

หุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิด

Landmine Detection Robot

โดย

น.ส.จิตตานันท์ จตุพรพรณยา

นายสุนทร แซ่ก้วย

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

62344

16 ส.ค. 2549

b. 11621357
i.

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หุ่นยนต์ตรวจจับระเบิด
Landmine Detection Robot

ผู้จัดทำ น.ส.จิตตานันท์ จตุพรพรหมยา 45010539
นายสุนทร แซ่ก๊วย 45010855



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.เกียรติศักดิ์ คมวัชระ)

หุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิด

โดย

น.ส.จิตตานันท์ จตุพรพรรณษา 45010539

นายสุนทร แซ่ก๊วย 45010855

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.เกียรติศักดิ์ คมวัชระ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเพื่อนำเอาวงจรตรวจจับโลหะมาประยุกต์ใช้เป็นหุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิด โดยหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ตามคำสั่งของผู้ใช้งานผ่านระบบสัญญาณความถี่วิทยุ เมื่อตรวจพบโลหะหุ่นยนต์จะหยุดรับคำสั่งการเคลื่อนที่ชั่วคราว แล้วกระทำสัญลักษณ์บริเวณที่ตรวจพบอย่างอัตโนมัติ

จากการทำงานของหุ่นยนต์นี้ จะช่วยให้ชุดเก็บกู้วัตถุระเบิดทำงานได้ง่ายและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

Landmine Detection Robot

Miss Jittanan Chatupornpanaya 45010539

Mr. Soontorn Sae-guay 45010855

Advisor

Assoc.Prof. Dr. Kiattisak Kumwachara

ABSTRACT

This thesis presents research and development of metal detector for applying to use as landmine detection robot. The user can control the robot via radio frequency control signal. When the robot detects the metal object, it will temporary deny the control signal from user and then mark the target area automatically

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้เลย หากปราศจากความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา พี่ๆ ประจำห้องวิจัย เพื่อนๆ ร่วมห้อง / คณะ ที่มีให้คำแนะนำอย่างสิ้นเหลือ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เกียรติศักดิ์ คมวัชระ ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์มากมาย ไม่ว่าจะเป็นคำแนะนำในด้านวิชาการก็ดี ที่ทำให้คณะผู้จัดทำมีความเข้าใจและมีแนวความคิดที่กว้างขวาง หลากหลายมุมมองมากยิ่งขึ้น หรือจะเป็นคำพูดที่สร้างเสริมกำลังใจในการทำงานให้แก่คณะผู้จัดทำก็ดี ล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานและอุปกรณ์ในการทำงาน อีกทั้งให้คำปรึกษาในรายละเอียดปลีกย่อยต่างๆ รวมไปถึงคำแบ่งปันประสบการณ์ในการทำงานให้สำเร็จได้ในเวลาที่กำหนด

ขอขอบคุณพี่ๆ นักศึกษาปริญญาโทและเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องตัดแผ่นอะคริลิก ซึ่งช่วยย่นระยะเวลาในการทำตัวหุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิดอย่างมาก

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่ร่วมฝ่าฟันในการเรียน การทำปริญญานิพนธ์มาด้วยกันกับคณะผู้จัดทำ บ้างก็เป็นกำลังใจ บ้างก็เป็นแหล่งความรู้ เสียงหัวเราะ และการแบ่งปันทั้งยามสุขยามทุกข์ สิ่งเหล่านี้เองที่ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เทียบพร้อมไปด้วยสาระความรู้และผลิตผลแห่งความรักความเข้าใจที่คณะผู้จัดทำได้สัมผัสมา

