นอิสระจากกัน และไม่มีสายเชื่อมต่อกัน
2. รถสามารถวิ่งเข้าไปหาอุปกรณ์นำร่อง และหยุดในระยะห่างที่กำหนดได้

จากคุณสมบัติทั้ง 2 อย่าง รถจำเป็นต้องอาศัยระบบค้นหาตำแหน่งเมื่อเทียบกับตัวรถของอุปกรณ์นำร่องเพื่อกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ และทราบระยะห่างระหว่างตัวรถ และอุปกรณ์นำร่อง ระบบที่ใช้ในโครงงานนี้อาศัยหลักการวัดระยะทางของคลื่น Ultrasonic โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก เรียกว่า ตัวนำร่อง (Guidance) ติดตั้งอยู่บนอุปกรณ์เป้าหมายสร้างจากชุดส่งสัญญาณ Ultrasonic 1 ตัว ส่งสัญญาณเป็นคาบเวลาที่แน่นอนเพื่อให้รถสามารถค้นหาตำแหน่งได้ตลอดเวลา ส่วนที่สอง เรียกว่า ชุดตรวจสอบ (Detector) ติดตั้งอยู่บนตัวรถ สร้างจากชุดรับสัญญาณ Ultrasonic

เนื่องจากเราต้องการให้ตัวรถ และวัตถุเป้าหมายเป็นอิสระจากกัน ดังนั้นปัญหาของการสร้างระบบค้นหาตำแหน่ง ก็คือ เราไม่สามารถจับเวลาที่คลื่น Ultrasonic ใช้เดินทางจากตัวส่งไปยังตัวรับ ดังที่ใช้ในวงจรวัดระยะทางแบบทั่วไปได้ จึงได้ใช้ตัวรับจำนวน 3 ตัว เพื่อรับสัญญาณ Ultrasonic โดยตัวรับทั้ง 3 ตัวจะถูกวางในตำแหน่งเรียงกันเป็นเส้นตรง ดังนั้นสัญญาณ Ultrasonic ที่รับได้โดยตัวรับแต่ละตัวจะมีระยะทางไม่เท่ากัน ส่งผลให้ค่าเวลาที่ Counter ของตัวรับแต่ละตัวนับได้มีค่าไม่เท่ากันด้วย ค่าเวลานี้มีจุดอ้างอิงที่ตัวรับตัวแรกที่รับสัญญาณได้โดยเมื่อตัวรับตัวแรกรับสัญญาณได้ก็จะให้ Counter ทั้งหมดเริ่มนับ ประกอบกับถ้ารับสัญญาณได้ก็จะให้ Counter หยุดนับ ดังนั้น Counter ตัวแรกจึงเริ่ม และหยุดนับในเวลาเดียวกันค่าที่นับได้จะเป็นศูนย์จึงเป็นจุดอ้างอิง เมื่อตัวรับตัวที่ 2 รับสัญญาณได้ Counter ตัวที่ 2 ก็จะหยุดนับ และเมื่อตัวรับตัวที่ 3 รับสัญญาณได้ก็ Counter ก็จะหยุดนับเช่นเดียวกัน ค่าเวลาที่ได้จึงต่างกันเมื่อเทียบกับตัวรับตัวแรกซึ่งเป็นจุดอ้างอิง แล้วจึงได้นำค่าเวลาที่แตกต่างกันนี้ส่งไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณหาพิกัดของเป้าหมายเทียบกับตัวรถ เมื่อได้ค่าพิกัดตำแหน่งแล้วจึงให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ไปควบคุมการวิ่งของรถให้ไปสู่เป้าหมายได้

หมายเหตุ Counter นี้ได้ใช้ FPGA สร้างขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แสดงการทำงานโดยรวม

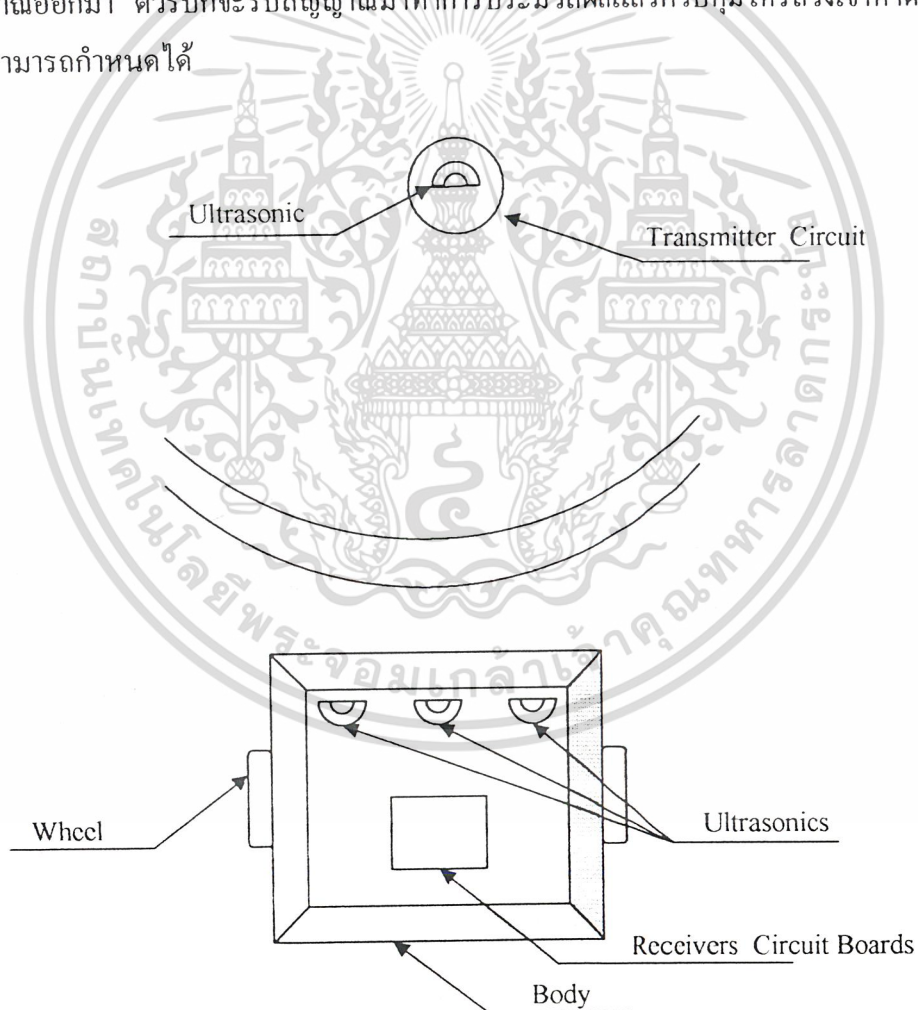
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและแนวทางการออกแบบ

2.1 การทำงานทั้งหมดโดยรวม

การทำงานของรถนำร่องด้วยอัลตราโซนิก นั้นจะมี 2 ภาคการทำงานด้วยกัน คือ ภาคส่งที่อยู่ในชุดนำร่อง(Guidance) และภาครับอยู่ในชุดตรวจสอบ(Detector) โดยในแต่ละส่วนจะมีส่วนประกอบแยกย่อยออกไปอีก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 และแผนภูมิรูปภาพการทำงานในรูปที่ 1 ซึ่งเราจะทำการวางตัวส่งไว้ ณ ตำแหน่งหนึ่งที่มีรัศมีห่างจากตัวรับระยะหนึ่ง จากนั้นก็จะส่งสัญญาณออกมา ตัวรับก็จะรับสัญญาณมาทำการประมวลผลแล้วควบคุมให้รถวิ่งเข้าหาตัวส่งในระยะที่สามารถกำหนดได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 2.1 แสดงส่วนรับและส่งสัญญาณซึ่งส่วนรับจะทำหน้าที่วิ่งเข้าหาตัวส่ง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ภาคส่งสัญญาณ

ในภาคส่งจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกัน ตามรูปที่ 2.2 คือ ส่วนวงจรถ่ายสัญญาณนาฬิกา 40 KHz จะทำขึ้นจากเกต และส่วนวงจรถ่ายสัญญาณผสม ซึ่งทำมาจากวงจรรวมกำเนิดสัญญาณเวลา(IC LM555) จะคอยทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยังส่วนวงจรถ่ายสัญญาณนาฬิกา 40 KHz ให้กับตัวอัลตราโซนิก ให้ทำงานเป็นจังหวะ ประมาณ 60 ครั้งต่อวินาที เพื่อที่จะถ่ายทอดสัญญาณไปให้กับตัวรับที่ภาครับสัญญาณ

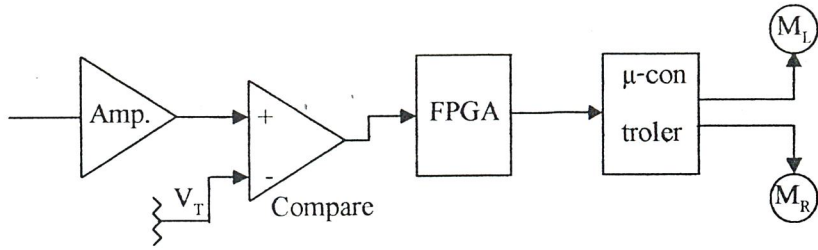


รูปที่ 2.2 แสดงส่วนต่าง ๆ ของภาคส่ง

2.3 ภาครับสัญญาณ

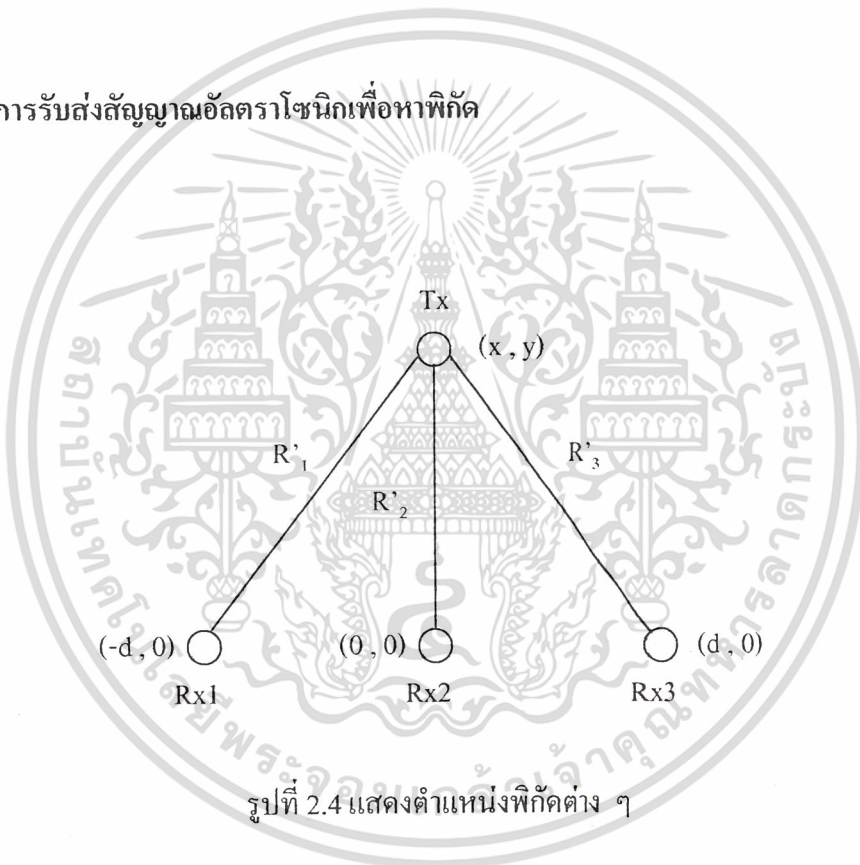
ส่วนภาครับจะมี ส่วนรับสัญญาณที่มาจากตัวส่ง โดยใช้อัลตราโซนิกรับเช่นกันแต่ใช้ร่วมกันทั้งหมด 3 ตัว นำสัญญาณที่ได้มาทำการขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้น แล้วทำการกรองความถี่ 40 KHz ออกให้เหลือสัญญาณความถี่ต่ำ จากนั้นก็จะส่งสัญญาณที่เหลือไปยังส่วนเปรียบเทียบแรงดัน หรือ วงจร Comparator เพื่อทำให้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมมากขึ้น นำสัญญาณที่ได้จะส่งต่อไปยัง FPGA(Field-Programmable Gate Array) ทำการหาค่าเวลาที่หน้าคลื่นมากระทบกับอัลตราโซนิกตัวรับแต่ละตัวว่ามีเวลาต่างกันเท่าไร เมื่อเสร็จแล้วก็จะทำการส่งข้อมูลของเวลาที่จับได้มาส่งให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลและควบคุมมอเตอร์ ให้รถมีทิศทางเดินไปยังตัวส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงส่วนภาครับทั้งหมด

2.4 หลักการรับส่งสัญญาณอัลตราโซนิกเพื่อหาพิกัด



รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งพิกัดต่าง ๆ

R'_1, R'_2, R'_3 คือ ระยะทางระหว่าง Tx ไปยัง Rx1, Rx2 และ Rx3 ตามลำดับ

R คือ ระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างตัวส่งและตัวรับ = $\text{Min}(R'_1, R'_2, R'_3)$

T_R คือ ระยะเวลาที่เสียงเดินทางจากตัวส่งไปยังตัวรับที่ใกล้ที่สุด

$(0, 0)$ คือ จุดอ้างอิงที่ตัวรับ (Origin)

$(-d, 0), (d, 0)$ คือ จุด 2 จุดอยู่ที่ตัวรับมีระยะห่าง $2d$

(x, y) คือ ตำแหน่งเป้าหมายเมื่อเทียบกับจุด $(0, 0)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความเร็วของเสียงมีค่าเท่ากับ 331 เมตรต่อวินาที ดังนั้นระยะทางที่ตัวส่งสัญญาณอัลตราโซนิกเดินทางผ่านอากาศไปยังตัวรับอัลตราโซนิกจะมีค่าเท่ากับ

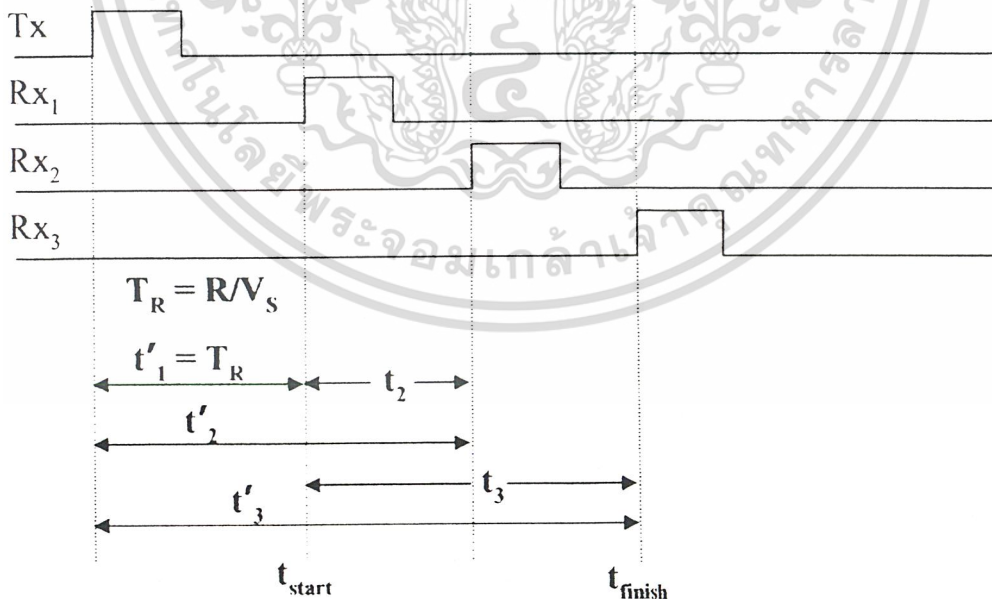
$$R = T_R/331 \quad (2.1)$$

ถ้าหากกำหนดให้ตัวส่งส่งสัญญาณมาให้กับตัวรับแล้วให้ตัวรับตัวที่ 1 (R_{x1}) รับสัญญาณได้ก่อน ดังรูปที่ 2.5 ดังนั้นแล้ว t'_1 คือเวลาที่ตัวส่งสัญญาณมาให้กับตัวรับตัวที่ 1 ได้ใช้ไป ในระบบเก่าตัวส่งสัญญาณอัลตราโซนิกเดินทางมาถึงตัวรับก็จะสามารถทราบเวลาค่า t'_1, t'_2, t'_3 ได้ทันทีและก็จะทราบค่าระยะทางระหว่างเป้าหมายกับตัวรถได้ตามลำดับ เนื่องจากตัวรับและตัวส่งจะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน แต่ในระบบที่จะสร้างนี้ตัวรับสัญญาณและตัวส่งจะเป็นอิสระต่อกันเราก็จะสามารถหาระยะทางระหว่างตัวรับกับตัวส่งได้โดยใช้ค่าความแตกต่างระหว่างเวลาของตัวรับสัญญาณต่าง ๆ แทนการหาค่าเวลาระหว่างตัวรับกับตัวส่งแต่ละตัวโดยตรง

โดยที่

$$t_2 = t'_2 - T_R \quad (2.2)$$

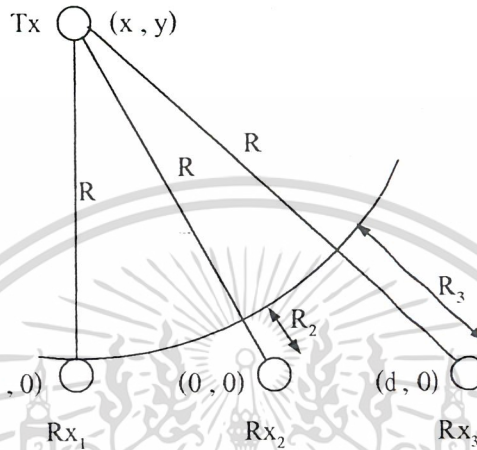
$$t_3 = t'_3 - T_R \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.5 เวลาต่าง ๆ เมื่อตัวรับรับสัญญาณจากตัวส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการการเดินทางของเสียงที่มีลักษณะเป็นวงกลมจากด้านหน้าของแหล่งกำเนิดถ้า หากกำหนดให้ตัวรับกับตัวส่งวางอยู่ในตำแหน่งดังรูปที่ 2.6 ทำให้เรากำหนดหาค่าระยะทางระหว่างตัวส่งกับตัวรับได้



รูปที่ 2.6 การวางตำแหน่งของตัวส่งและตัวรับแต่ละตัว

จากรูปที่ 2.6 เราจะได้ความสัมพันธ์ของระยะทางระหว่างตัวรับกับตัวส่ง คือ

$$R'_1 = R + R_1 \quad (2.4)$$

$$\text{หรือ } R'_1 = R \quad ; R_1 = 0 \quad (2.5)$$

$$R'_2 = R + R_2 \quad (2.6)$$

$$R'_3 = R + R_3 \quad (2.7)$$

จากสมการวงกลมจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$(x + d)^2 + y^2 = (R + R_1)^2 \quad (2.8)$$

$$x^2 + y^2 = (R + R_2)^2 \quad (2.9)$$

$$(x - d)^2 + y^2 = (R + R_3)^2 \quad (2.10)$$

ตัวแปรในสมการของเราที่ต้องการหาคือ x, y และ R ส่วนค่าคงที่ R_1, R_2 และ R_3 หาได้จากวงจรจับเวลาที่เรากำลังสร้างขึ้น จากนั้นก็ทำการแก้สมการ

$$R_1 = 0 \quad ; t_1 = 0 \quad (2.11)$$

$$R_2 = t_2 \times V_s \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ $R_3 = t_3 \times V_s$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ (2.13) ด้านการคำนวณ

ไม่ว่ากรณีใด นำค่า R_1, R_2, R_3 ที่ได้ไปแทนลงในสมการ 2.8-2.10 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้ t_{START} หรือ t_{STOP1} เป็นเวลาที่ตัวรับตัวแรกรับสัญญาณที่ตัวส่งส่งสัญญาณมาได้ก่อน ส่วน t_{STOP2} และ t_{STOP3} หรือ t_{FINISH} คือเวลาที่ตัวรับตัวที่ 2 และตัวที่ 3 สามารถรับได้ในเวลาต่อมา จากรูปที่ 2.7 จะได้ความสัมพันธ์ทางเวลาคือ