คณะผู้จัดทำ

น.ส. จิตตานันท์ จตุพรพรณยา

นายสุนทร แซ่ก้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการดำเนินงาน	1
1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเมื่อตรวจพบโลหะ	2
2.1.1 การเปลี่ยนแปลงภายในขดลวด เมื่อมีโลหะเข้าใกล้	2
2.1.2 เส้นแรงแม่เหล็กที่ขดส่ง	3
2.2 ประเภทของวงจรตรวจจับโลหะ (Metal Detector)	4
2.2.1 Beat Frequency Oscillator (BFO)	4
2.2.2 VLF Phase Angle	5
2.2.3 Pulse Induction (PI)	6
2.2.4 Off Resonance	7
2.2.5 Induction Balance (IB) และ Transmit / Receive (TR)	8
2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์	10
2.3.1 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลMCS-51เบอร์AT89C2051	11
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบ	15
3.1 ส่วนประกอบของโครงการ	15
3.2 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิด	15
3.2.1 ส่วนตรวจจับโลหะ	15
3.2.2 ส่วนกำเนิดสัญญาณเตือน	20
3.2.3 ส่วนควบคุมและประมวลผล	21
3.2.4 ส่วนกระทำสัญญาณเมื่อตรวจพบโลหะ	24

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	27
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	31
5.1 สรุปผลการทดลอง	31
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	31
5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการนี้	31
5.4 แนวทางการพัฒนา	31
ภาคผนวก	
ก. รูปประกอบสมบูรณ์หุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิด	32
ข. โปรแกรมควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (ภาษาแอสเซมบลี)	35
ค. การสร้างชิ้นงาน	38
ง. Datasheet ของไอซีเบอร์ต่างๆ	41
เอกสารอ้างอิง	55



สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ปลีอกไดอะแกรมของวงจร BFO	4
2.2 ปลีอกไดอะแกรมของวงจร VLF Phase Angle	5
2.3 ปลีอกไดอะแกรมของวงจร Pulse Induction (PI)	6
2.4 ปลีอกไดอะแกรมของวงจร Off Resonance	7
2.5 ปลีอกไดอะแกรมของวงจร IB Detector	9
2.6 ปลีอกไดอะแกรมของวงจร T / R Detector	10
2.7 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์	11
2.8 ตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C2051	12
2.9 ปลีอกไดอะแกรมโครงสร้างภายในของ AT89C2051	14
3.1 แสดงปลีอกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ	15
3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์และภาครับ (Sine-wave Oscillator)	16
3.3 วงจรขยายอนอินเวอร์ทิง (Non-inverting)	17
3.4 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)	18
3.5 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน	19
3.6 แผงวงจรตรวจจับโลหะ	20
3.7 วงจรสัญญาณเตือน	20
3.8 สัญญาณควบคุมเสียงจากไมโครคอนโทรลเลอร์	21
3.9 แผนผังแสดงการทำงานและการตัดสินใจของไมโครคอนโทรลเลอร์	22
3.10 วงจรควบคุมการหยุดรถ	23
3.11 แผงวงจรควบคุม, วงจรกำเนิดสัญญาณเตือน, วงจรขับเคลื่อน และวงจรขับมอเตอร์ (ปล่อยแป็ง)	24
3.12 ส่วนประกอบส่วนปล่อยแป็งแสดงตำแหน่งที่ตรวจพบโลหะ(กับระเบิด)	25
3.13 ชุดกระทำสัญลักษณ์ (ปล่อยแป็ง)	26
4.1 รูปสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ขดลวดชุดรับและชุดส่ง	28
4.2 รูปสัญญาณจากขดลวดชุดรับที่ถูกขยายแล้ว	29
4.3 รูปสัญญาณจากวงจรขยายที่ได้รับการเรียงกระแสแล้ว	29
4.4 รูปสัญญาณจากวงจรเปรียบเทียบแรงดันหลังจากพบวัตถุโลหะ	30

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

4.1 ระยะทางที่สามารถตรวจจับได้ของวัตถุโลหะแต่ละชนิดและขนาด

27



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

เนื่องจากขณะนี้ประเทศไทยประสบปัญหากลุ่มโจรบริเวณ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ คือ ยะลา ปัตตานี และนราธิวาส ซึ่งกลุ่มโจรดังกล่าวได้ทำลายบ้านเรือน โรงเรียน วัดวาอาราม และสถานที่สาธารณชนต่าง ๆ ด้วยการเผาทำลายและการลอบวางระเบิด อันก่อให้เกิดการสูญเสียทางด้านทรัพย์สินและชีวิต รวมทั้งส่งผลกระทบต่อสภาวะทางด้านจิตใจของประชาชน

คณะผู้จัดทำ จึงจัดทำโครงการเรื่องหุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิด โดยนำวงจรตรวจจับโลหะมาประยุกต์ใช้งานในการตรวจหาถังระเบิด และนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมการทำงานของตัวหุ่นยนต์เพื่อให้การตรวจจับเป็นไปอย่างอัตโนมัติ

1.2 วัตถุประสงค์ในการดำเนินงาน

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของวงจรตรวจจับโลหะแบบต่างๆ และความสามารถของวงจรตรวจจับโลหะที่เลือกใช้
2. เพื่อศึกษาถึงรูปแบบโครงสร้างและหลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ รวมทั้งศึกษาการนำมาประยุกต์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
3. เพื่อศึกษาและออกแบบหุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิดให้สะดวกต่อการใช้งาน และต้นทุนต่ำ
4. เพื่อศึกษาการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาแอสเซมบลีและนำมาประยุกต์ใช้กับโครงการ

1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการ

การศึกษาและจัดทำโครงการนี้ เริ่มแรกคณะผู้จัดทำศึกษาเกี่ยวกับหลักการทำงานของวงจรตรวจจับโลหะชนิดต่างๆ และทดลองประสิทธิภาพของวงจรตรวจจับ หลังจากนั้นจึงทำการออกแบบวงจรในส่วนต่างๆ ของหุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิดและรูปทรงของขดลวดตรวจจับ ต่อมาได้ศึกษาการทำงานและการเคลื่อนที่ของรถวิทยุบังคับเพื่อนำมาใช้เป็นส่วนขับเคลื่อน จากนั้นจึงศึกษาและออกแบบอุปกรณ์และวงจรเพื่อกระทำสัญลักษณ์โดยการปล่อยแสง รวมไปถึงวงจรกำเนิดเสียง การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นจึงนำส่วนต่างๆ มาประกอบกันเป็นโรบอทและเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

ในการจัดทำโครงการเรื่องนี้เราจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีของการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเมื่อตรวจพบโลหะ ชนิดของวงจรตรวจจับโลหะ ความรู้เกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ และความเข้าใจในการออกแบบวงจรต่างๆ ส่วนทฤษฎีที่กล่าวถึงมีหัวข้อดังนี้

2.1 การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเมื่อตรวจพบโลหะ

วงจรตรวจจับโลหะแยกการทำงานตามลักษณะและวิธีการทำงาน แต่ส่วนสำคัญที่สุดจะอยู่ที่ขดลวดซึ่งเป็นตัวรับรู้ความเปลี่ยนแปลง เมื่อตรวจพบโลหะ จะส่งสัญญาณนี้ไปแสดงผล

การเปลี่ยนแปลงในขดลวดเมื่อมีโลหะเข้าใกล้ นั้น จะเกิดจากสาเหตุ 2 ประการ คือ การเกิดกระแสไหลวน (eddy current) ในโลหะ และการเปลี่ยนแปลงค่าความซึมซาบได้ (Permeability) ของตัวกลางจากผลของอำนาจแม่เหล็ก (magnetism) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 การเปลี่ยนแปลงภายในขดลวด เมื่อมีโลหะเข้าใกล้

- ผลของกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า

อันเนื่องมาจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงวิ่งผ่านตัวนำนั้น เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าจะเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก จากเส้นแรงของขดลวดที่พันในหม้อแปลงนั้น ถ้าแกนเหล็กบาง กระแสไหลก็จะเกิดขึ้นน้อยตามขนาดของแกน ถ้าแกนเหล็กของหม้อแปลงมีขนาดใหญ่ก็จะเกิดสูง และมีผลโดยตรงจากขนาดของขดลวดที่ใช้พันหม้อแปลง เราจึงอาศัยหลักการดังกล่าวเป็นหลักการในการสร้างวงจรตรวจจับโลหะ โดยให้ขดส่งเป็นเสมือนลวดที่ใช้พันในหม้อแปลง แต่ใช้การพันด้วยแกนอากาศแทน และโลหะที่จะตรวจจับจะเสมือนเป็นแกนเหล็กในหม้อแปลง