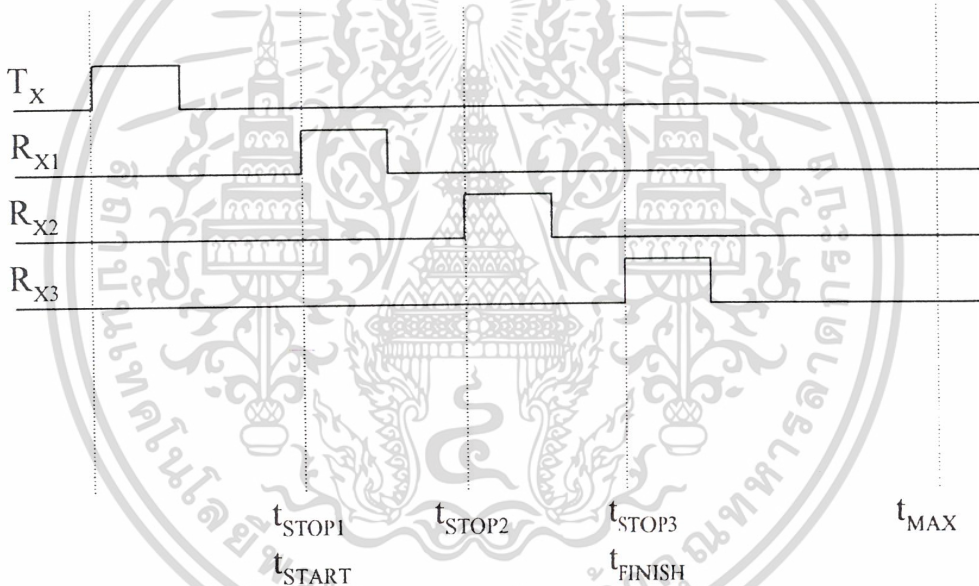
$$t_1 = t_{STOP1} - t_{START} \quad (2.14)$$

$$t_2 = t_{STOP2} - t_{START} \quad (2.15)$$

$$t_3 = t_{FINISH} - t_{START} \quad (2.16)$$

และ

$$t_{FINISH} - t_{START} \leq t_{MAX} \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา t_{MAX} กับ t ต่าง ๆ

ถ้าตัวรับทั้ง 3 ไม่สามารถรับสัญญาณได้ครบก่อนเวลา t_{MAX} นั่นก็หมายความว่าจะต้องมีตัวรับตัวใดตัวหนึ่งที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้ ดังนั้นก็จะต้องทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวเพื่อที่จะรับสัญญาณจากตัวส่งครบทั้ง 3 ตัวก่อนเวลา t_{MAX}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากเราพิจารณาการรับสัญญาณจากตัวส่งที่มีตัวรับเพียง 2 ตัว ดังรูปที่ 2.8 จากความสัมพันธ์ของรูป 3 เหลี่ยมก็จะได้ว่า

$$R+B \leq R+D \quad (2.18)$$

$$B \leq D \quad (2.19)$$

ถ้าหากระยะทางระหว่างตัวรับ 2 ตัวที่มากที่สุด คือ D_{MAX} แล้ว

$$\text{เราจะได้ว่า} \quad R_1, R_2, R_3 \leq D_{MAX} \quad (2.20)$$

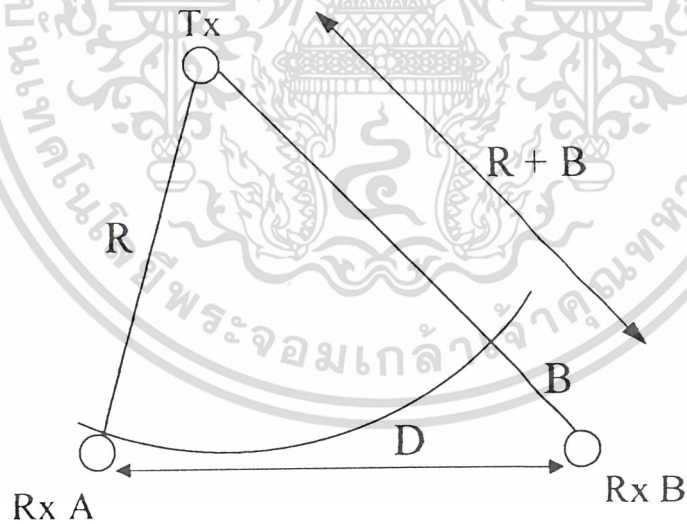
จาก

$$t_{MAX} = D_{MAX} / V_s \quad (2.21)$$

จะได้

$$t_1, t_2, t_3 \leq t_{MAX} \quad (2.22)$$

D = ระยะห่างระหว่างตัวรับ 2 ตัว



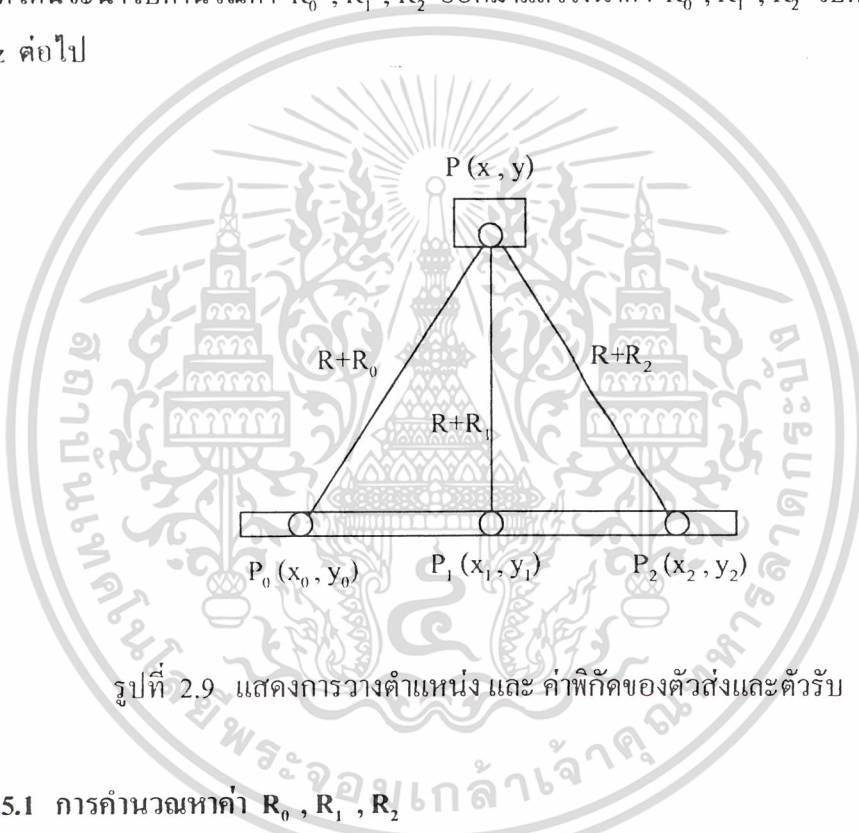
รูปที่ 2.8 แสดงการส่งสัญญาณที่มีตัวรับเพียง 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง

การคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง อาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ โดยมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

สมมติว่าตัวส่งอยู่ที่ตำแหน่ง (x, y) และมีตัวรับทั้ง 3 ตัววางในตำแหน่งเรียงกันเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.5 เมื่อส่งสัญญาณอัลตราโซนิกจากตัวส่งไปยังตัวรับทั้ง 3 ตัว ระยะเวลาที่คลื่นเดินทางระหว่างตัวส่งกับตัวรับจะถูกนับด้วยเคาน์เตอร์ ซึ่งจะได้ค่าเวลาที่ต่างกันเมื่อเทียบกับตัวรับตัวแรก ค่าที่ได้นี้จะนำไปคำนวณค่า R_0, R_1, R_2 ออกมาแล้วจึงนำค่า R_0, R_1, R_2 ไปคำนวณหาค่า x, y, z ต่อไป



รูปที่ 2.9 แสดงการวางตำแหน่ง และ ค่าพิกัดของตัวส่งและตัวรับ

2.5.1 การคำนวณหาค่า R_0, R_1, R_2

เมื่อเราได้ค่าที่เคาน์เตอร์แต่ละตัวนับได้ เราสามารถหาเวลาที่ใช้ได้จากสูตรต่อไปนี้

$$T = N / f \quad (2.23)$$

โดย T คือ เวลาที่แตกต่างกันระหว่างตัวรับตัวแรก กับ ตัวรับใดๆ

N คือ จำนวนที่เคาน์เตอร์นับได้

f คือ ความถี่ที่เคาน์เตอร์ใช้นับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม กรุณาแจ้งที่มาแก่ผู้ดูแลระบบได้ที่ admin@kmutt.ac.th ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จาก} \quad S = VT \quad (2.24)$$

$$\text{จะได้} \quad R_0 = VN_0 / f \quad (2.25)$$

$$R_1 = VN_1 / f \quad (2.26)$$

$$R_2 = VN_2 / f \quad (2.27)$$

โดย V คือ ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก 331 m/s

R_0, R_1, R_2 คือ รัศมีที่แตกต่างกันระหว่างตัวรับใดๆ กับตัวรับตัวแรกที่ได้
รับสัญญาณจากตัวส่ง

ต่อจากนั้นเราจะนำค่า R_0, R_1, R_2 ไปคำนวณหาค่า x, y, z ต่อไป

2.5.2 การคำนวณหาค่า X, Y, R

สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการวงกลม ดังนี้

$$(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 = (R + R_0)^2 \quad (2.28)$$

$$(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 = (R + R_1)^2 \quad (2.29)$$

$$(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 = (R + R_2)^2 \quad (2.30)$$

จากสมการ (2.28)

$$\begin{aligned} X^2 - 2XX_0 + X_0^2 + Y^2 - 2YY_0 + Y_0^2 &= R^2 + 2RR_0 + R_0^2 \\ X^2 + Y^2 - R^2 &= 2XX_0 + 2YY_0 + 2RR_0 - X_0^2 - Y_0^2 + R_0^2 \end{aligned} \quad (2.31)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการ (2.29), (2.30)

$$X^2 + Y^2 - R^2 = 2XX_1 + 2YY_1 + 2RR_1 - X_1^2 - Y_1^2 + R_1^2 \quad (2.32)$$

$$X^2 + Y^2 - R^2 = 2XX_2 + 2YY_2 + 2RR_2 - X_2^2 - Y_2^2 + R_2^2 \quad (2.33)$$

เอกสารจากสมการ (2.31) = (2.33) จะได้ 3 สมการ คือ (2.31) = (2.32), (2.31) = (2.33)
ไม่ว่า (2.32) = (2.33) อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก (2.31) = (2.32) จะได้

$$\begin{aligned} 2XX_0 + 2YY_0 + 2RR_0 - X_0^2 - Y_0^2 + R_0^2 &= 2XX_1 + 2YY_1 + 2RR_1 - X_1^2 - Y_1^2 + R_1^2 \\ (2X_0 - 2X_1)X + (2Y_0 - 2Y_1)Y + (2R_0 - 2R_1)R &= X_0^2 + Y_0^2 - R_0^2 - X_1^2 - Y_1^2 + R_1^2 \quad (2.34) \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน (2.31) = (2.33) , (2.32) = (2.33) จะได้

$$(2X_0 - 2X_2)X + (2Y_0 - 2Y_2)Y + (2R_0 - 2R_2)R = X_0^2 + Y_0^2 - R_0^2 - X_2^2 - Y_2^2 + R_2^2 \quad (2.35)$$

$$(2X_1 - 2X_2)X + (2Y_1 - 2Y_2)Y + (2R_1 - 2R_2)R = X_1^2 + Y_1^2 - R_1^2 - X_2^2 - Y_2^2 + R_2^2 \quad (2.36)$$

จากสมการ (2.34) , (2.35) , (2.36) กำหนดให้

$$A_1 = 2X_0 - 2X_1 \quad B_1 = 2Y_0 - 2Y_1 \quad C_1 = 2R_0 - 2R_2$$

$$A_2 = 2X_0 - 2X_2 \quad B_2 = 2Y_0 - 2Y_2 \quad C_2 = 2R_0 - 2R_2$$

$$A_3 = 2X_1 - 2X_2 \quad B_3 = 2Y_1 - 2Y_2 \quad C_3 = 2R_1 - 2R_2$$

$$K_1 = X_0^2 + Y_0^2 - R_0^2 - X_1^2 - Y_1^2 + R_1^2$$

$$K_2 = X_0^2 + Y_0^2 - R_0^2 - X_2^2 - Y_2^2 + R_2^2$$

$$K_3 = X_1^2 + Y_1^2 - R_1^2 - X_2^2 - Y_2^2 + R_2^2$$

จะได้สมการ

$$A_1X + B_1Y + C_1R = K_1$$

$$A_2X + B_2Y + C_2R = K_2$$

$$A_3X + B_3Y + C_3R = K_3$$

แก้สมการหาค่า X, Y, R โดยใช้ Cramer's Rule

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท1 Determinant

$$\Delta = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix}$$

จะได้ค่า X, Y, R ดังนี้

$$X = \frac{\begin{bmatrix} K_1 & B_1 & C_1 \\ K_2 & B_2 & C_2 \\ K_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix}}{\Delta}$$

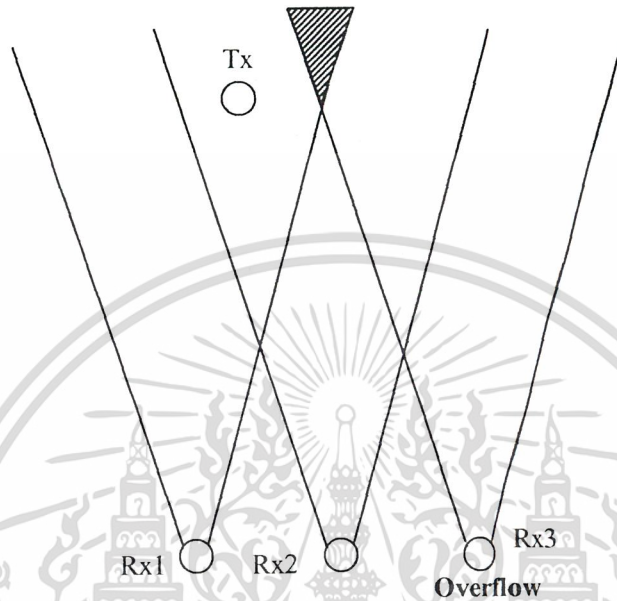
$$Y = \frac{\begin{bmatrix} A_1 & K_1 & C_1 \\ A_2 & K_2 & C_2 \\ A_3 & K_3 & C_3 \end{bmatrix}}{\Delta}$$

$$R = \frac{\begin{bmatrix} A_1 & B_1 & K_1 \\ A_2 & B_2 & K_2 \\ A_3 & B_3 & K_3 \end{bmatrix}}{\Delta}$$

ค่าพิกัด X, Y, R จะถูกนำไปใช้ในภาคประมวลผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณและเมื่อได้พิกัดแล้วจึงนำไปควบคุมรถให้สามารถวิ่งสู่เป้าหมายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ขีดจำกัดของ Ultrasonic



รูปที่ 2.10 ขีดจำกัดของการรับสัญญาณอัลตราโซนิก

Ultrasonic นั้นก็มีขีดจำกัด คือ ในตัวรับ และตัวส่งนั้น มีมุมในการทำงานเพียง 30 องศาเท่านั้นจึงจะเห็นได้จากในรูป เรามีตัวรับ 3 ตัว และมีตัวส่ง 1 ตัว ซึ่งเมื่อตัวส่งอยู่ในตำแหน่งดังรูปแล้วจะมีตัวรับที่สามารถรับสัญญาณได้ 2 ตัว คือ Rx1 และ Rx2 ส่วนตัวรับ Rx3 ไม่สามารถรับสัญญาณได้ จึงทำให้วงจร Counter นับจนเกิด Overflow ขึ้นเป็นสาเหตุให้การทำงานไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ต้องแก้ไขโดยทำให้ตัวส่งอยู่ในระยะที่ตัวรับทั้ง 3 ตัวสามารถรับสัญญาณได้ซึ่งก็คือต้องทำให้ตัวส่งอยู่ในส่วนที่เรณานั้นเอง

จากหลักการของ Timing Diagram และแนวคิดข้างต้นเราสามารถออกแบบวงจรดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบ

ในบทที่ 2 เราได้กล่าวถึงการทำงานในส่วนต่าง ๆ อย่างคร่าว ๆ กันมาแล้ว ในบทนี้จะเป็นการอธิบายวงจรส่วนต่าง ๆ ที่ได้นำมาใช้

3.1 อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

คือ ทรานสดิวเซอร์แบบ piezoelectric ที่ใช้สารเซรามิก (หรือที่ผู้ผลิตบางราย เรียกว่า อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบเซรามิก) จะมีอยู่ 2 อย่าง คือ ตัวส่ง หรือ Transmitter และ ตัวรับ (เสียง) หรือ Receiver

3.1.1 ตัวส่ง ก็คือ อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่ถูกออกแบบเจาะจงมาให้แปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุ ให้ออกมาเป็นคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิก หน้าที่ของตัวส่งจึงคล้าย ๆ กับเป็นลำโพง

3.1.2 ตัวรับ ก็คือ อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่ถูกออกแบบเจาะจงมาให้แปลงคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิกที่มาตกกระทบตัวมัน ให้ออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า หน้าที่ของตัวรับจึงคล้าย ๆ กับเป็นไมโครโฟน ตัวอักษรย่อว่า T_x (ย่อมาจากคำว่า Transmitter) และ R_x (ย่อมาจากคำว่า Receiver) กำกับอยู่ด้วย หรืออาจจะใช้คำพูดกำกับให้ชัดเจนลงไปเลย เหตุที่มีการใช้สัญลักษณ์เหมือนกันก็เพราะว่าหน้าที่ของตัวรับและตัวส่งที่ออกแบบมาให้ใช้งานคู่กันจะมีหน้าที่เหมือนกันทุกกระเปาะนี้แหละ แต่จะมีเบอร์บอกมาที่ด้านข้างให้รู้ว่าตัวใดเป็นตัวส่งและตัวใดเป็นตัวรับอีกทั้งยังมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกันมากจนสามารถนำมาใช้งานแทนกันได้โดยตรงหลาย ๆ การใช้งาน

ในการใช้งานแทนกันนั้นก็จะต้องขึ้นกับลักษณะของงานที่จะนำไปใช้เท่านั้น แต่หากเลือกที่จะไม่ใช่แทนกันได้ก็จะต้องดูว่าเนื่องจากว่าความไวในการรับหรือส่งนั้นจะไม่เท่ากัน ฉะนั้นในบางงานก็จะไม่เหมาะสมในการที่จะนำมาใช้แทนกัน

อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบเซรามิกที่มีจำหน่ายกันจะมีค่าความถี่กำหนดให้เลือกตั้งแต่ 23 kHz ขึ้นไปจนถึง 40 kHz แต่ที่พบเห็นกันบ่อยก็มี 23 kHz, 25 kHz, และ 40 kHz โดยที่ความถี่ 40 kHz เป็นรุ่นที่นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะมีทิศทางดีกว่า

เนื่องจากความถี่ที่กำหนดจะมีค่าเบี่ยงเบนจาก 40 KHz ในการนำไปใช้รับส่งข้อมูลกันจะต้องนำวงจรที่ปรับความถี่ให้ได้ความถี่กำหนดของตัวอัลตราโซนิก จึงจะได้ระยะทางในการรับส่งข้อมูลสูงสุด โดยดูจากค่าแอมพลิจูดของตัวรับให้มีค่าสูงสุด ดังนั้นในการสร้างวงจรตัวส่ง

เอกสารฉบับนี้เผยแพร่โดยมูลนิธิส่งเสริมศิลปวัฒนธรรมแห่งชาตินับเป็นลิขสิทธิ์ของมูลนิธิฯ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อมูลนิธิฯ โทร. 0-2626-1111 หรือ 0-2626-1112

ไม่ว่าในกรณีใดๆ มูลนิธิฯ ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาเอกสารฉบับนี้ และขอสงวนสิทธิ์ในชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ส่วนกำเนิดสัญญาณ 60 Hz (ตัวส่ง)

วงจรสัญญาณนาฬิกา 60 Hz นั้นได้ใช้วงจรรวมกำเนิดสัญญาณนาฬิกาพื้นฐาน LM555 และสัญญาณนาฬิกาที่ได้นั้นจะต้องกำหนดควิตีไซเคิล(Duty Cycle) ดังนั้นจึงเลือกที่ 25% เพื่อที่มาใช้ในการกระตุ้นวงจรสัญญาณ 40 KHz ต่อไป

ความถี่ของวงจรตามรูปที่ 3.1 สามารถหาได้โดย

$$f = \frac{1.44}{(R101 + 2VR101)C102} \quad (3.1)$$

$$T_{ON} = 0.693(R101 + VR101)C102 \quad (3.2)$$

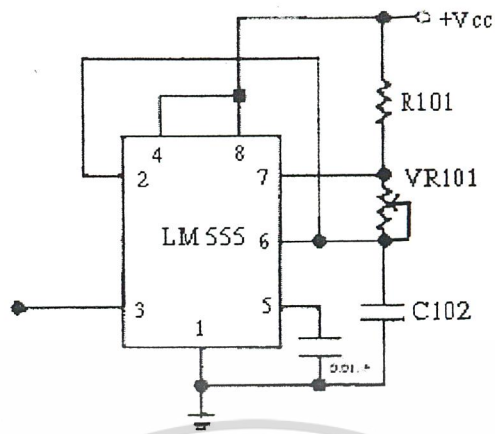
$$T_{OFF} = 0.693(VR101)C102 \quad (3.3)$$

$$\text{หรือ} \quad \%D = \frac{VR101}{(R101 + 2VR101)} \times 100 \quad (3.4)$$

ซึ่ง
 f คือ ความถี่ที่วงจรผลิตออกมา (Hz)
 T_{ON} คือ ช่วงสัญญาณนาฬิกาที่เล็ยมซึกบวค (Sec)
 T_{OFF} คือ ช่วงสัญญาณนาฬิกาที่เล็ยมซึกลบ (Sec)
 D คือ อัตราส่วนระหว่าง T_{ON} ต่อ $T_{OFF} + T_{ON}$

ดังนั้นแล้วเราต้องการความถี่ประมาณ 40 KHz (ความถี่กำหนดของอุปกรณ์อัลตราโซนิก) แทนลงในสมการ 3.1 และควิตีไซเคิล 25% แทนลงในสมการ 3.4 จะได้ค่า R101 และ VR101 เท่ากับ 270 และ 127 โดยประมาณ ดังนั้นแล้ว VR101 จึงใช้เป็นตัวต้านทานแบบปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

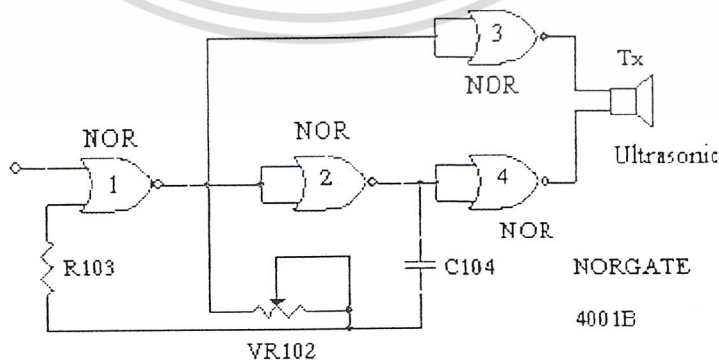


รูปที่ 3.1 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

แต่หากนำวงจรไปวัดสัญญาณจะเห็นได้ว่าค่าควิตซ์ไซเคิลจะได้ 75% ซึ่งเป็นข้อจำกัดของวงจรรวม LM555 ที่ไม่สามารถสร้างสัญญาณที่มีควิตซ์ไซเคิลต่ำกว่า 50% ได้ สัญญาณที่ได้จะเป็นช่วงเวลาสัญญาณขาลงเป็น 25% แทน

3.3 ส่วนกำเนิดสัญญาณ 40 KHz (ตัวส่ง)

วงจรถ่ายสัญญาณนาฬิกา สามารถใช้วงจรรวมเชิงเลข (IC Digital) จำพวก CMOS ในที่นี้ได้ นำเอาเบอร์ 4001B มาใช้ ซึ่งภายในจะประกอบด้วยนอร์เกต (NOR gate) จำนวน 4 ตัว ดังในรูปที่ 3.2 การทำงานให้เป็นวงจรถ่ายความถี่จะใช้เกต 2 ตัว ส่วนอีก 2 ตัวที่เหลือจะนำมาต่อเป็นภาคบัฟเฟอร์เพื่อกันโหลดไม่ให้มีผลต่อวงจรถ่ายความถี่ บัฟเฟอร์แต่ละตัวจะนำเอาสัญญาณที่เหลื่อม 2 สัญญาณ ซึ่งมีเฟสต่างกันมาขับตัวอัลตราโซนิค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการรูปที่ 3.2 วงจรถ่ายความถี่ 40KHz แต่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

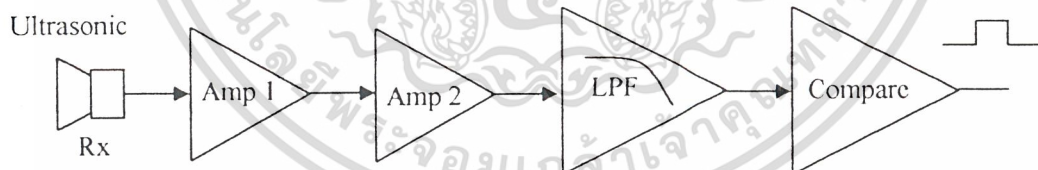
ในวงจรตามรูปที่ 3.2 จะทำงานก็ต่อเมื่อมีสัญญาณสภาวะต่ำเข้ามาทางอินพุทของ นอร์เกตต์วี่ที่ 1 แล้วจะให้เอาต์พุทเป็นสัญญาณนาฬิกา 40 KHz โดยความถี่สามารถกำหนดได้ด้วยค่า VR102 และ C104 ตามสมการที่ 3.5

$$f \cong \frac{(VR102)C104}{2.2} \quad (3.5)$$

จะได้ค่า VR102 ซึ่งเป็นตัวต้านทานปรับค่าได้เลือกใช้ค่า 50 K เพื่อที่จะปรับความถี่ได้กว้าง และ C104 เท่ากับ 180pF

3.4 ภาคขยายสัญญาณ (ตัวรับ)

วงจรภาคขยายทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่รับเข้ามาจากตัวรับอัลตราโซนิกแล้วทำให้สัญญาณใหญ่ขึ้นตามรูปที่ 3.3 ในส่วนนี้เองถ้าภาคขยายมีการขยายที่ดีจะส่งผลไปยังการทำงานและประสิทธิภาพการทำงานทั้งหมดโดยรวม ซึ่งในวงจรได้นำเอาไอซีเบอร์ LF353 ซึ่งเป็นไอซี Dual Amplifier มาขยายสัญญาณอัลตราโซนิก ในภาคขยายส่วนแรกได้ทำการขยายสัญญาณโดยรวมก่อน จากนั้นก็จะทำการส่งไปยังภาคขยายส่วนที่สองเพื่อขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้นอีก



รูปที่ 3.3 แสดงส่วนย่อยของภาคขยาย

หลังจากที่ทำการส่งไปขยายในส่วนที่สองแล้วนั้นสัญญาณที่ได้นำไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่งให้เหลือเพียงสัญญาณ 60 Hz เท่านั้น แล้วจึงส่งไปยังภาควงจรเปรียบเทียบแรงดันเพื่อที่จะทำให้เป็นคลื่นสี่เหลี่ยมมากยิ่งขึ้น

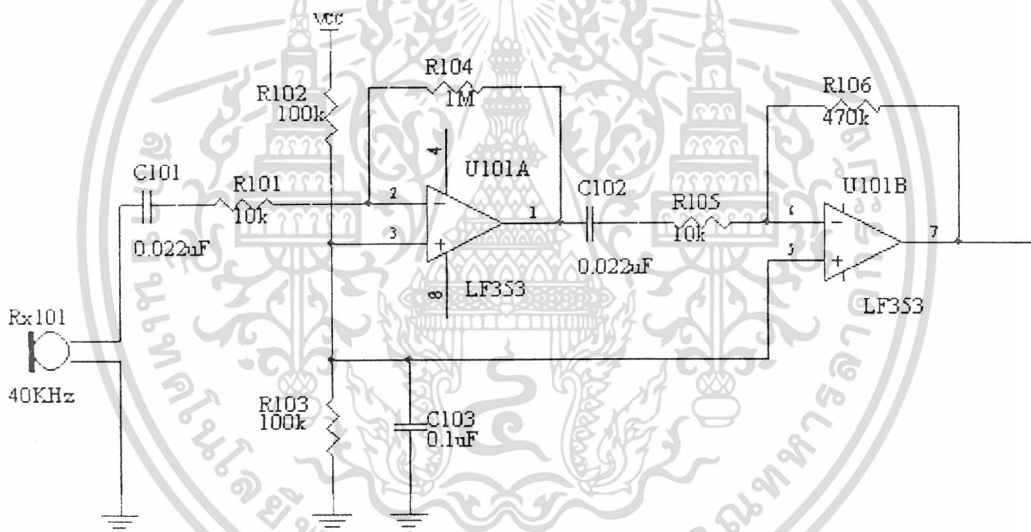
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 วงจรขยายส่วนแรก และ ส่วนที่สอง

วงจรของ AMP1 และ AMP2 สามารถเขียนได้ตามรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นวงจรขยายแบบกลับเฟส อัตราขยายของวงจรทาง AC มีค่าตามสมการที่ 3.6 และ 3.7 ทั้งภาคแรก และ ภาคที่สอง

$$A_{v1} = - \frac{R104}{R101} \quad (3.6)$$

$$A_{v2} = - \frac{R106}{R105} \quad (3.7)$$



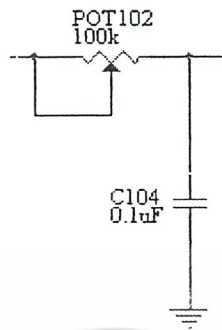
รูปที่ 3.4 แสดงวงจรขยายส่วนแรก และ ส่วนที่สอง

3.4.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านตามรูปที่ 3.5 เป็นวงจรกรองความถี่อันดับหนึ่ง (First Order) จะทำหน้าที่กรองให้เหลือแต่ความถี่ต่ำ ตามความถี่ที่เราต้องการ ซึ่งเรากำหนดความถี่ต่ำผ่านได้โดย

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่ง

ในภาพจะเห็นว่ามีการใช้ความต้านทานแบบปรับค่าได้เพื่อความสะดวกในการปรับค่าความถี่ต่ำผ่าน หรือ Low pass filter ได้อย่างสะดวก และในที่นี้ค่าที่ปรับใช้นั้นมีค่าโดยประมาณเป็น $POT102 = 16K\Omega$

3.5 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator)

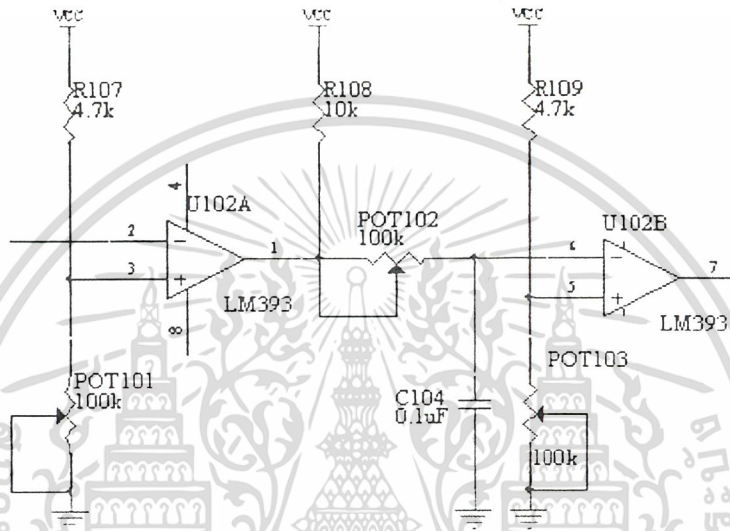
วงจรเปรียบเทียบแรงดันจะมีลักษณะการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) วงจรให้เอาท์พุทจะเป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Signal) วงจรจะทำหน้าที่ผลิตเอาท์พุท 2 ค่า หรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับการจัดระดับสัญญาณที่อินพุท อย่างไรก็ตามวงจรเปรียบเทียบแรงดันซึ่งใช้งานอยู่ทั่วไป เป็นชนิดที่ให้เอาท์พุท 2 ระดับ สำหรับการใช้งานได้ใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบวงเปิด (Open-loop Comparator) และเป็นชนิดกลับเฟส (Inverting)

ในส่วนนี้จะใช้ออปแอมป์มาใช้ในการเปรียบเทียบกับระดับแรงดันอีกขาหนึ่ง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นรูปคลื่นสัญญาณที่เป็นสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นว่ามียังวงจรเปรียบเทียบแรงดันอยู่ 2 ชุด คือ U102A และ U102B และวงจรที่อยู่ระหว่างทั้ง 2 ชุด คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั่นเองซึ่งได้อธิบายไปในตอนต้นแล้ว จากวงจรเปรียบเทียบแรงดันชุด U102A ซึ่งรับสัญญาณที่ได้จากการขยายของ AMP2 มาทำการเปรียบเทียบเพื่อให้สัญญาณมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แต่สัญญาณก็ยังมีความถี่สูงผสมอยู่ด้วย ซึ่งก็คือ 40 kHz ผสมอยู่ ดังนั้นจึงต้องผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะเหลือสัญญาณความถี่ต่ำ 60 Hz จากนั้นจึงผ่านไปวงจรเปรียบเทียบแรงดันอีกทีหนึ่งซึ่งคือ ชุด U102B ทำการเปรียบเทียบจะได้สัญญาณสี่เหลี่ยมที่ติดตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานปรับค่าได้ POT101 และ POT103 นั้นเป็นการปรับแรงดัน V_{REF} เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณให้ได้ตามต้องการในที่นี้ได้ปรับไว้ให้มีค่าดังนี้
 $POT101 = 33.7 K\Omega$, $POT103 = 17.05 K\Omega$



รูปที่ 3.6 วงจรเปรียบเทียบแรงดันชนิดกลับเฟสแบบวงเปิด

แรงดันที่เอาท์พุทจะมีค่าเท่ากับ

$$V_o = A(V_+ - V_-) \tag{3.9}$$

เมื่อ A เป็นอัตราขยายแบบวงเปิด โดยทั่วไปจะมีค่าสูงมากเป็นผลให้ $V_{SS} \leq V_o \leq V_{CC}$ ดังนั้นแล้วหากเราใช้ V_{CC} เท่ากับ +5V และ V_{SS} เท่ากับ 0V ก็จะได้แรงดันทางเอาท์พุทแกว่งอยู่ที่ระดับลอจิก 0 และ 5 นั่นเอง

3.6 ส่วน FPGA

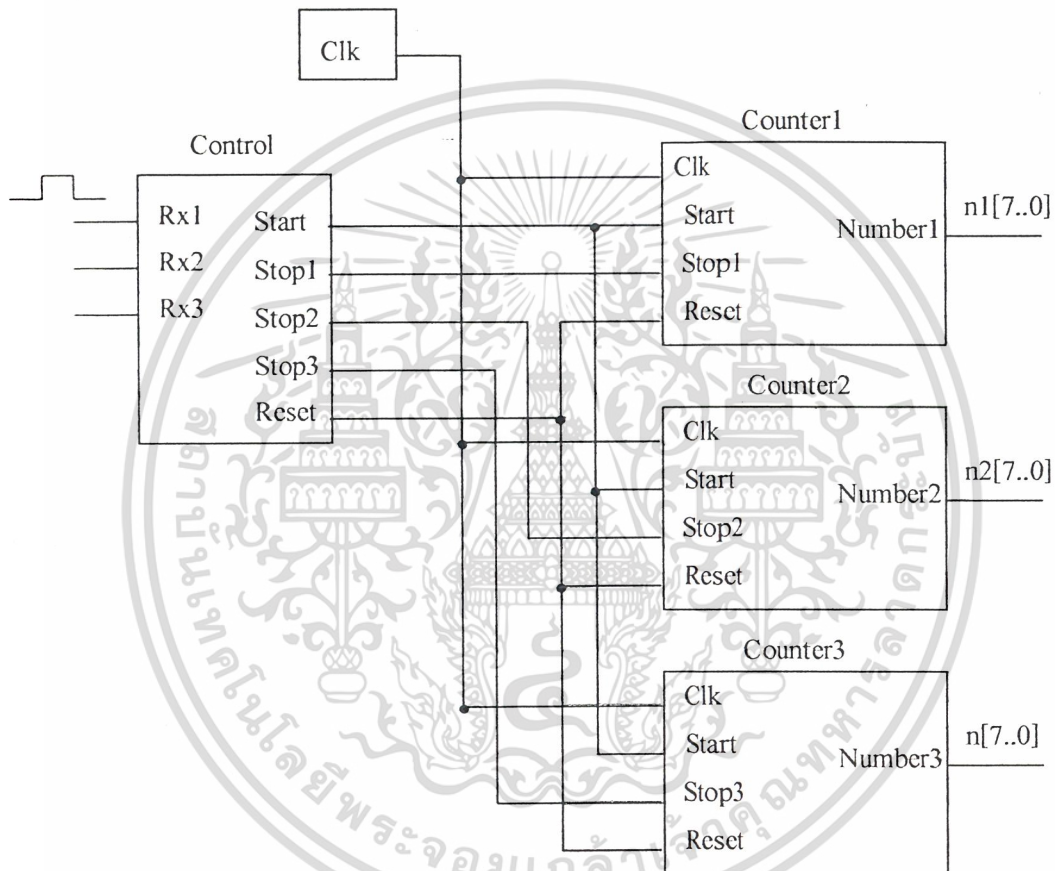
การนับสัญญาณค่าเวลา ได้นำ FPGA มาใช้งานซึ่งภายในมีตัวนับเวลาจำนวน 3 ตัวด้วยกัน

โดยภายในจะสร้างเป็นวงจรเกทหลาย ๆ ตัวนำมาประกอบกัน สามารถจะสร้างจากภาษารูปภาพ (Graphic Editor File) หรือภาษา VHDL ก็จะได้วงจรที่นับค่าเวลาที่ต่างกันของอัลตราโซนิกแต่ละ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวที่รับสัญญาณมาจากตัวส่งได้ ส่วนค่าที่นับได้นี้ จะส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ค่าที่ส่งไปนั้นจะเป็นค่าเชิงเลขจำนวน 8 บิตเพื่อจะนำไปคำนวณต่อไป

FPGA เป็นส่วนสำหรับสร้างเคาน์เตอร์เพื่อใช้นับระยะเวลาส่งสัญญาณจนกระทั่งได้รับสัญญาณโดยมีการทำงาน ดังนี้



รูปที่ 3.7 แสดง Block Diagram การทำงานของ Counter

จากรูปที่ 3.7 ในส่วน Control มีอินพุต คือ ตัวรับ 3 ตัวนั่นเอง โดยเมื่อสัญญาณอัลตราโซนิคเข้ามาที่ Rx1 ซึ่งเป็นตัวรับตัวแรกที่ได้รับสัญญาณ วงจรก็จะส่งสัญญาณ Start ไปที่เคาน์เตอร์ทั้ง 3 ให้เริ่มนับพร้อมกันพร้อมกับส่งสัญญาณ Stop1 ไปที่ Counter1 เราจะเห็นว่า Counter1 เริ่มนับ และหยุดนับพร้อมกันนั้น หมายถึง Counter1 จะนับได้เป็นศูนย์เปรียบเสมือน

เป็นจุดอ้างอิงให้กับเคาน์เตอร์อีก 2 ตัว และเมื่อตัวรับ Rx2 ได้รับสัญญาณอัลตราโซนิคอีก Control ก็จะส่งสัญญาณ Stop2 ไปเพื่อให้ Counter2 หยุดนับค่าที่นับได้นี้เทียบกับ Counter1 และ เมื่อ

ตัวรับ Rx3 ได้รับสัญญาณเอ็คตราโซนิกอีก Control ก็จะส่งสัญญาณ Stop3 ไปเพื่อให้ Counter3 หยุดนับอีกเช่นกันค่าที่ได้นี้เทียบกับ Counter1 เหมือนกัน ฉะนั้นจะได้ค่าเวลาที่ต่างกันกับตัวรับตัวแรก จากนั้นค่าเวลานี้จะถูกส่งไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณหาพิกัดตำแหน่งต่อไป

การคำนวณในส่วน FPGA นี้มีดังนี้

1. การหาค่าเวลาสูงสุดที่ Counter จะต้องนับ

$$t_{\max} = \frac{D_{\max}}{V_s} \quad (3.10)$$

โดยที่ t_{\max} คือ ค่าเวลาสูงสุดที่ Counter จะต้องนับ (Sec)

D_{\max} คือ ระยะห่างที่มากที่สุดของตัวรับ Ultrasonic ตัวแรกกับตัวสุดท้าย (เมตร)