ผลของกระแสไหลวน ซึ่งเป็นกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า เนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงวิ่งผ่านตัวนำนั้น โดยนำหลักการนี้มาใช้ในเครื่องตรวจจับโลหะ เมื่อโลหะเข้าใกล้ขดลวด ผลของกระแสไหลวนจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) ของขดลวดเปลี่ยนแปลงไป เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้แก่ขดลวด ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวด เมื่อมีโลหะเข้าใกล้ขดลวดทำให้เกิดกระแสไหลวนในโลหะ โดยเขียนแทนขดลวดและโลหะในลักษณะของการเชื่อมต่อหม้อแปลง (transformer coupling)

- ผลของอำนาจแม่เหล็กและค่าความซึมซาบได้

เนื่องจากโลหะชนิดเฟอร์รัส (ferrous) มีค่าความซึมซาบได้สูงมาก เมื่อโลหะผ่านเข้ามาในสนามแม่เหล็กของขดลวด ก็จะได้รับอำนาจแรงดึงดูดจากขดลวด แต่โลหะนี้จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ ของขดลวดเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากค่าความซึมซาบได้ของโลหะมีค่าสูงมาก

2.1.2 เส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวด

ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic force) มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างกระแสกับจำนวนรอบของขดลวดหรือเท่ากับผลคูณระหว่างความเข้มของสนามแม่เหล็กกับค่าเหนี่ยวนำของขดลวด ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$mmf = NI = HL \quad (2.1)$$

เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดแล้ว จะทำให้เกิดความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นมา สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ได้ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และจะได้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมาจากผลของสนามแม่เหล็กนั่นเอง เส้นแรงแม่เหล็กนี้เองที่ทำให้เกิดฟลักซ์รั่วไหล (linkage flux) ให้เราไปใช้งาน

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) เมื่อมีแรงเคลื่อนผ่านลูปปิดหนึ่ง ๆ จะมีกระแสไหลเกิดขึ้น โดยมีทิศทางตรงกันข้ามของกระแสสวนทางกับทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ดังนั้นเมื่อมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงขึ้น ถ้ามีขดลวดพันด้วยจำนวนรอบเท่ากับ N รอบ เมื่อป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเข้าไปในขดลวด จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า ก็คือ $mmf = NI$ นั่นเอง

จากความสัมพันธ์ความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) และความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) จะทำให้เกิด

$$B = \mu H \quad (2.2)$$

ซึ่งก็คือ จะเกิดความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กขึ้น และจะได้ฟลักซ์แม่เหล็ก (Φ) หาได้จากผลคูณระหว่างพื้นที่หน้าตัดของขดลวดกับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

$$\Phi = BA \quad (2.3)$$

จากกฎของเลนซ์ (Lenze's Law) ถ้ามีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านลูปปิดใด ๆ ที่มีพื้นที่หน้าตัด จะเกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้น ฟลักซ์แม่เหล็กตัวนี้จะทำให้เกิดฟลักซ์รั่วไหล จากสมการ

$$X = N\Phi \quad (2.4)$$

จากคุณสมบัติของฟลักซ์รั่วไหลซึ่งเราต้องนำไปใช้งาน สามารถคำนวณได้จากสูตร

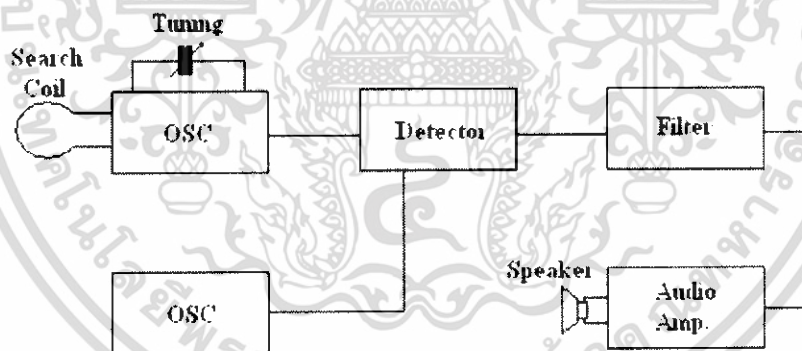
$$\begin{aligned} mmf &= NI = HL \\ I &= \frac{HL}{N} = \frac{BL}{\mu H} \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.2 ประเภทของวงจรตรวจจับโลหะ (Metal Detector)