V_s คือ ความเร็วเสียงซึ่งมีค่า 331 m/s

2. การหาค่าจำนวนครั้งที่ Counter จะต้องนับ

$$t_{\max} \times f_{\text{counter}} \leq 2^b - 1 \quad (3.11)$$

โดย f_{counter} คือ ความถี่ clk ที่ป้อนให้แก่ counter (Hz)

b คือ จำนวน Bit ของ Counter

$2^b - 1$ คือ จำนวนนับสูงสุดที่ Counter นับได้

3. การหาค่าความละเอียดในการวัดระยะทาง (Resolution)

$$\text{Resolution} = \frac{V_s}{f_{\text{counter}}} \quad (3.12)$$

ตัวอย่าง ความสัมพันธ์ของ f_{counter} , จำนวน Bit, t_{\max}

กำหนดให้ $D_{\max} = 9 \text{ cm}$, $V_s = 331 \text{ m/s}$, $b_{\text{counter}} = 8 \text{ bit}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_{\text{counter}} \leq 255 / 271.9 \mu\text{s}$$

$$\leq 937.8 \text{ kHz}$$

$$\text{Resolution ของวงจร} = 331 / 937.8 \text{ kHz} = 0.352 \text{ mm}$$

3.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์จะคอยรับค่าจาก FPGA มาทำการคำนวณว่า ณ ตำแหน่งที่รถอยู่นั้นอยู่ที่ทิศทางใดจากตัวส่ง เมื่อได้พิกัดของตำแหน่งกับทิศทางแล้วก็จะไปส่งส่วนขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนรวมทั้งสั่งให้ปรับความเร็วของตัวรถให้เหมาะสมกับระยะทาง

พอร์ท 1 จะทำการรับค่าจาก FPGA จำนวน 8 บิตถึงแม้ว่าจำนวนข้อมูลที่มาจาก FPGA จะมีทั้งหมด 3 ชุดด้วยกัน(ชุดละ 8 บิต) แต่หากใช้หลักการเลือกข้อมูล(Multiplex) ก็จะลดพอร์ทที่จะใช้ลงได้อย่างมาก

การทำงานเริ่มแรกส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่งสัญญาณ RESET เพื่อทำการล้างค่าเก่าที่ค้างอยู่ใน FPGA ออกให้หมดจากนั้นก็ทำการรอสัญญาณจาก FPGA ที่ขาสัญญาณ FINISH ว่าได้ทำการนับค่าจากส่วนรับสัญญาณ ULTRASONIC เรียบร้อยแล้ว จากนั้นก็จะทำการตรวจสอบสัญญาณ OVERFLOW1, OVERFLOW2 และ OVERFLOW3 ถ้าหากมีก็จะสั่งให้วงจรส่วนขับเคลื่อนทำการเคลื่อนที่เพื่อค้นหาเป้าหมาย หากไม่มีสัญญาณ OVERFLOW ใด ๆ เลยก็จะทำการรอสัญญาณ FINISH ที่ขา P3.7

เมื่อมีสัญญาณ FINISH ส่งมาจาก FPGA แล้วไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะทำการส่งสัญญาณไปทำการเลือกชุดข้อมูลที่ FPGA โดยข้อมูลชุดแรก ชุดที่สองและชุดที่สามจะเป็นข้อมูลของ COUNTER1, COUNTER2 และ COUNTER3 ใน FPGA ที่นับได้ตามลำดับ ข้อมูลแต่ละชุดจะเลือกได้โดยทำการป้อนอินพุตตามตารางดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความจริงของการรับข้อมูลจาก FPGA

P2.1 (A1)	P2.2 (A0)	ชุดของข้อมูล
0	0	COUNTER1
0	1	COUNTER2
1	0	COUNTER3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอร์ท 0 จะใช้ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยมอเตอร์แต่ละข้างจะถูกควบคุมความเร็ว 4 บิต ซึ่งพอร์ท 0 จะถูกแบ่งออกเป็น พอร์ทศูนย์ 4 บิตบน P0.4 ถึง P0.7 จะทำหน้าที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้านซ้าย และ พอร์ทศูนย์ 4 บิตล่าง P0.0 ถึง P0.3 จะทำหน้าที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้านขวา ซึ่งความเร็วแต่ละระดับของมอเตอร์จะมีค่าเท่ากับ

$$\text{SPEED} = \text{MaxSPEED} \times \frac{N}{16}$$

ซึ่ง N จะมีค่าเท่ากับฐานสองของสี่บิตที่จะส่งไปยังส่วนควบคุมมอเตอร์ ส่วน P2.4 ถึง P2.7 จะทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ทั้งสอง

3.8 ส่วนขับเคลื่อนมอเตอร์

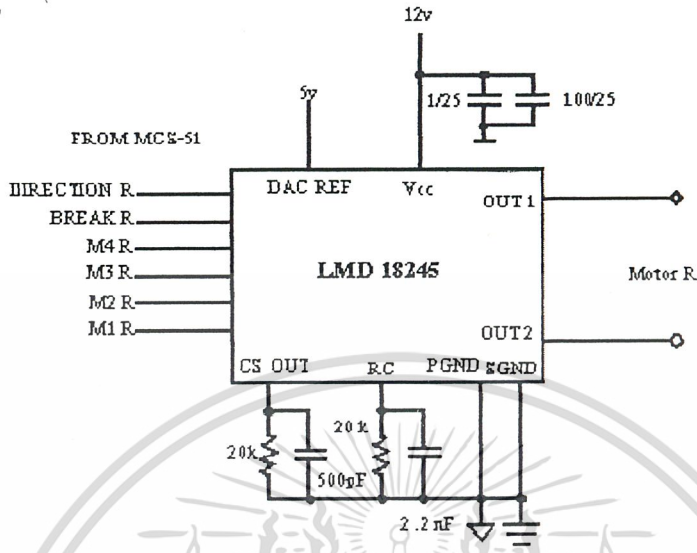
เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งค่าทางลอจิกออกมา ก็จะส่งไปยังส่วนควบคุมมอเตอร์ ส่วนมอเตอร์ที่ใช้จะใช้เป็นแบบ DC MOTOR เนื่องจากกินกระแสต่ำกว่าแบบ STEP MOTOR ที่ให้แรงบิด(TORQUE)ที่เท่ากัน ดังนั้นจึงได้เลือกใช้วงจรรวมเบอร์ LMD18245T ฝั่งการใช้งานดังรูปที่ 3.7 ความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์สามารถควบคุมด้วยลอจิกได้

ค่าลอจิกที่ส่งมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ จะเข้ามาทางขา M4-M0 โดย M4 จะเป็นค่าบิตสูงสุด และ M0 เป็นค่าลอจิกบิตต่ำสุดตามลำดับ

ทิศทางในการหมุนของมอเตอร์จะถูกควบคุมด้วยขา Direction และขา Break จะเป็นการควบคุมให้มอเตอร์หมุนหรือไม่ หากรับค่าลอจิกที่เป็น “1” จะทำให้มอเตอร์หยุดหมุน และถ้าป้อนค่าลอจิกเป็น “0” ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนแต่ทิศทางในการหมุนจะขึ้นอยู่กับ ขา Direction การทำงานที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าตารางความจริงของการทำงานส่วนควบคุมทิศทาง

BREAK	DERECTION	MONOSTABLE(OUTPUT)	Active Switched
H	X	X	Source1,Source2
L	H	L	Source2
L	H	H	Source2,Sink1
L	L	L	Source1
L	L	H	Source1,Sink2



รูปที่ 3.8 แสดงการต่อกับอุปกรณ์ภายนอกของ LM 18245T

3.9 การแก้ระบบสมการหาค่า R, X, Y
แก้สมการ

$$(X + d)^2 + Y^2 = (R + R_1)^2$$

$$X^2 + 2Xd + d^2 + Y^2 = R^2 + 2RR_1 + R_1^2 \tag{3.13}$$

$$X^2 + Y^2 = (R + R_2)^2$$

$$X^2 + Y^2 = R^2 + 2RR_2 + R_2^2 \tag{3.14}$$

$$(X - d)^2 + Y^2 = (R + R_3)^2$$

$$X^2 - 2Xd + d^2 + Y^2 = R^2 + 2RR_3 + R_3^2 \tag{3.15}$$

(3.14) แทน (3.13) และ (3.15) จะ ได้

$$R^2 + 2RR_2 + R_2^2 + 2Xd + d^2 = R^2 + 2RR_1 + R_1^2$$

$$2RR_2 + R_2^2 + 2Xd + d^2 = 2RR_1 + R_1^2 \tag{3.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} R^2 + 2RR_2 + R_2^2 - 2Xd + d^2 &= R^2 + 2RR_3 + R_3^2 \\ 2RR_2 + R_2^2 - 2Xd + d^2 &= 2RR_3 + R_3^2 \end{aligned} \quad (3.17)$$

นำสมการที่ (3.16)+(3.17)

$$\begin{aligned} 4RR_2 + 2R_2^2 + 2d^2 &= 2RR_1 + R_1^2 + 2RR_3 + R_3^2 \\ 4RR_2 + 2R_2^2 + 2d^2 &= 2R(R_1 + R_3) + R_1^2 + R_3^2 \\ 2R(2R_2 - R_1 - R_3) &= R_1^2 + R_3^2 - 2R_2^2 - 2d^2 \end{aligned}$$

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{2R_2^2 - R_1^2 - R_3^2 + 2d^2}{R_1 - 2R_2 + R_3} \right] \quad (3.18)$$

แทนลงในสมการ(3.16)

$$X = \frac{2R(R_1 - R_2) + R_1^2 - R_2^2 - d^2}{2d} \quad (3.19)$$

นำ X และ R แทนลงในสมการที่ (3.14)

$$Y = \sqrt{(R + R_2^2) - X^2} \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

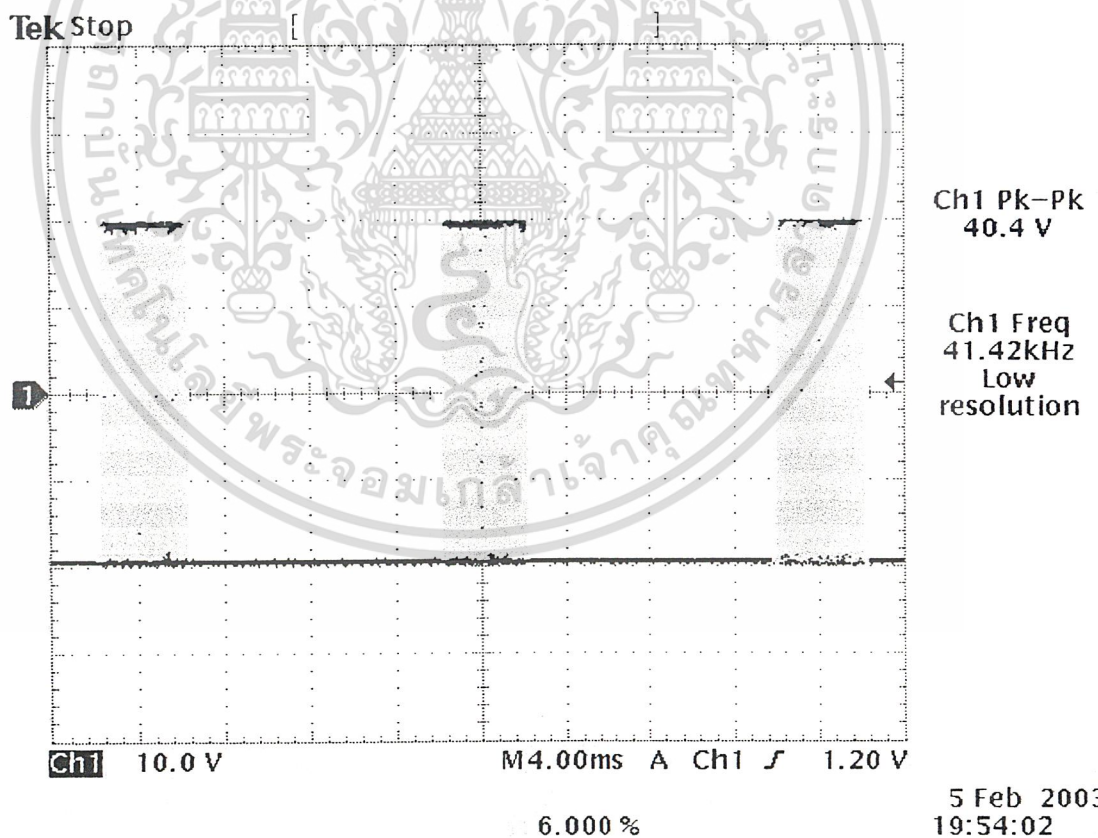
การทดลอง และ ผลการทดลอง

ในบทที่ 4 เป็นการทดลอง และแสดงผลการทดลองในรูปแบบต่างๆ ที่สามารถวัดผลได้จากวงจรจริงๆ และ จาก โปรแกรม MAX+plus II ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวัดสัญญาณที่เอาต์พุตส่วนต่าง ๆ

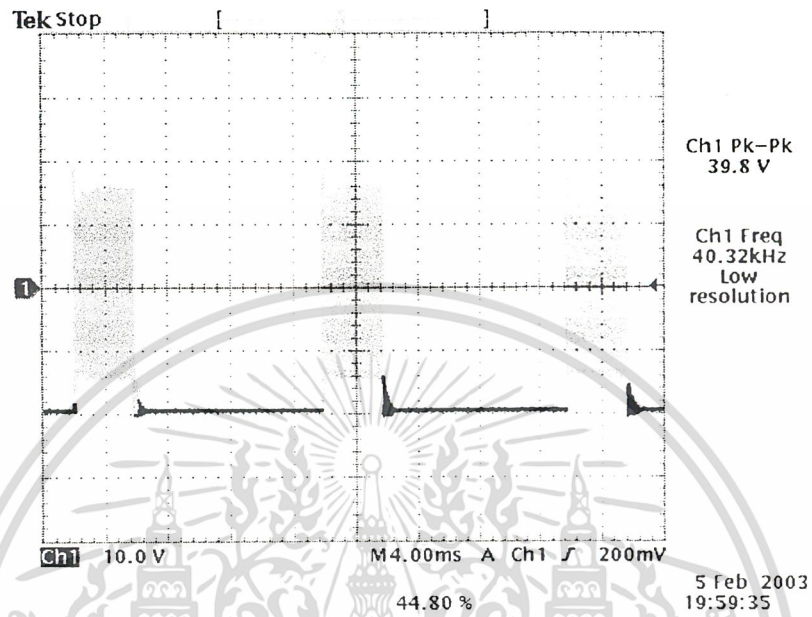
4.1.1 สัญญาณเอาต์พุตที่วงจรตัวส่งอัลตราโซนิก

- ขณะยังไม่ใส่ตัวส่งอัลตราโซนิก



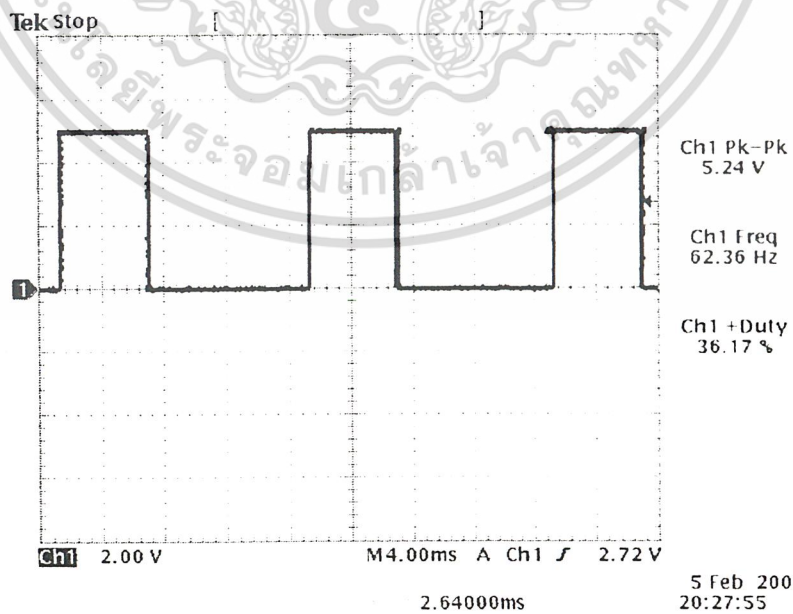
รูปที่ 4.1 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตัวส่งอัลตราโซนิก (ขณะยังไม่ใส่ตัวส่ง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
อัลตราโซนิก)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขณะใส่ตัวส่งอัลตราโซนิก



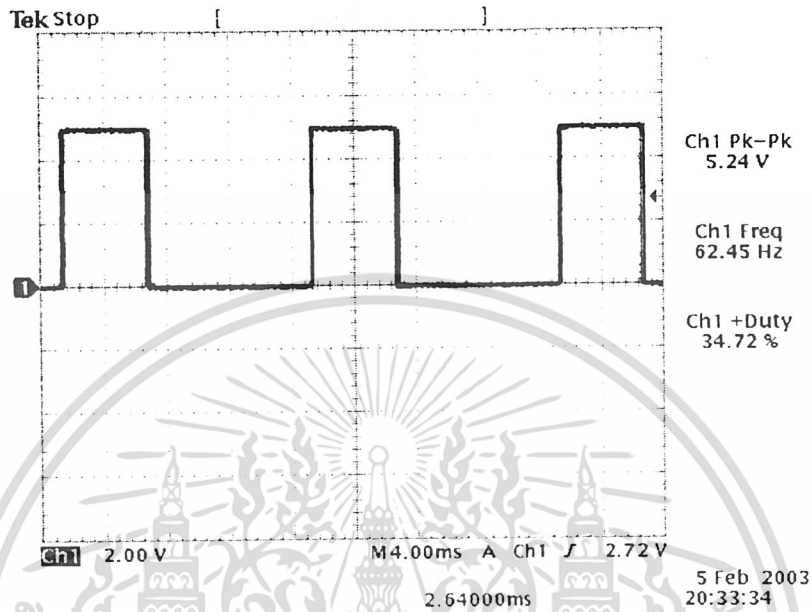
รูปที่ 4.2 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุทของวงจรตัวส่งอัลตราโซนิก (ขณะใส่ตัวส่งอัลตราโซนิก)

4.1.2 สัญญาณเอาต์พุทที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 1.0 เมตร



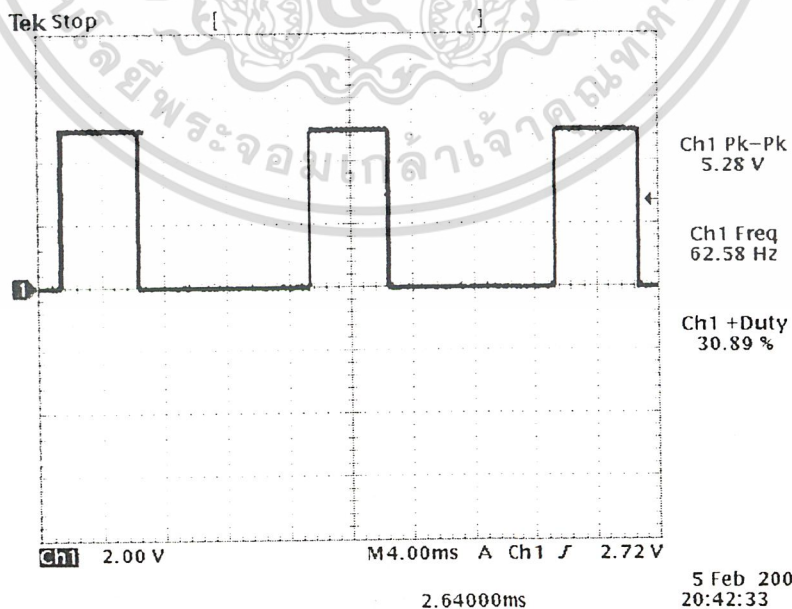
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดรูปที่ 4.3 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุทของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 1.0 เมตร ที่มีการนำไปใช้

4.1.3 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 2.0 เมตร



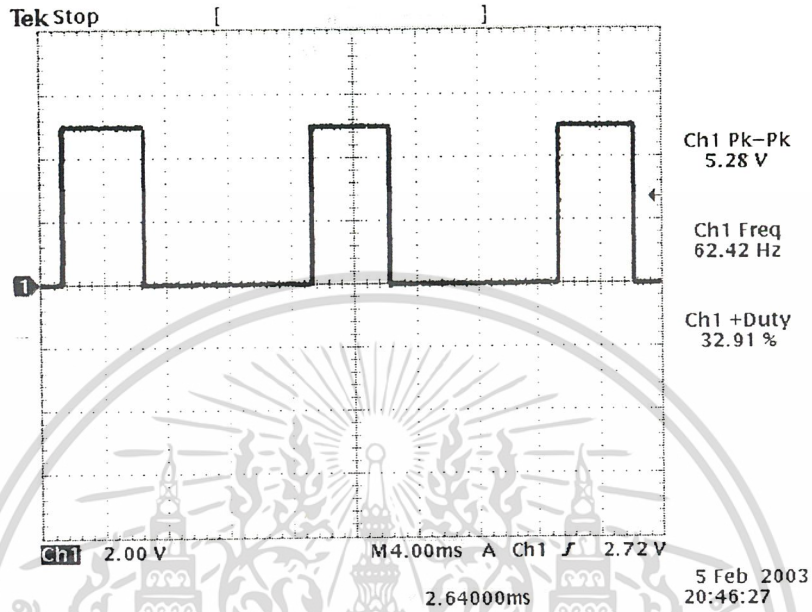
รูปที่ 4.4 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 2.0 เมตร

4.1.4 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 3.0 เมตร



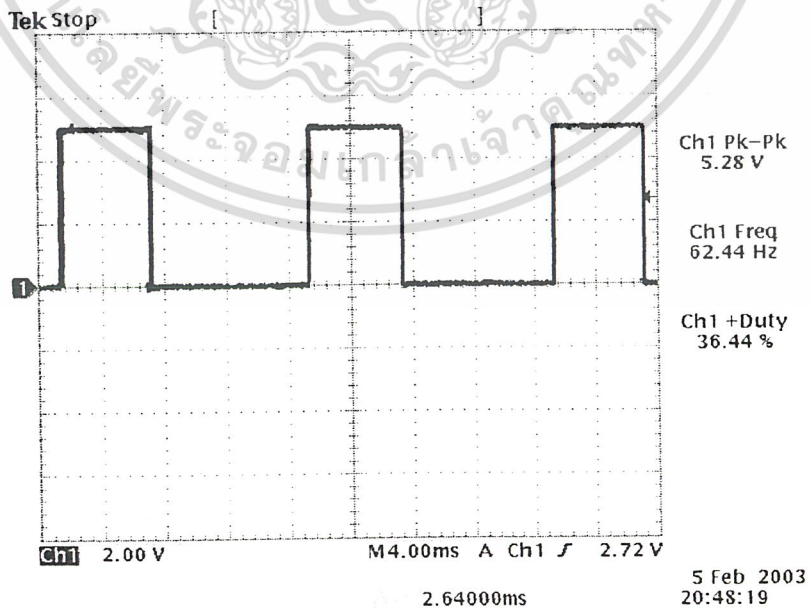
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดรูปที่ 4.5 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 3.0 เมตร รังที่มีการนำไปใช้

4.1.5 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 4.0 เมตร



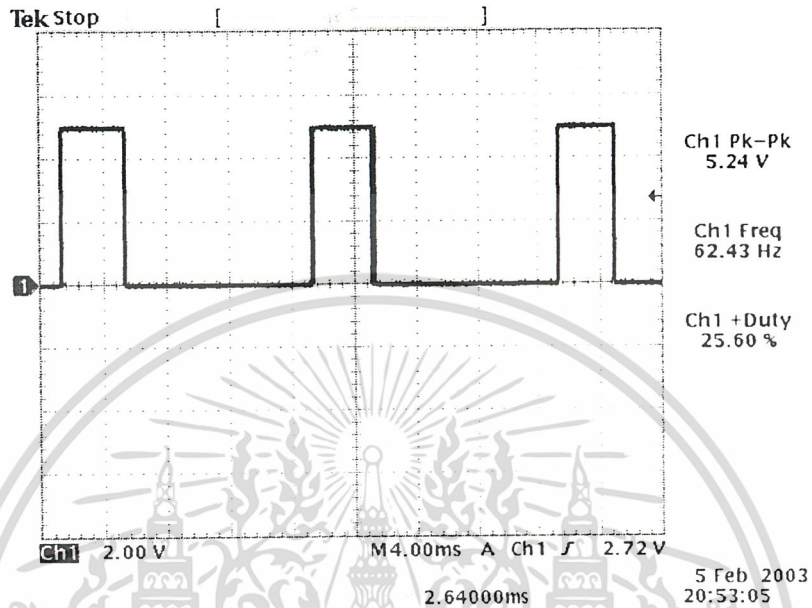
รูปที่ 4.6 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 4.0 เมตร

4.1.6 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 5.0 เมตร



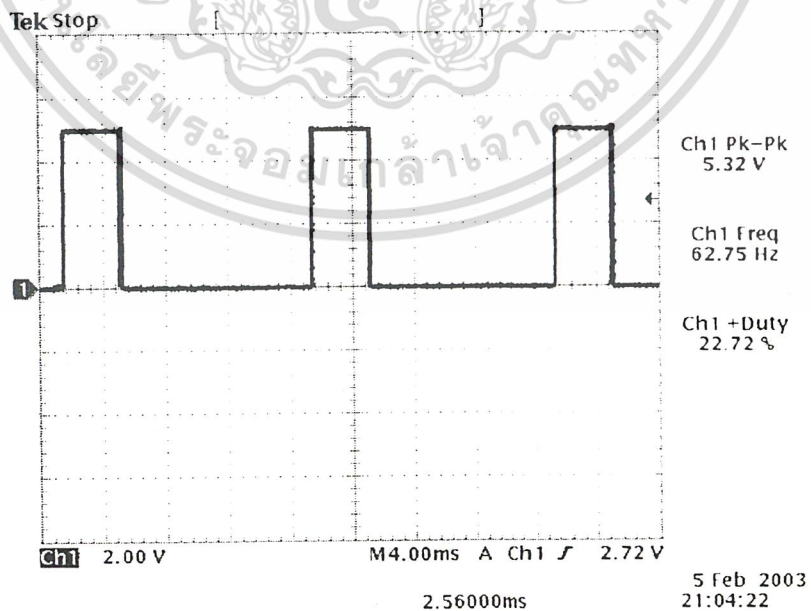
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดรูปที่ 4.7 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 5.0 เมตรซึ่งมีการนำไปใช้

4.1.7 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 6.0 เมตร



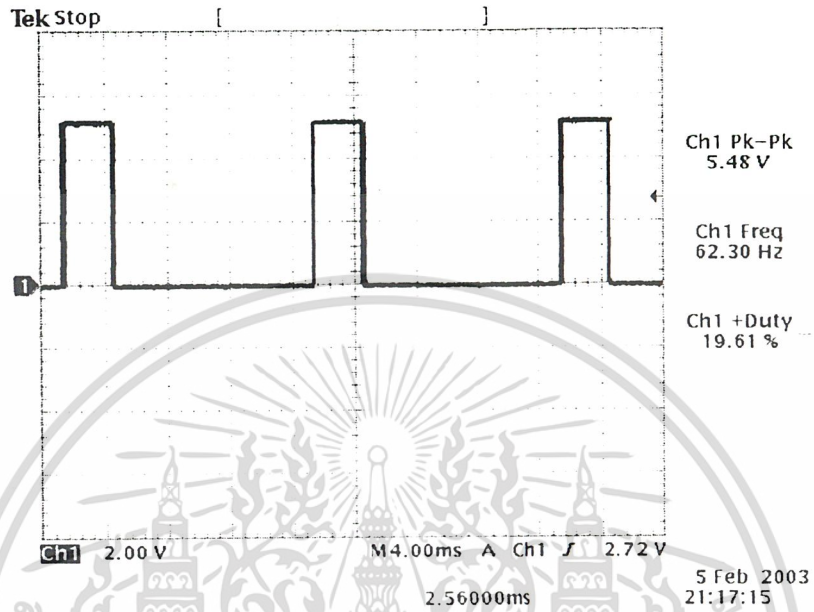
รูปที่ 4.8 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 6.0 เมตร

4.1.8 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 7.0 เมตร



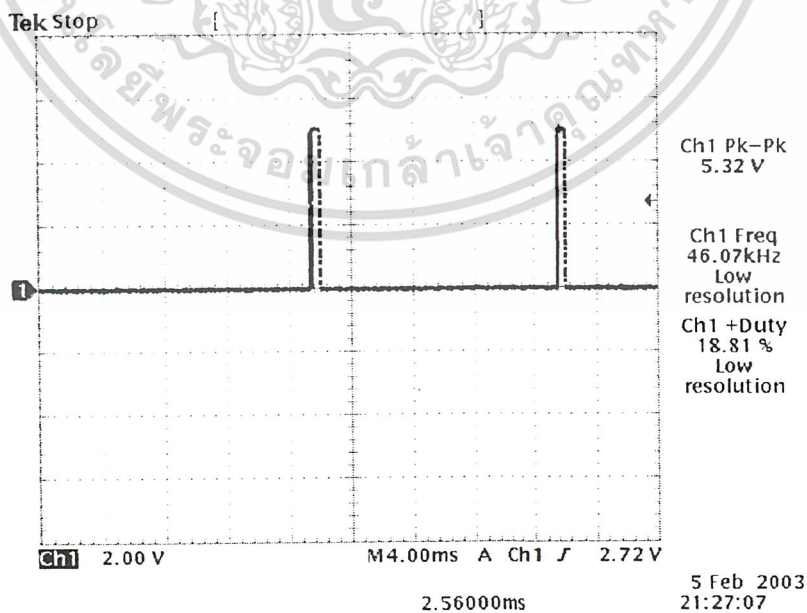
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดรูปที่ 4.9 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 7.0 เมตร ซึ่งมีการนำไปใช้

4.1.9 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 8.0 เมตร



รูปที่ 4.10 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 8.0 เมตร

4.1.10 สัญญาณเอาต์พุตที่ตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 9.0 เมตร

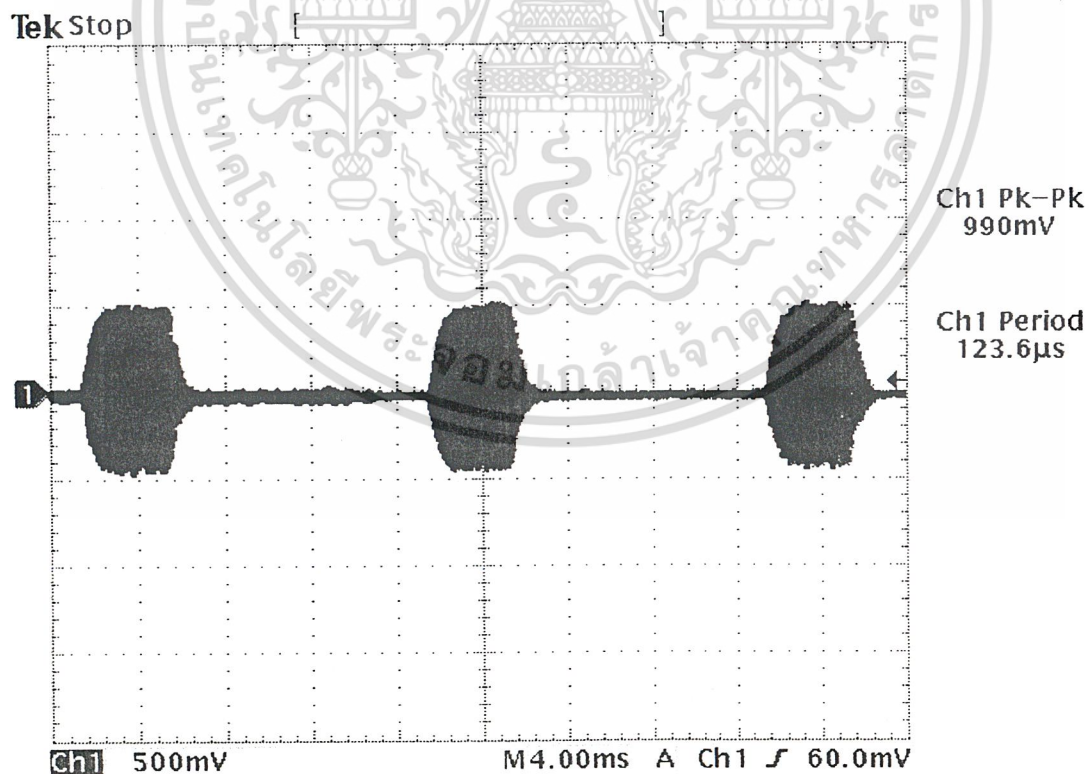


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด รูปที่ 4.11 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของตัวรับอัลตราโซนิกที่ระยะ 9.0 เมตร ซึ่งมีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.11 เป็นการแสดงผลการวัดสัญญาณเอาต์พุทของตัวส่ง และ ตัวรับ ซึ่งเอาต์พุทที่ตัวรับได้แสดงผลการวัดที่ระยะทางห่างจากตัวส่งเป็นค่าต่างๆ กันตั้งแต่ 1 เมตร จนถึง 9 เมตร และจากรูปเราจะเห็นได้ว่าที่ตัวรับจะรับสัญญาณได้ดีในช่วงระยะทาง 1 เมตร ถึง 7 เมตร และช่วงระยะทาง 8 เมตร การรับสัญญาณจะไม่ได้ไม่ดีเท่าที่ควรที่ 8 เมตรนี้ตัวส่ง และ ตัวรับควรจะอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันจึงจะทำให้สามารถรับสัญญาณได้ และ เมื่อไปที่ระยะ 9 เมตรจากรูปที่ 4.11 เราจะพบว่า การรับสัญญาณจะรับไม่ได้เลยสัญญาณที่อาจจะมาไม่ติดต่อกันตลอด ซึ่งเป็น เพราะ สัญญาณเดินทางผ่านอากาศจะถูกกลทอนไปตามระยะทางจนสัญญาณมาไม่ถึงตัวรับนั่นเอง

4.2 การตรวจสอบอัตราขยายของออปแอมป์

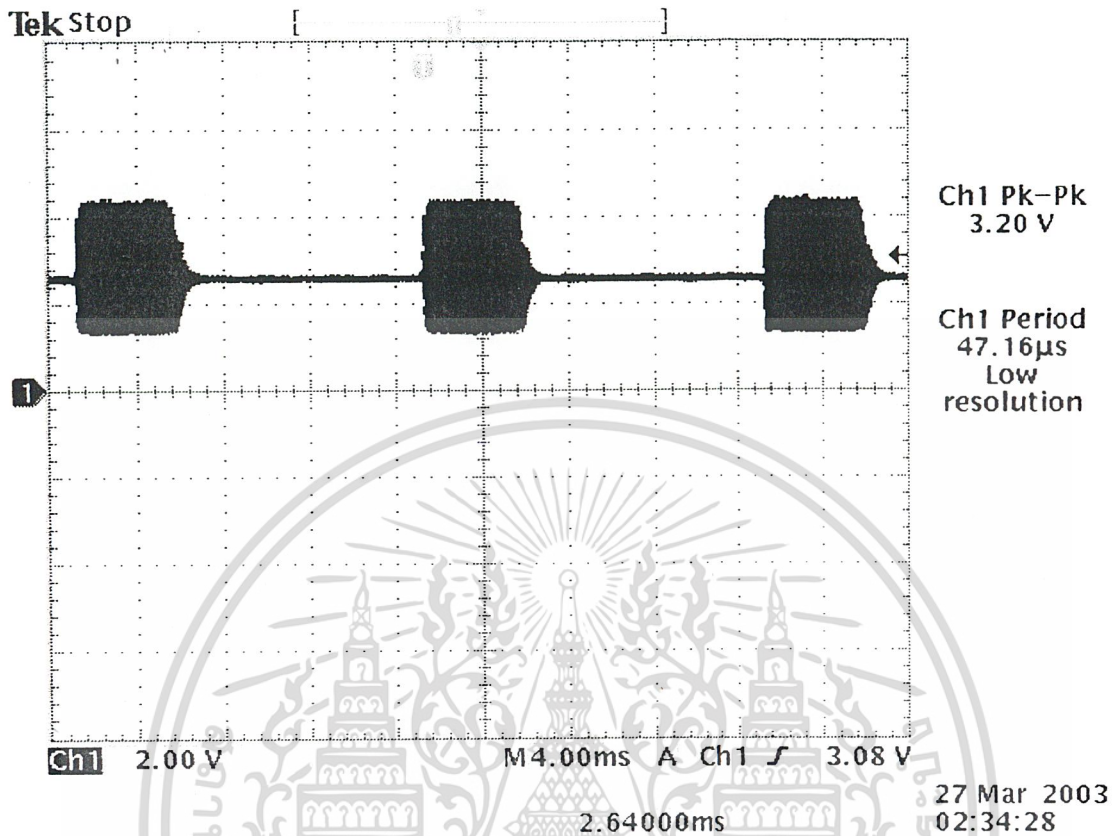
ผลจากการวัดสัญญาณที่ขาของตัวรับสัญญาณอัลตราโซนิคส์จะได้ดังรูปที่ 4.12 และผลจากการวัดสัญญาณที่ออปแอมป์ขาที่ 1 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าสัญญาณที่ขยายออกมามีอัตราขยายไม่ได้เท่ากับอัตราขยายที่คำนวณไว้คือ 100 เท่า แต่สามารถแก้ไขได้โดยการต่อขาสัญญาณเดิมที่ลงกราวด์อยู่เปลี่ยนเป็นการต่อที่ขาของออปแอมป์ขาที่ 3 แทนก็จะสามารถทำให้อัตราขยายสูงขึ้นได้



27 Mar 2003
02:23:34

2.40000ms

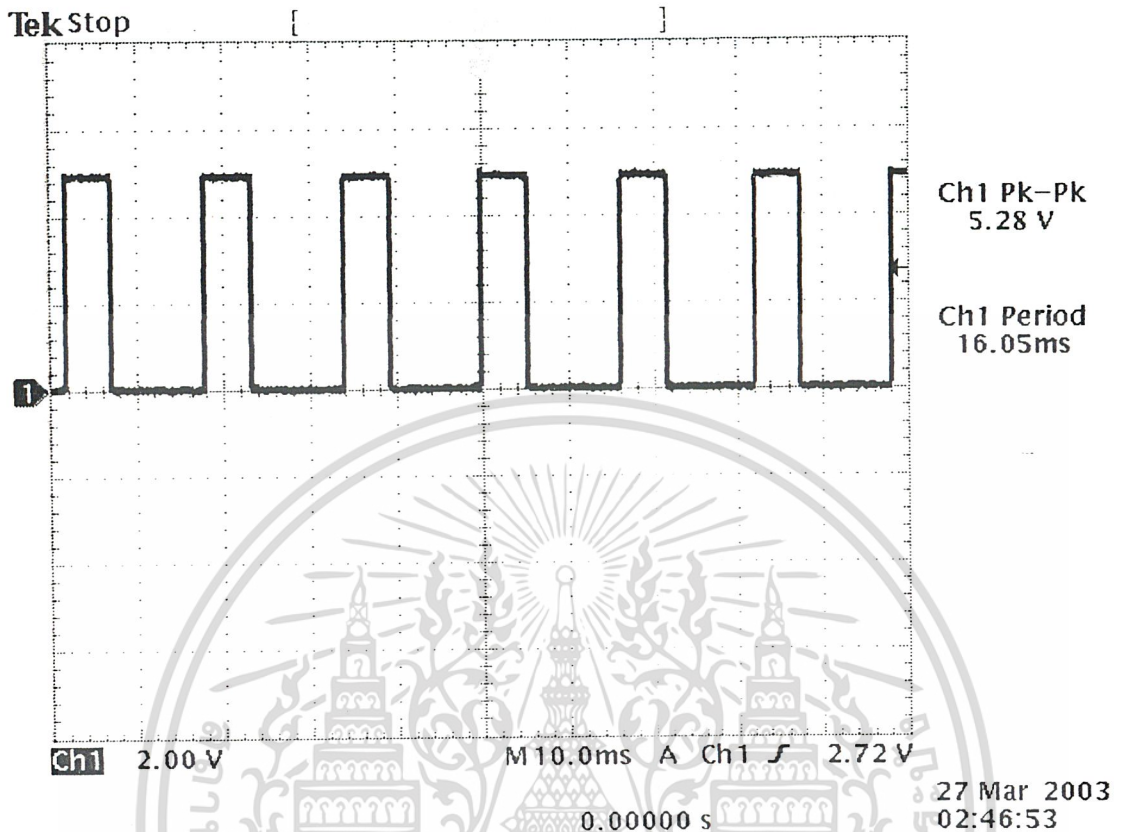
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและตั้งชื่อวงจรมีลิขสิทธิ์และเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 4.12 แสดงภาพสัญญาณที่ขาของอัลตราโซนิคส์



รูปที่ 4.13 แสดงรูปสัญญาณที่ขา 1 ของออปแอมป์ LF353

ส่วนในการเปรียบเทียบสัญญาณชุดสุดท้ายก่อนที่จะส่งสัญญาณ ไปให้กับ FPGA สามารถ
 แสดงได้ในรูปที่ 4.13 แต่หากปรับระยะภาพลงไปอีก ๆ แล้วก็จะเห็นได้ว่าสัญญาณมีการแกว่งไปมา
 ในระดับ 50 ไมโครวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงภาพสัญญาณที่วัดได้ในส่วนเปรียบเทียบสัญญาณภาคสุดท้าย