ในปัจจุบันได้มีการคิดค้นวงจรตรวจจับโลหะ (Metal Detector) ออกมามากมายหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป แต่ที่ได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่

2.2.1 หลักการของ Beat Frequency Oscillator (BFO)

BFO เป็นชนิดที่มีหลักการทำงานง่ายที่สุด โดยอธิบายได้ดัง บล็อกไดอะแกรมต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจร BFO

วงจรตรวจจับโลหะประเภทนี้ ประกอบไปด้วย วงจรกำเนิดความถี่ (Oscillator) 2 วงจร ซึ่งจะสร้างความถี่ออกมาด้วยค่าที่ใกล้เคียงกันมาก โดยวงจรกำเนิดความถี่วงจรที่หนึ่งจะสร้างความถี่เป็นค่าความถี่อ้างอิง (Reference Frequency) ส่วนของวงจรกำเนิดความถี่อีกวงจรหนึ่งจะสามารถเปลี่ยนค่าความถี่ได้ เนื่องจากค่าความถี่ที่ขดลวดตรวจจับขณะที่มีโลหะเข้าใกล้ เมื่อวงจรกำเนิดความถี่ทั้งสองมีความถี่ที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน เมื่อนำมาผ่านวงจรตรวจจับ (Detector) สัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับที่ได้จะเกิดเป็นสัญญาณบีท (Beat) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าความถี่ทั้ง

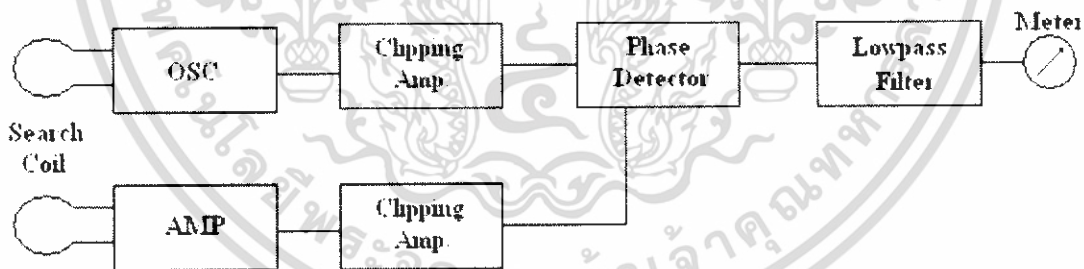
สองที่เกิดจากวงจรกำเนิดความถี่สองวงจร และสัญญาณบีบอัดตัวเอง จะถูกนำไปสร้างเป็นสัญญาณเสียงที่มนุษย์สามารถรับฟังได้ (Low Audio) โดยผ่านวงจรกรองความถี่ (Filter) ก่อน แล้วจึงนำส่งออกไปทางลำโพง (Speaker)

สัญญาณที่ออกทางลำโพงนั้น จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความถี่ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ของขดลวดตรวจจับ ขณะที่มิโหะเข้าใกล้ กล่าวคือ เมื่อมิโหะที่เข้าใกล้เป็นชนิดเฟอร์ไรต์ จะมีผลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำ ที่ขดลวดตรวจจับมีค่าเพิ่มขึ้น ความถี่ของวงจรกำเนิดความถี่ จะมีค่าลดลง ทำให้สัญญาณที่เข้าลำโพงนั้นลดลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อมิโหะที่เข้าใกล้เป็นชนิดนอน-เฟอร์ไรต์ (Non-Ferrous) จะมีผลทำให้ค่าความเหนี่ยวนำที่ขดลวดตรวจจับลดลง ความถี่ที่วงจรกำเนิดความถี่ จะเพิ่มขึ้น ทำให้สัญญาณที่เข้าลำโพงมีค่าสูงขึ้น