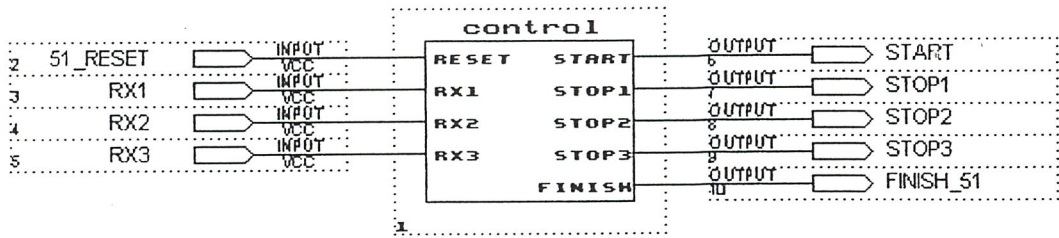
4.3 แสดงผลการ Simulate ของ FPGA

ในหัวข้อนี้ได้แสดงผลการ Simulate วงจรที่ได้ออกแบบไว้ในแต่ละส่วนการทำงาน ซึ่งส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนของ Block Control และ Block Counter

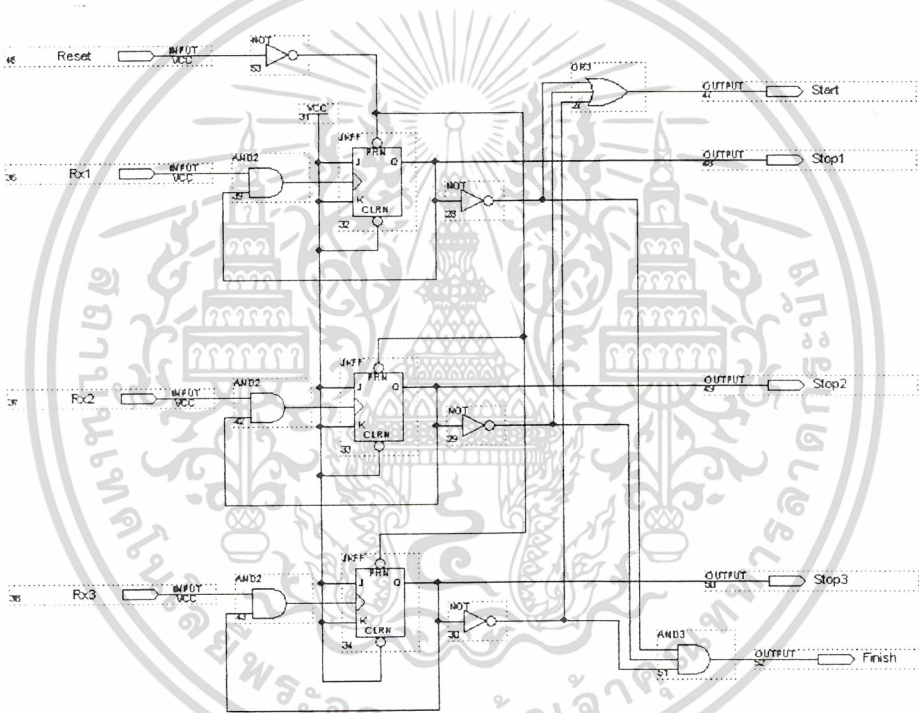
4.3.1 ผลการ Simulate ส่วนของ Block Control

ในส่วนของ Block Control นี้เป็นส่วนที่รับสัญญาณจากอัตราไชนิกตัวรับ และ ไปควบคุมการทำงานในส่วน Block Counter ให้เริ่มนับ และ หยุดนับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

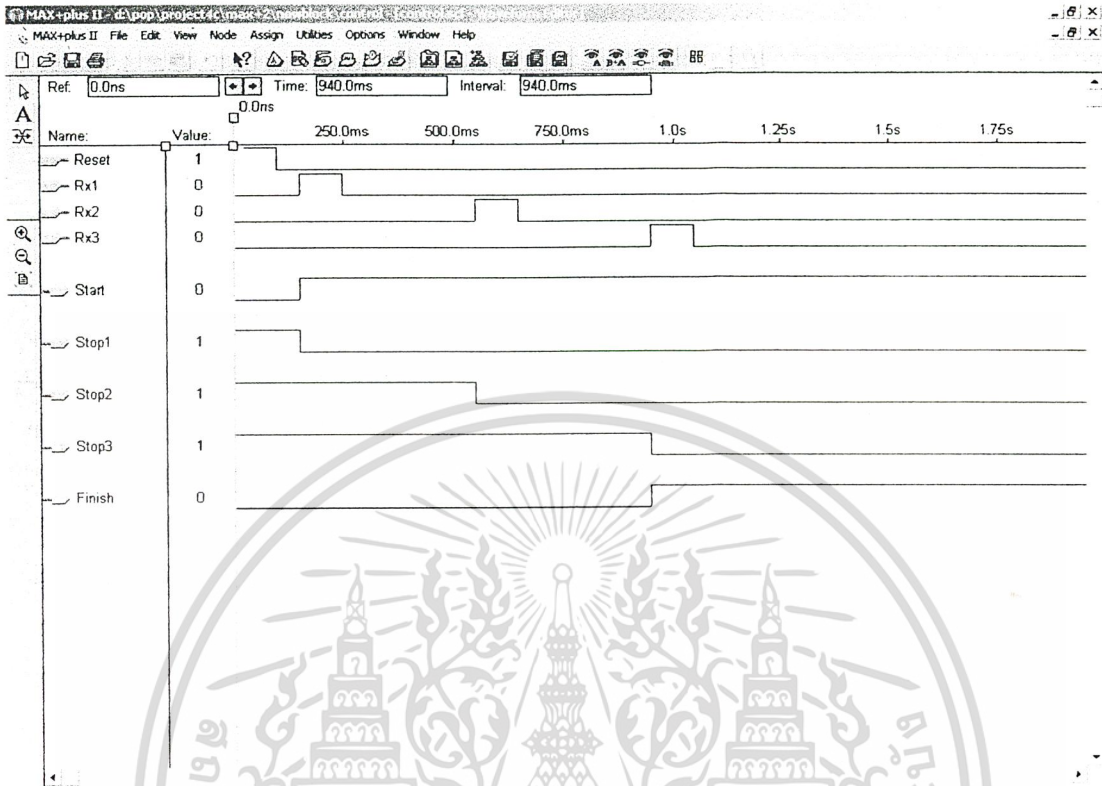


รูปที่ 4.15 แสดงภาพส่วน Block Control



รูปที่ 4.16 แสดงภาพวงจรการทำงานภายใน Block Control

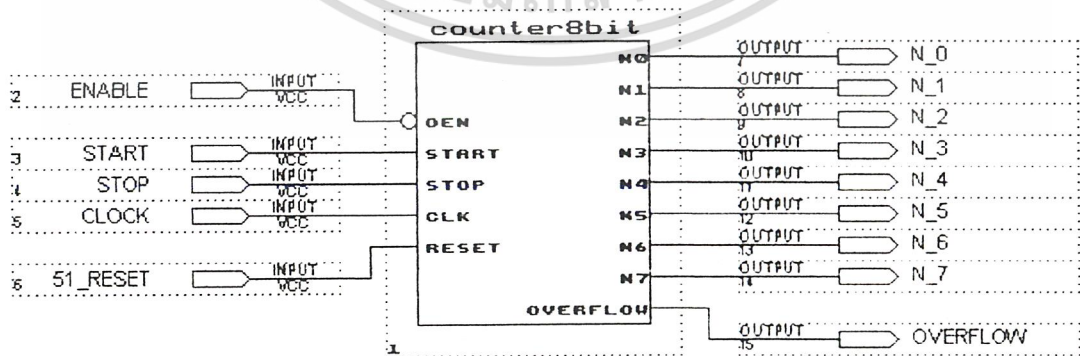
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



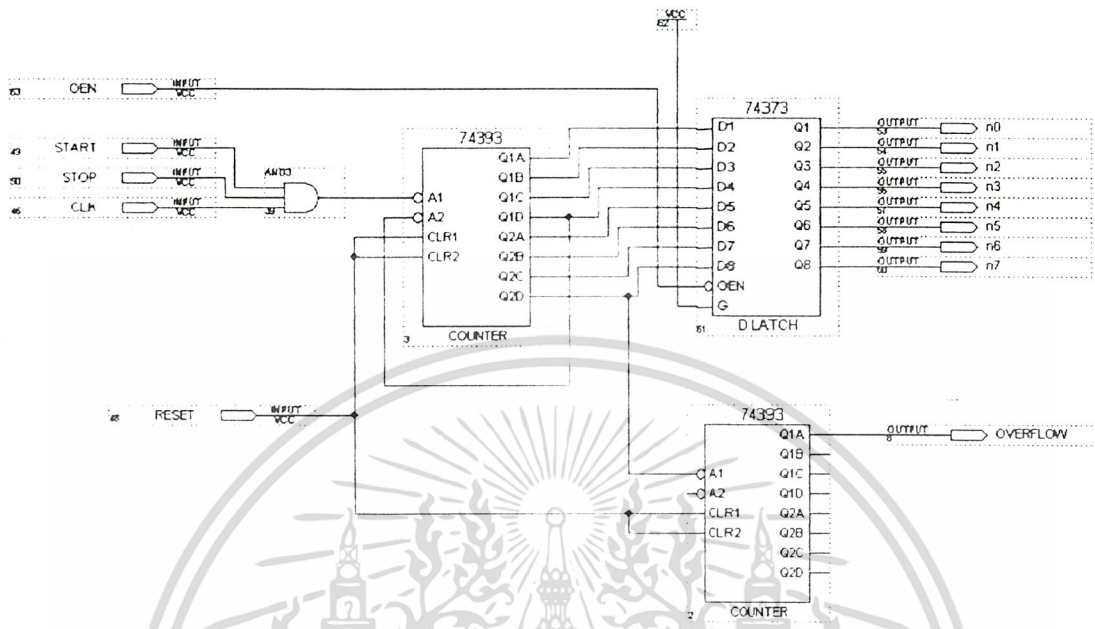
รูปที่ 4.17 แสดง Timing Diagram ของ Block Control ที่ได้จากการ Simulate

4.3.2 ผลการ Simulate ส่วนของ Block Counter

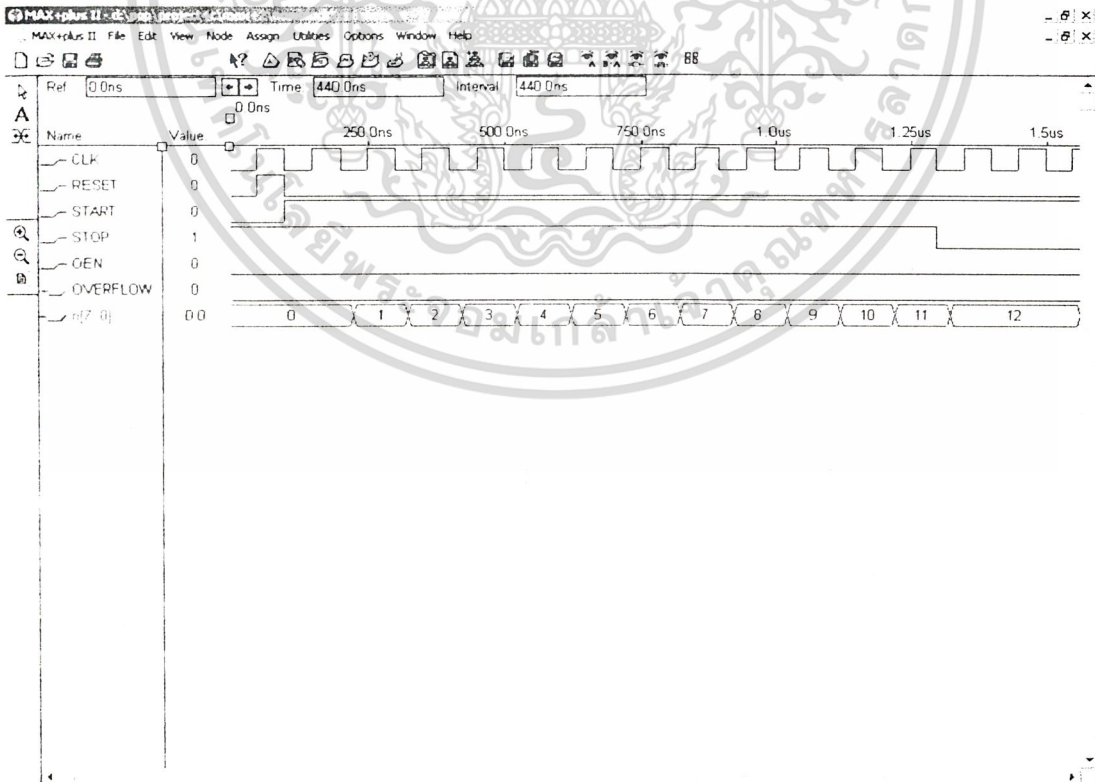
ในส่วนของ Block Counter นี้ได้ทำหน้าที่เป็นตัวจับเวลาของสัญญาณที่ส่งจากตัวส่ง จนกระทั่งตัวรับรับสัญญาณได้นั่นเองโดยค่าเอาท์พุทที่นับได้นั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถอ่านค่าไปได้เมื่อส่งสัญญาณลอคิกศูนย์ไปที่ขา ENABLE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.18 แสดงภาพส่วน Block Counter
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



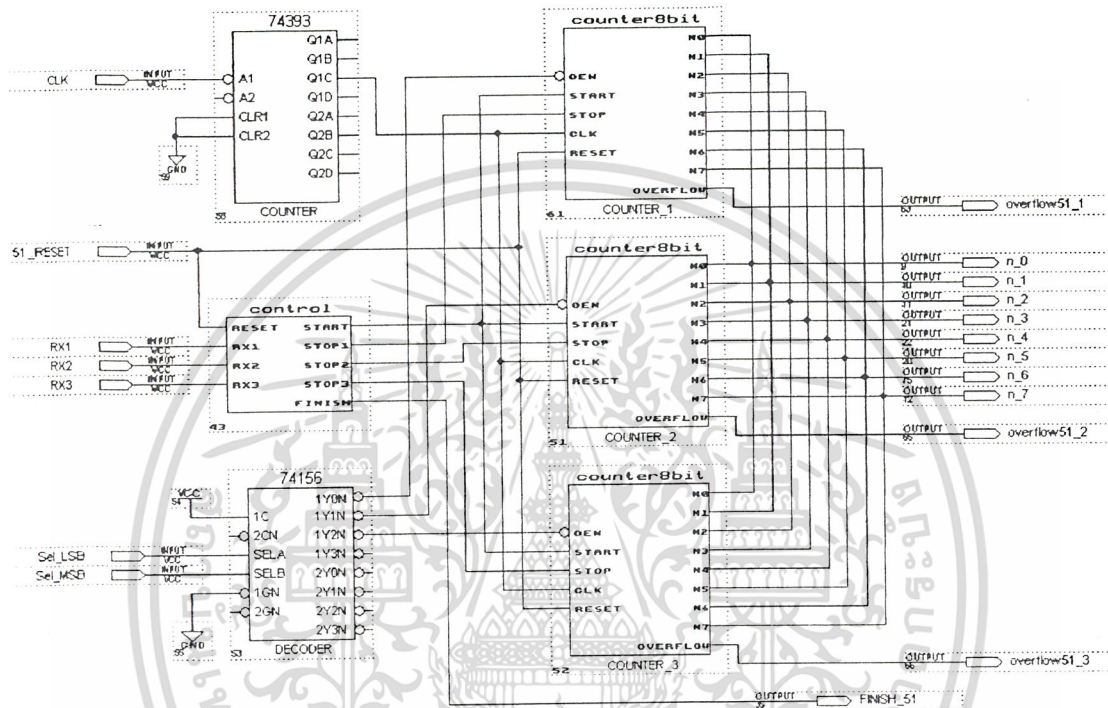
รูปที่ 4.19 แสดงภาพวงจรการทำงานภายใน Block Counter



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 4.20 แสดง Timing Diagram ของ Block Counter ที่ได้จากการ Simulate การนำไปใช้

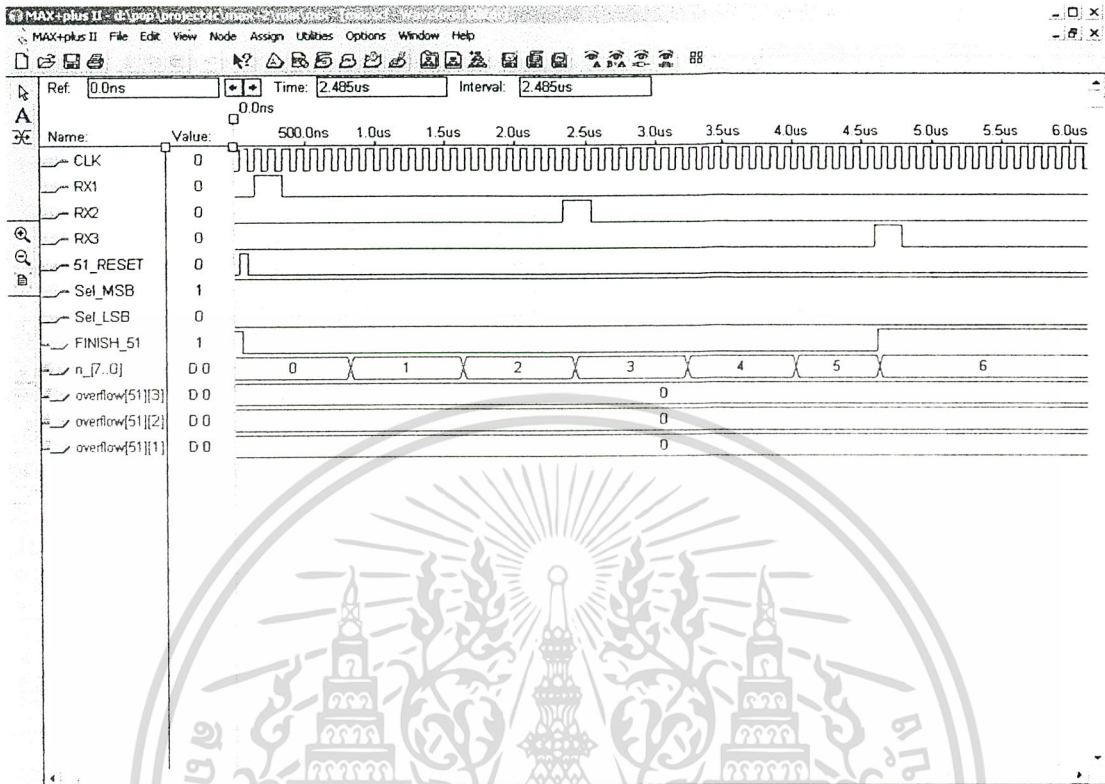
4.3.3 ผลการ Simulate วงจรทั้งหมดของ FPGA

ในหัวข้อนี้ได้แสดงภาพวงจรการทำงานทุกๆ ส่วนของ FPGA ที่ได้นำมาประกอบกันอย่างสมบูรณ์ และ ผลการ Simulate วงจรที่ได้ประกอบแล้วนี้ ดังนี้



รูปที่ 4.21 แสดงภาพวงจรการทำงานทั้งหมดของ FPGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดง Timing Diagram วงจรการทำงานทั้งหมดของ FPGA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุป และวิจารณ์

การออกแบบสร้างรณนำร่องด้วยระบบอัลตราโซนิกในโครงการนี้ ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนฮาร์ดแวร์ และ ส่วนซอฟต์แวร์ ในส่วนฮาร์ดแวร์สามารถทำได้หลายแบบ และอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้แทนตัวรับตัวส่งแบบอัลตราโซนิกก็มีหลายชนิด ซึ่งสาเหตุที่เลือกใช้อัลตราโซนิกก็เพราะสามารถหาซื้อได้ง่าย การคำนวณ และการนำมาใช้งานก็สามารถทำได้ง่ายกว่าการเลือกใช้อุปกรณ์อื่น เช่น อินฟราเรด ซึ่งเป็นเซนเซอร์ทางด้านแสง

ในโครงการนี้ได้ออกแบบวงจรตัวรับ และตัวส่งเพื่อให้ส่งได้ระยะไกลที่สุดเท่าที่จะทำได้ อีกทั้งได้มีการออกแบบตัวประมวลผลซึ่งคือไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อเชื่อมต่อกับ FPGA ซึ่งทำหน้าที่เป็นเคาน์เตอร์ และในการออกแบบสร้างแต่ละส่วนนั้นมีทั้งที่สามารใช้งานได้ดี และมีทั้งปัญหาที่เกิดขึ้นต่างๆ มากมาย แต่ทางผู้จัดทำก็ได้ทำการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น และพัฒนาให้วงจรแต่ละส่วนสามารถทำงานได้ดี โดยวงจรในแต่ละส่วนสามารถแยกสรุป ดังนี้

5.1 ภาคส่งสัญญาณ

ภาคส่งในโครงการนี้ได้ใช้สัญญาณความถี่ 60 Hz ผสม กับสัญญาณ 40 kHz เพื่อส่งออกไปเป็นพัลส์ 60 ครั้งต่อวินาที วงจรภาคส่งนี้ไม่ได้มีความซับซ้อนมาก สามารถสร้างได้ไม่ยากแต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ไม่สามารถส่งได้เป็นระยะทางไกลๆ จึงต้องทำการแก้ไขโดยเพิ่มกำลังส่งให้สูงขึ้นเท่าที่ตัวส่งสามารถทำได้สูงสุด เป็นการทำให้ตัวส่งสามารถส่งคลื่นได้ไกลขึ้น ดังรูปในภาคผนวก และเมื่อทำการแก้ไขแล้ว จากเดิมที่ส่งได้เพียง 5 เมตร สามารถส่งได้เพิ่มขึ้นเป็น 8 เมตร แต่ทั้งนี้ก็ต้องขึ้นอยู่กับตัวรับด้วยเช่นกัน

5.2 ภาครับสัญญาณ

ภาครับนั้นเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญมากโดยการจะรับสัญญาณได้จากระยะทางไกลนั้นตัวรับเองต้องมีการปรับความถี่ให้เรโซแนนซ์กับความถี่ของตัวส่งที่ 40 kHz และปัญหาของวงจรถาครับนั้นคือ มีอัตราการขยายที่ไม่สูงพอทำให้มีความไวในการรับสัญญาณน้อย สิ่งสำคัญอีกอย่างนั้นคือ สัญญาณความถี่ต่ำที่จะมารบกวนทำให้สัญญาณที่รับได้มีความผิดเพี้ยนในการแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ โดยออกแบบวงจรให้มีการ Wire สายให้น้อยที่สุด หรือ ทำลงแผ่นปริ้นซ์ และแยกกราวด์ระหว่างเอกสากกราวด์ค่อนาลอกก็กับกราวด์ดิจิตอลซึ่งนอกจากนี้ควรใส่ตัวเก็บประจุค่าน้อยๆ ปร้อมระหว่างไฟเลี้ยงการค้ำไม่วกับกราวด์ และควรให้ตัวเก็บประจุน้อยๆ ใกล้เคียงรวมให้มากที่สุดเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะในส่วนภาครับก็คือการช่วงจรรวมคือหากเป็นไปได้ก็ควรเลือกวงจรรวมที่อัตราสลิว(Slew-rate)ให้สูงมาก ๆ และจะให้วงจรรวมสามารถรับได้ไกลขึ้นก็ควรมีการพัฒนาชุดวงจรรับใหม่ให้ดีขึ้น

5.3 ส่วนประมวลผล และ FPGA

ส่วนนี้จะประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งก็คือ AT89C51 และ FPGA ในส่วนของ FPGA นั้นการเขียนโปรแกรมเป็นแบบ Graphic Editor File ซึ่งก็คือ เป็นการนำเกท หรือ ไอซีต่างๆ ทางด้านดิจิทัลมาสร้างเป็นวงจรเคาน์เตอร์ และเหตุผลที่ต้องใช้ FPGA เพราะ FPGA มีการทำงานเร็วมากอยู่ในระดับนาโนวินาทีซึ่งถ้าใช้ MCS-51 ในการเฟดซ์ 1 คำสั่งใช้เวลาในระดับไมโครวินาทีจึงไม่เหมาะที่จะนำมาเป็นเคาน์เตอร์ ในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 นั้นได้ใช้ภาษาซีสำหรับ MCS-51 ซึ่งง่ายต่อการคำนวณตัวเลขที่เป็นจุดทศนิยม ถ้าหากใช้ภาษาแอสเซมบลีนั้นการคำนวณค่านั้นจะเกิดความยุ่งยากมากจึงได้เลือกใช้ภาษาซี และปัญหาที่พบคือ การเชื่อมต่อระหว่าง FPGA และ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ยากที่จะตรวจสอบว่ามีการรับส่งกันได้จริงๆ หรือ รับส่งกันได้ถูกต้อง

สรุปการทำงานทั้งหมดของ รถนำร่องด้วยระบบอัตโนมัติ

เริ่มจากเมื่อตัวส่งทำการส่งสัญญาณออกมา และตัวรับสามารถรับสัญญาณได้เคาน์เตอร์ก็จะเริ่มทำงานโดยเริ่มนับไปจนกระทั่งตัวรับสามารถรับสัญญาณได้หมดทั้ง 3 ตัว และเคาน์เตอร์แต่ละตัวจะหยุดนับเมื่อรับสัญญาณได้ ค่าที่เคาน์เตอร์นับได้นี้แต่ละตัวนั้น จะถูกอ่านค่าโดย MCS-51 และนำไปคำนวณหาพิกัดระยะทางว่าตำแหน่งรถนั้นอยู่ห่างจากตัวส่งเป็นระยะทางเท่าใด จากนั้นจึงไปควบคุมมอเตอร์ให้ขับเคลื่อนไปหาตัวส่ง และหยุด ณ ตำแหน่งที่กำหนดไว้ได้

สำหรับปัญหาโดยรวมหลังจากวงจรทั้งหมดได้มีการเชื่อมต่อกัน คือ การรับสัญญาณยังมีความไม่แน่นอนอยู่เราไม่สามารถจะทราบได้ว่าตัวรับตัวใดจะได้รับสัญญาณก่อน และตัวรับตัวใดจะได้รับเป็นตัวต่อไป เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิคซึ่งเป็นคลื่นเสียงมีคุณสมบัติการสะท้อน และหักเห จากคุณสมบัติดังกล่าวเมื่อส่งคลื่นสัญญาณออกมาสัญญาณจึงมีการสะท้อนกับวัตถุที่อยู่ใกล้ๆ เมื่อตัวรับฯ ได้จากการสะท้อนจึงทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น

แนวทางการแก้ไขที่อยากเสนอแนะเพื่อใช้ในการพัฒนาให้ระบบมีการทำงานที่ดีขึ้น ควรจะให้มีส่วนที่คอยตรวจสอบๆ ตัวรถให้น้อยที่สุด และควรที่จะพัฒนาทางด้านการเขียนโปรแกรมให้ดีขึ้น

หรืออาจพัฒนาทางด้านฮาร์ดแวร์เพื่อให้การทำงานของรถมีประสิทธิภาพมากขึ้นอีก เช่น ให้ตัวรับเอกสารหรืออาจพัฒนาทางด้านฮาร์ดแวร์เพื่อให้งานของรถมีประสิทธิภาพมากขึ้นอีก เช่น ให้ตัวรับไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวส่งมีระยะเวลาการรับส่งที่ไกลขึ้นอีก อาจใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่านี้เพื่อ
ง่ายต่อการติดต่อ และควบคุมรถให้เป็นไปตามต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ส่วน FPGA

บอร์ดทดลอง FPGA อนุกรม Wizard รุ่น FLEX – A01

1 ชุด

อุปกรณ์ภาครับ ต่อ 1 ช่องสัญญาณ ตัวต้านทาน (โอห์ม) ¼ W 5%

4.7k		3 ตัว
10k		3 ตัว
100k		2 ตัว
470k		1 ตัว
1M		1 ตัว
100k	ปรับค่าได้แบบหลายรอบ	3 ตัว
	ตัวเก็บประจุ	
0.1uF		4 ตัว
0.022uF		2 ตัว
100/16V		1 ตัว
	อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	
LF353		1 ตัว
LM393		1 ตัว
	อื่นๆ	
Connector	2 ขา สีขาว	3 ตัว
SOCKET IC	8 ขา	2 ตัว
ตัวรับ อัลตราโซนิก		1 ตัว
SOCKET IC	8 ขา	2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ภาคส่ง
ตัวต้านทาน (โอห์ม) ¼ W 5%

270	1 ตัว
1k	3 ตัว
50k	1 ตัว
470k	1 ตัว
2.7M	1 ตัว
RPACK 1k 8PIN	1 ตัว

ตัวเก็บประจุ

180pF	1 ตัว
0.01uF	1 ตัว
0.1uF	3 ตัว
47/16V	1 ตัว
220/16	1 ตัว
220/35	1 ตัว
470/25	1 ตัว

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

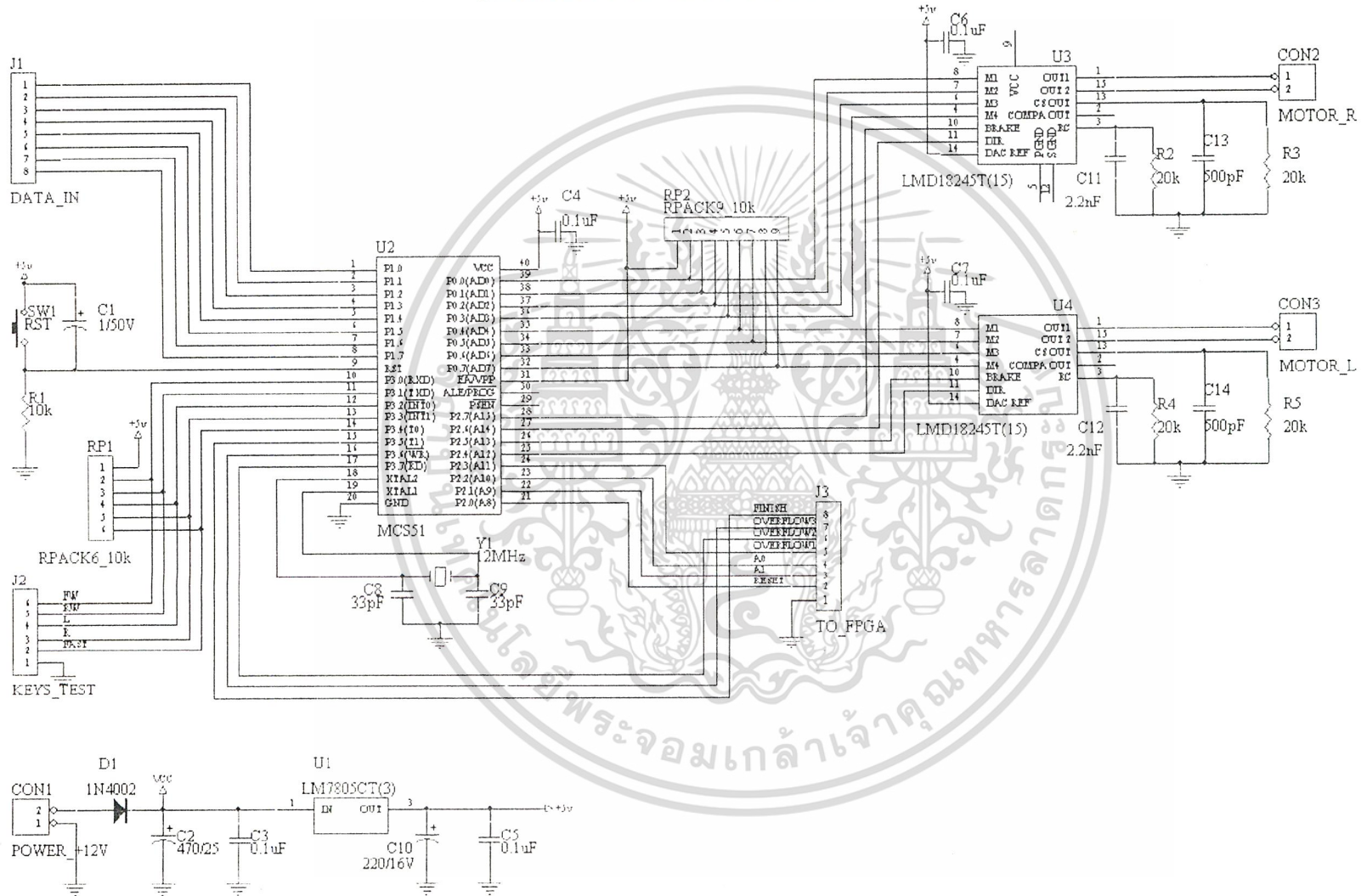
ไดโอด	1N4148	1 ตัว
ไอซี	LM7809T	1 ตัว
	MC14001B	1 ตัว
	NE555	1 ตัว
	ULN2003	1 ตัว

อื่นๆ

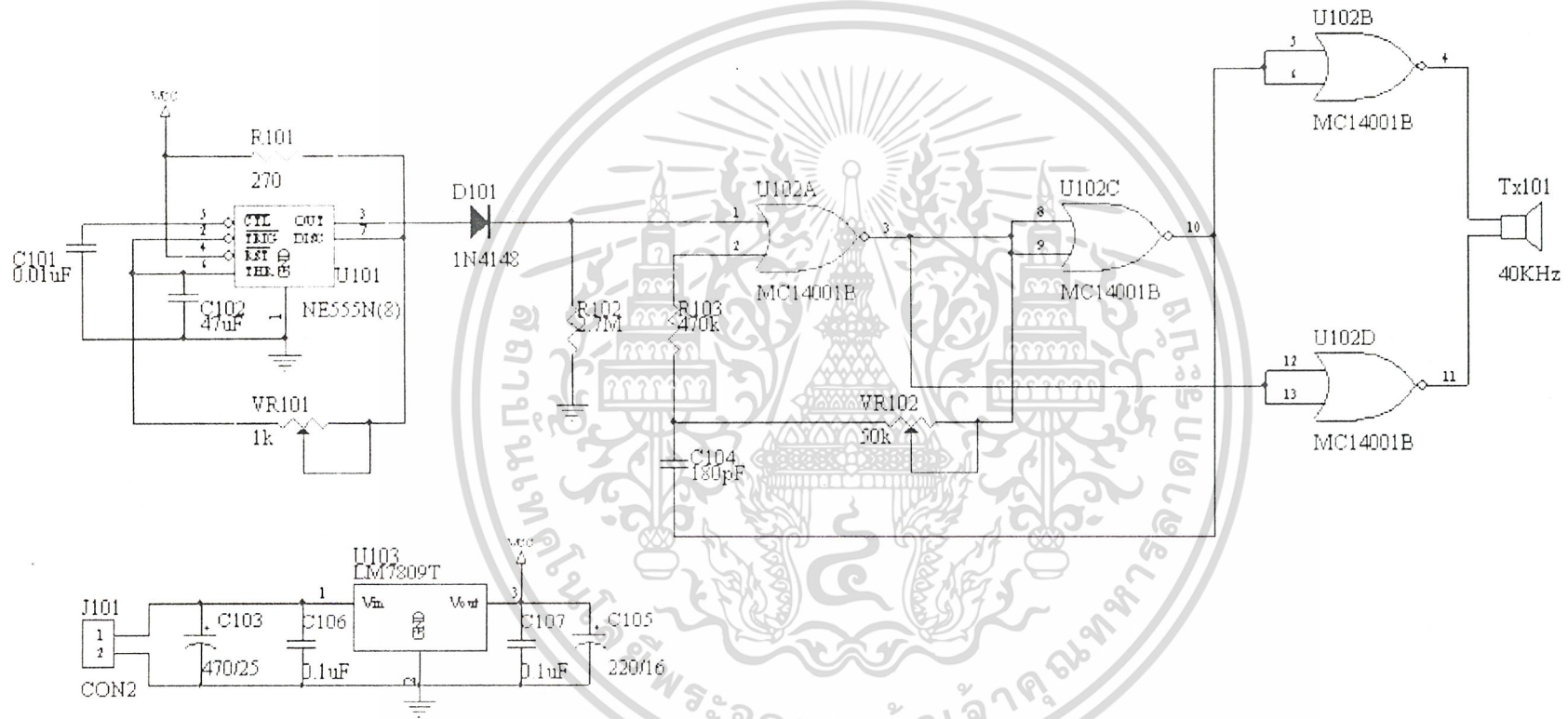
Connector	2 ขา สีขาว	5 ตัว
ตัวส่ง อัลตราโซนิก		1 ตัว
SOCKET IC	8 ขา	1 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในการเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