สำหรับวงจรตรวจจับมิโหะชนิดนี้ จะมีความถี่ในการทำงานประมาณ 125 KHz ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดจากค่าการเก็บประจุร้าว (Ground Capacitance) ข้อดีของเครื่องตรวจจับประเภทนี้คือมีราคาถูก แต่มีข้อเสียอีกหลายประการด้วยกัน เช่น สิ้นเปลืองในการใช้วงจรกำเนิดความถี่ 2 วงจร, ต้องคอยปรับค่าความถี่ใหม่ทุกครั้งที่ใช้งาน, มีความไว (Sensitivity) ต่ำ

2.2.2 หลักการของ VLF Phase Angle

วงจรตรวจจับมิโหะชนิดนี้จะใช้ค่าความต่างเฟสของความถี่มาเป็นตัวตรวจจับ โดยอธิบายได้ดังบล็อกไดอะแกรมต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจร VLF Phase Angle

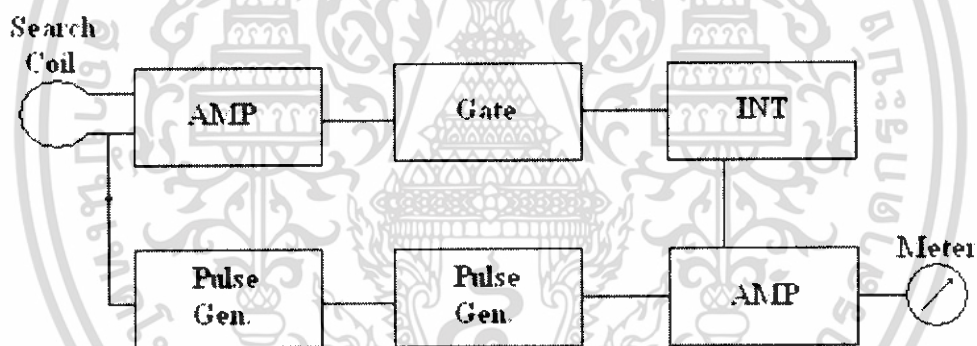
สำหรับวงจรนี้ จะใช้ขดลวด 2 ขด ทำหน้าที่เป็นขดลวดตรวจจับ โดยขดหนึ่งจะต่ออยู่กับวงจรกำเนิดความถี่ ซึ่งจะสร้างสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) ออกมา ณ ความถี่ค่าหนึ่ง ส่วนอีกขดลวดหนึ่ง จะเป็นตัวรับสัญญาณที่ความถี่เดียวกัน แล้วนำไปเข้าวงจรขยาย (Amplifier) เพื่อขยายสัญญาณ จากนั้นนำสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมทั้งสองนี้ไปเข้าวงจรตรวจจับเฟส (Phase Detector) เพื่อสร้างสัญญาณที่เกิดจากความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสอง และเมื่อมีมิโหะเข้าใกล้ขดลวดตรวจจับ จะทำให้ค่าความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะมีความต่างเฟสมากขึ้นเมื่อ

โลหะที่เข้าใกล้เป็นชนิดเฟอร์ไรต์และความต่างเฟสลดลงเมื่อเป็นชนิดนอน-เฟอร์ไรต์ หลังจากนั้น สัญญาณที่ได้จากความต่างเฟสจะถูกนำไปผ่านวงจรกรองความถี่ชนิดต่ำผ่าน (Low-pass Filter) เพื่อกรองความถี่สูงทิ้งไป และนำไปยังวงจรเรียงกระแส (Rectifier) เพื่อให้สัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณกระแสตรง ซึ่งทำให้ตรวจสอบได้จากมิเตอร์ หรืออาจนำสัญญาณนี้ไปเข้าวงจรช็อปเปอร์ (Chopper) เพื่อสร้างเป็นสัญญาณที่มนุษย์สามารถรับฟังได้ (Low Audio)