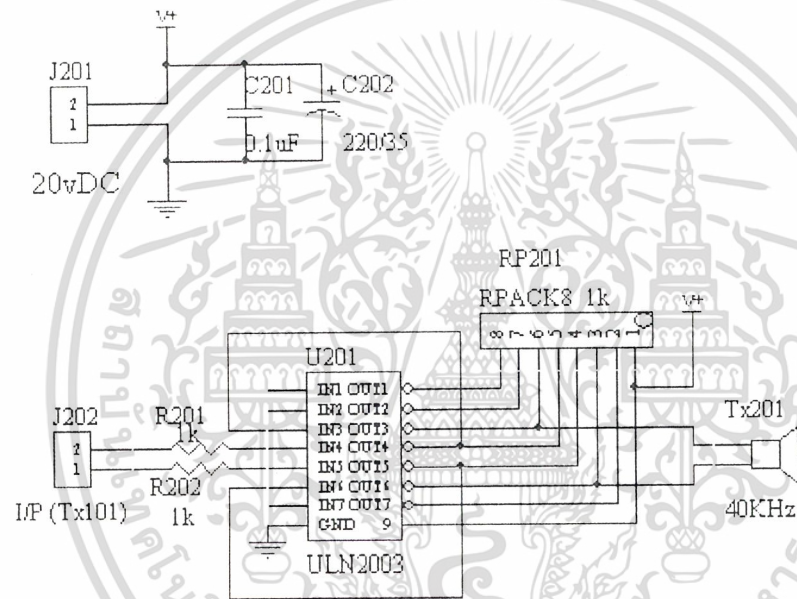
แสดงวงจรภาคไมโครคอนโทรลเลอร์



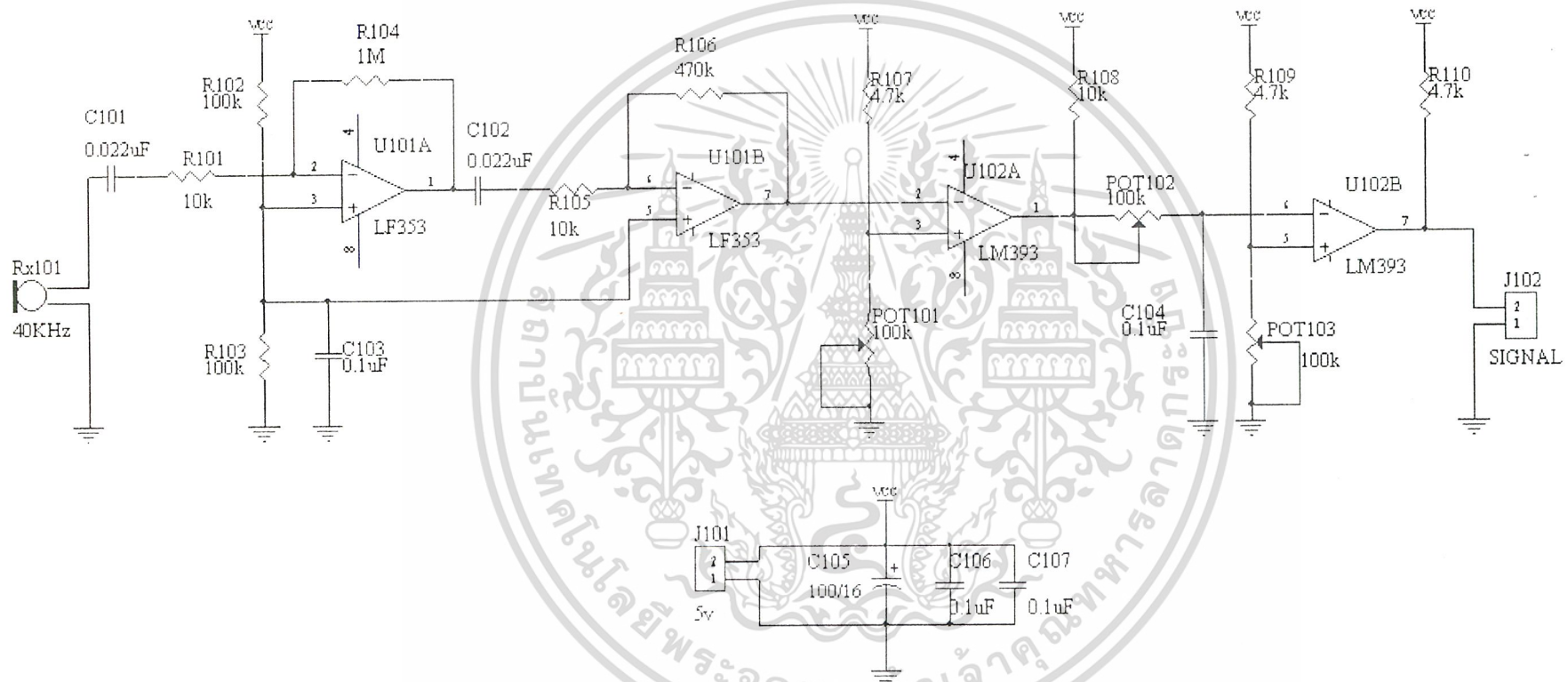
แสดงวงจรภาคส่ง



แสดงวงจร STEP-UP ภาคส่ง



แสดงวงจรภาครับ

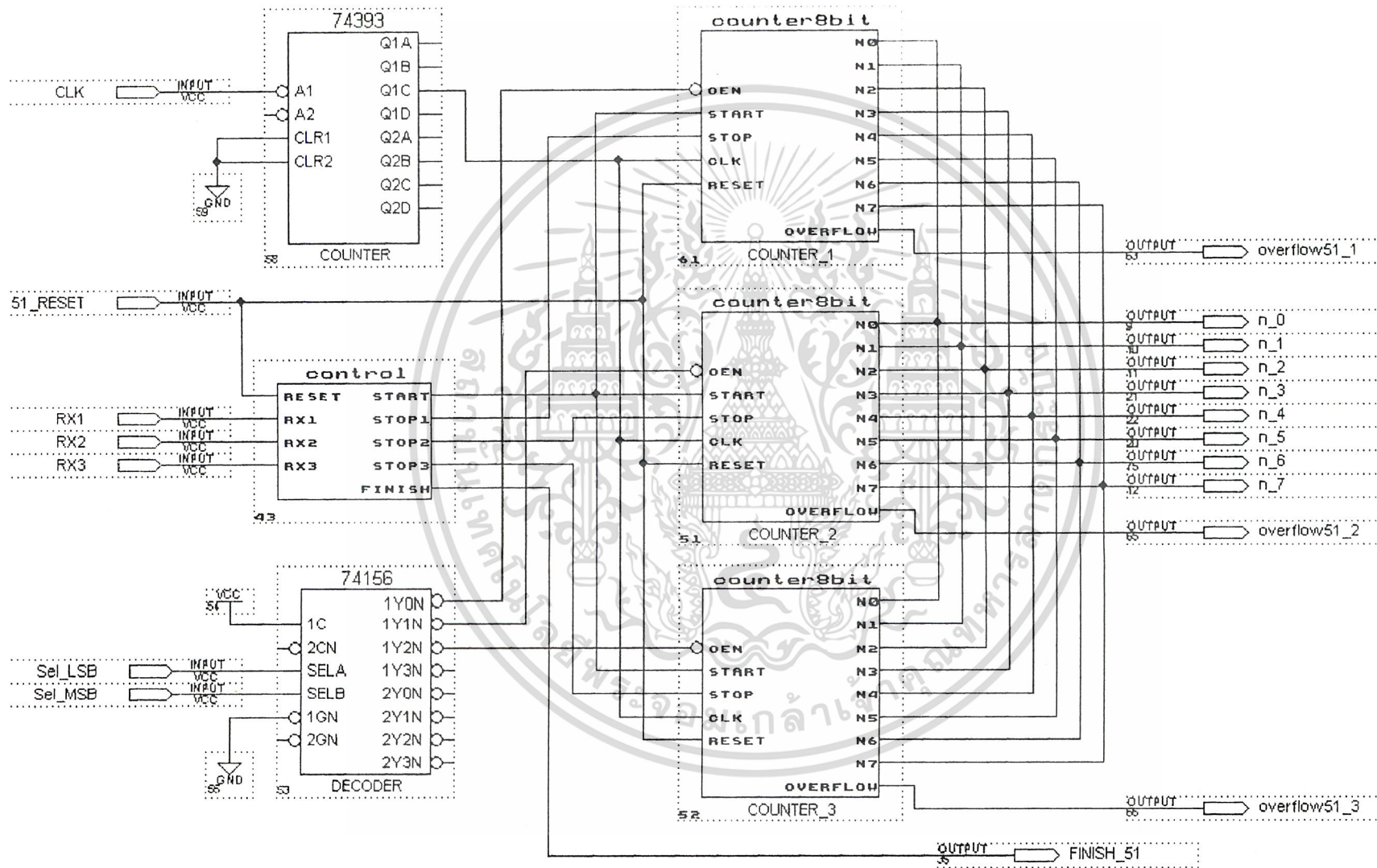




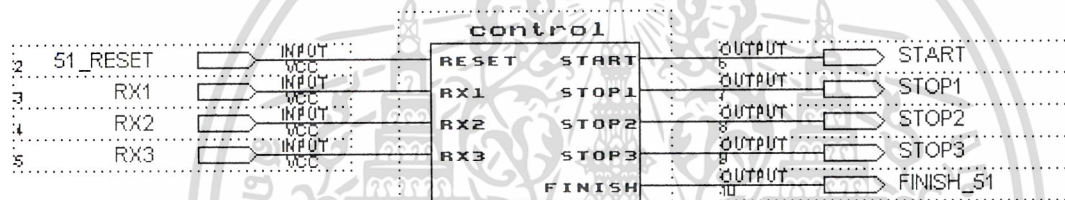
ภาคผนวก ข

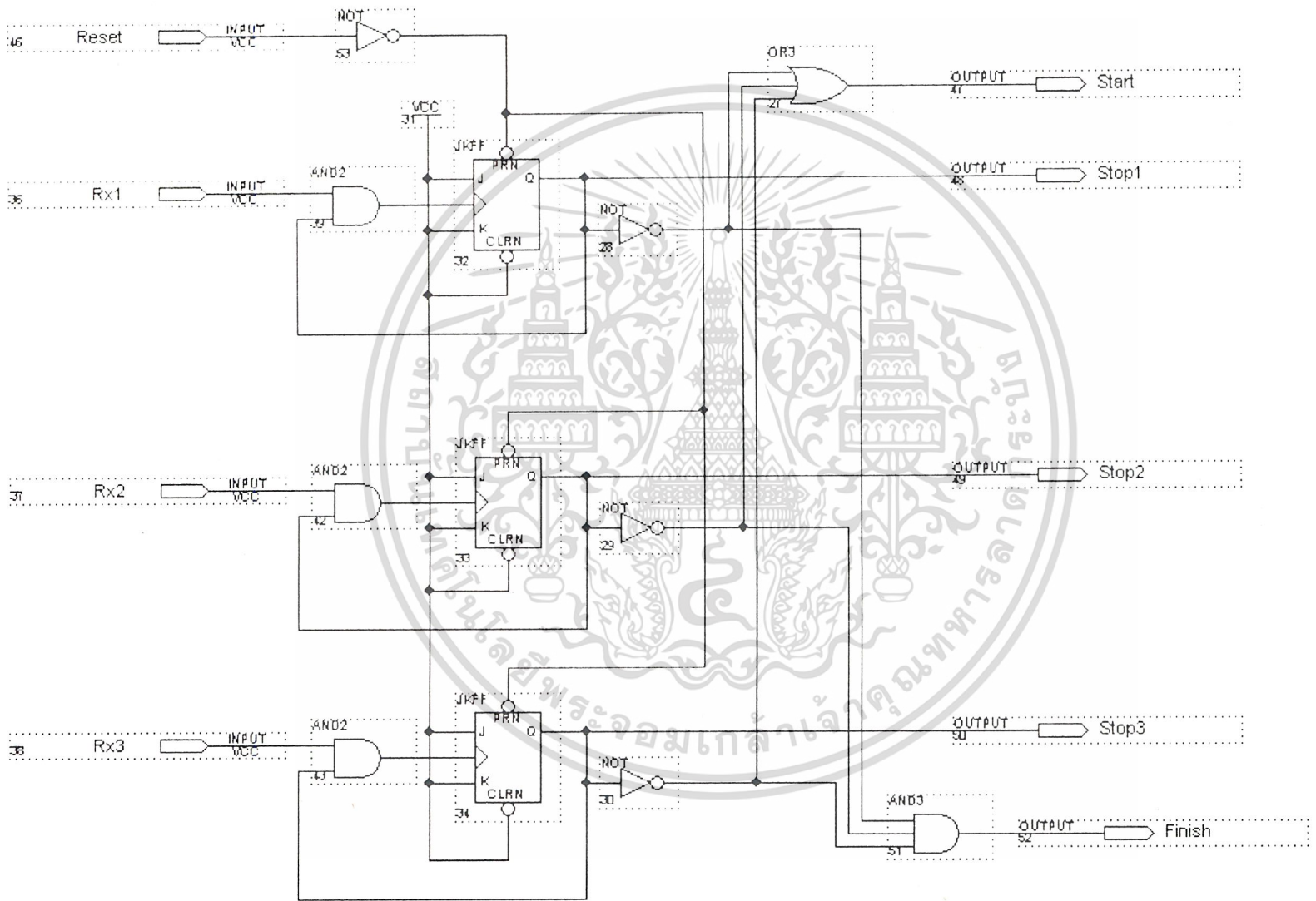
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงบล็อกไออะแกรมวงจรการทำงานทั้งหมดของ FPGA

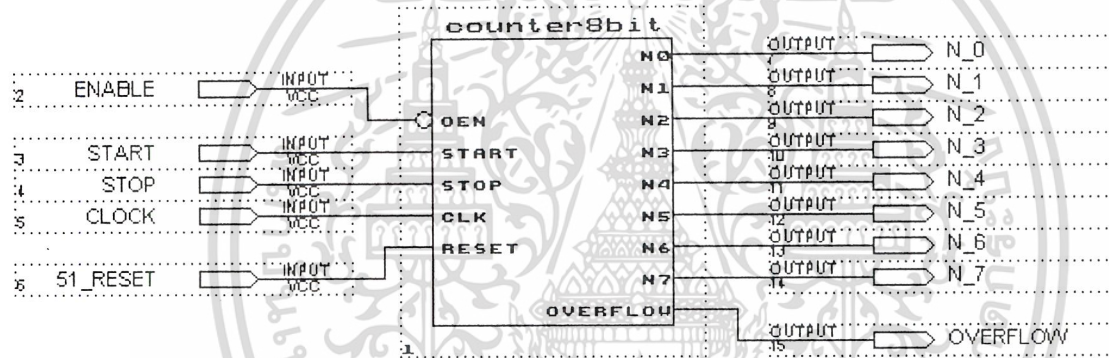


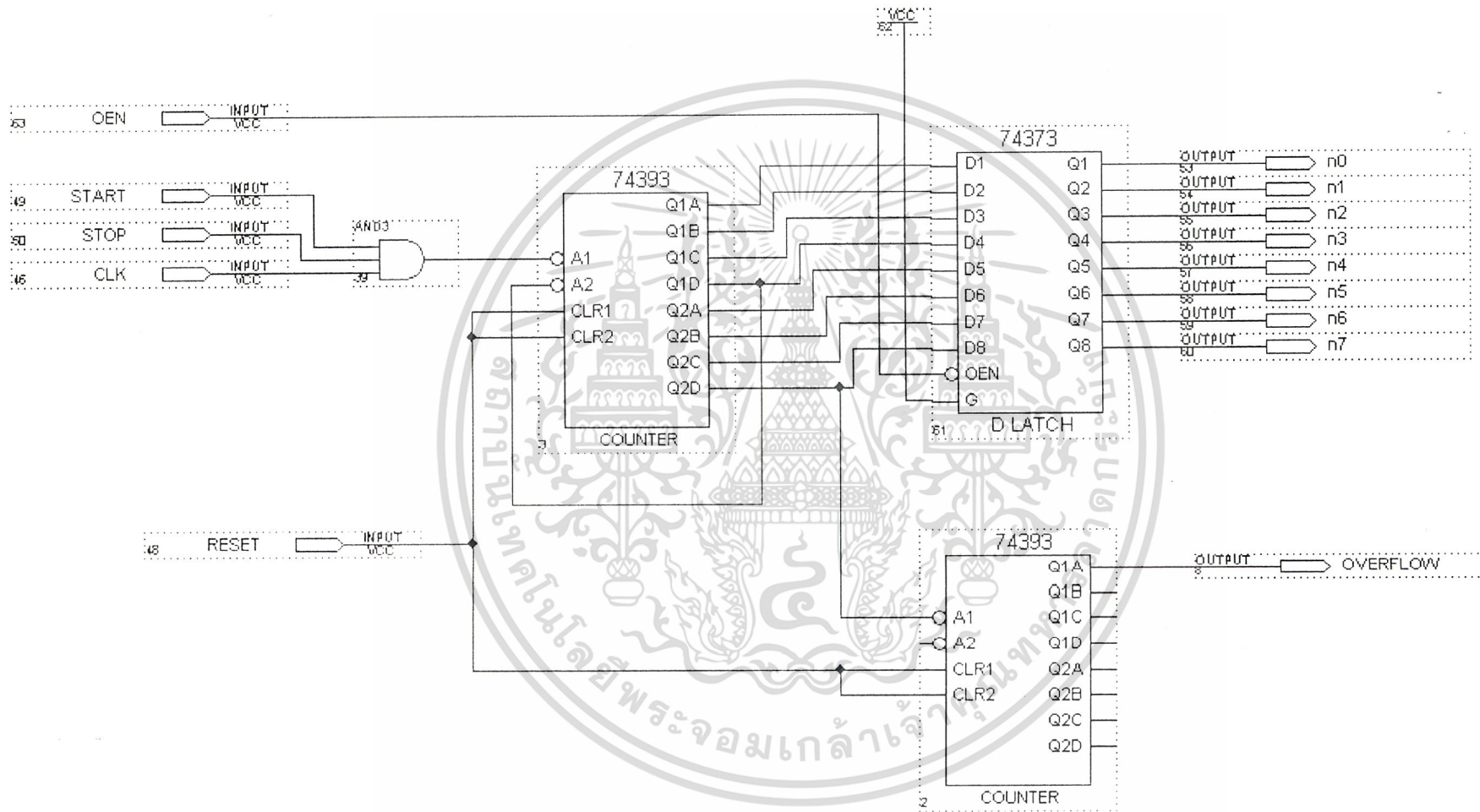
แสดงภาพของ Block Control และ วงจรภายใน Block Control





แสดงภาพของ Block Counter และ วงจรภายใน Block Counter







ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

#include<reg52.h>
#include<math.h> //use squerroot
#include<intrins.h> //use command _nop_

#define high_speed 0xFF
#define norm_speed 0xDD
#define low_speed 0xAA

#define d 0.045 // distance Rx1,Rx2 and Rx2,Rx3 4.5 cm.
#define F 0xF4240 //1.00MHz
#define V 0x14B // Vs 331m/s
#define SETR 0.3 // SET DISTANCE from TARGET 30cm.

unsigned char N1;
unsigned char N2;
unsigned char N3;

float RAD1;
float RAD2;
float RAD3;
float TEMP_VAL;
float r;
float x;
float y;

sbit BREAKR = P2^7;
sbit DIRECTIONR = P2^6;
sbit BREAKL = P2^5;
sbit DIRECTIONL = P2^4;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

sbit REST = P2^0;
sbit A0 = P2^2;
sbit A1 = P2^1;
sbit FINISH = P3^5;
sbit OVERFLOW1 = P2^3;
sbit OVERFLOW2 = P3^7;
sbit OVERFLOW3 = P3^6;
sbit FW = P3^0;
sbit RW = P3^1;
sbit L = P3^2;
sbit R = P3^3;
sbit FAST = P3^4;

void delays(unsigned int onems)
{

    TH0 = 0xFC; //XTAL 12 MHz
    TL0 = 0x18;
    TF0 = 0;
    TR0 = 1;
    while(onems)
    {
        while(!TF0); //wait until overflow
        TF0 = 0;
        onems--;
    }
    TR0 = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void RST()
{
    REST = 0;
    REST = 1;
    delayms(10);
    REST = 0;
}

```

```

void GETDATA()
{
    A1 = 0;
    A0 = 0;
    N1 = P1;
    delayms(10);
    A1 = 0;
    A0 = 1;
    N2 = P1;
    delayms(10);
    A1 = 1;
    A0 = 0;
    N3 = P1;
    delayms(10);
    A1 = 1;
    A0 = 1;
}

```

```

void DEVIDE(float DEND,float DSOR)// DEND = dividend,DSOR = divisor
{

```

```

    TEMP_VAL = DEND/DSOR;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์หรือทรัพย์สินทางปัญญาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void CALCULATE()
{

    DEVIDE((V*N1),F);
    RAD1 = TEMP_VAL;

    DEVIDE((V*N2),F);
    RAD2 = TEMP_VAL;

    DEVIDE((V*N3),F);
    RAD3 = TEMP_VAL;

    DEVIDE(((2*RAD2*RAD2)-(RAD1*RAD1)-(RAD3*RAD3)+(2*d*d)),(RAD1-
(2*RAD2)+RAD3));
    r = 0.5*TEMP_VAL;

    DEVIDE(((2*r*RAD1)+(RAD1*RAD1)-(2*r*RAD2)-(RAD2*RAD2)-(d*d)),(2*d));
    x = TEMP_VAL;

    y = sqrt(((r+RAD2)*(r+RAD2))-(x*x));
}

void SPEED()
{

    P0 = high_speed;        //set P0 is high speed

    BREAKL = 0;
    BREAKR = 0;
    DIRECTIONL = 1;
    DIRECTIONR = 1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void FORWARD()
{
    P0 = norm_speed;           //set P0 is norm_speed
    BREAKL = 0;
    BREAKR = 0;
    DIRECTIONL = 1;
    DIRECTIONR = 1;
}

```

```

void REWARD()
{
    P0 = low_speed;           //set P0 is norm_speed
    BREAKL = 0;
    BREAKR = 0;
    DIRECTIONL = 0;
    DIRECTIONR = 0;
}

```

```

void LEFT()
{
    P0 = norm_speed;           //set P0 is norm_speed
    BREAKL = 0;
    BREAKR = 0;
    DIRECTIONL = 0;
    DIRECTIONR = 1;
}

```

```

void RIGHT()
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

BREAKR = 0;
DIRECTIONL = 1;
DIRECTIONR = 0;
}

```

```

void STOP()

```

```

{
    PO = 0x00;
    BREAKL = 1;
    BREAKR = 1;
}

```

```

void TRY_SEARCH()

```

```

{
    PO = low_speed; //set PO is norm_speed
    BREAKL = 0;
    BREAKR = 0;
    DIRECTIONL = 1;
    DIRECTIONR = 0;
    delays(10);
    STOP();
}

```

```

void DRIVE()

```

```

{
    if((r+RAD2) == SETR)
        STOP();
    if((r+RAD2) < SETR)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ **if((r+RAD2) > SETR)** REWARD(); แปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    {
        if ((N1-N3)<2||((N3-N1)<2||((N1==N3))
            {
                if (((r+RAD2)-SETR)<1)
                    FORWARD();
                else
                    SPEED();
            }
        if ((N1-N3)>2)
            RIGHT();
        if ((N3-N1)>2)
            LEFT();
        delayms(10);
    }
}

void SERCH_TARGET()
{
    if(OVERFLOW1&&!OVERFLOW2&&!OVERFLOW3)
    {
        LEFT();
        delayms(10);
        STOP();
    }

    if(!OVERFLOW1&&OVERFLOW2&&!OVERFLOW3)
    {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        STOP();
    }

    if(!OVERFLOW1&&!OVERFLOW2&&OVERFLOW3)
    {
        RIGHT();
        delayms(10);
        STOP();
    }
    else
        TRY_SEARCH();
}

void REMOTE()
{
    while(!FW)
        FORWARD();
    while(!RW)
        REWARD();
    while(!R)
        RIGHT();
    while(!L)
        LEFT();
    while(!FAST)
        SPEED();
}

void main(void)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

P1 = 0xFF;           //set P1 is input port
P3 = 0xFF;           //set P3 is input port
STOP();

while(1)
{
    REMOTE();
    RST();
    delayms(10);
    if(FINISH)
    {
        i++;
        if(!OVERFLOW1&&!OVERFLOW2&&!OVERFLOW3)
        {
            i=0;
            GETDATA();
            CALCULATE();
            DRIVE();
        }
        else
            if(i==5)
            {
                i=0;
                SERCH_TARGET();
            }
    }
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. “รวมบทความทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์”, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน) กรุงเทพฯ, 2538
2. รศ. ดร. มนัส สัจจวิเศษ, ดร. กิตติพล ชิตสกุล, อ. เกษมสุข เสพศิริกุล, บุญอนันต์ เกียงเอื้อ, “เปิดโลก FPGA กับ WIZARD PLD – A01”,
3. “เอกสารประกอบการทดลองทางอิเล็กทรอนิกส์ 2”, ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. ผศ. ชีร์วัฒน์ ประกอบผล “การพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยภาษาซี”, -- กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2545



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้