สำหรับวงจรตรวจจับโลหะชนิดนี้ จะมีความถี่ในการทำงานประมาณ 3-6 KHz ซึ่งสามารถทะลุทะลวงผ่านพื้นผิวบริเวณที่ตรวจจับได้ดี และป้องกันผลจากค่าการเก็บประจุร้าวได้ อีกด้วย อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีข้อเสียอยู่บ้าง คือ วงจรนี้ใช้กระแสไฟฟ้าสูง เพื่อให้ได้ความไว สูง ๆ กับโลหะที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงต้องใช้แบตเตอรี่ขนาดใหญ่ นอกจากนี้ ความสามารถในการระบุตำแหน่งที่แน่นอน ยังไม่ดีเท่าที่ควร

2.2.3 หลักการของ Pulse Induction (PI)

มีหลักการทำงานซึ่งอธิบายได้ดังบล็อกไดอะแกรมต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Pulse Induction (PI)

เนื่องจากเราทราบว่าขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กออกไป เป็นสัดส่วนกับจำนวนของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในขดลวด และจำนวนรอบของขดลวด

วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse Generator) จะส่งสัญญาณที่เป็นพัลส์ช่วงสั้น ๆ ไปยังขดลวดตรวจจับ ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวดที่ขอบขาลงของแต่ละพัลส์ สนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดจะลดลง จนกระทั่งแรงดันตกลงเป็นศูนย์ ก็จะไม่มีการไหลผ่านขดลวด แต่เนื่องจากขดลวดสะสมพลังงานไว้ภายใน จึงเกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ (Back Electromagnetic Force = Back E.M.F) และเกิดสนามแม่เหล็กย้อนกลับ ซึ่งทำให้แรงดันตกคร่อม

ขดลวดมีทิศทางตรงกันข้าม (Reverse Voltage) และพลังงานสะสมนี้จะสลายตัวลงจนแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับตกลงเป็นศูนย์

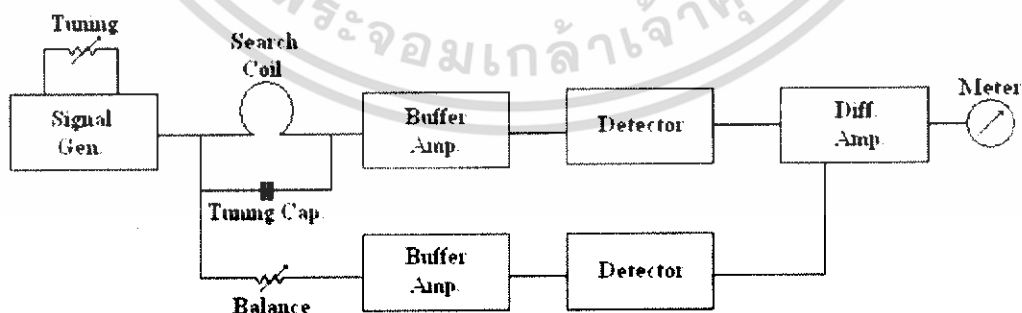
เราจะใช้คุณสมบัติการสลายตัวของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับนี้เอง เป็นจุดเปรียบเทียบในการตรวจจับโลหะ เมื่อมีโลหะไม่ว่าจะเป็นเฟอร์ไรต์ หรือนอน-เฟอร์ไรต์ เข้าใกล้ขดลวด มันจะได้รับผลจากสนามแม่เหล็ก เกิดเป็นกระแสไหลวนหรือผลจากอำนาจแม่เหล็กที่โลหะนั้นตามแต่ชนิดของโลหะ และผลจากสนามแม่เหล็กนี้เอง จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับที่ตกลงไปเป็นศูนย์ มีระยะเวลายาวกว่าปกติ

วงจรตรวจจับจะเป็นวงจรที่ตรวจจับจากพื้นที่ภายใต้สัญญาณของการสลายตัวของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับซึ่งจะทำได้โดย นำสัญญาณจากขดลวดมาขยาย และทำเป็นแรงดันตัวอย่าง (Sample Voltage) แล้วส่งไปเข้าอินทิเกรเตอร์ (Integrator) ซึ่งอินทิเกรเตอร์จะสร้างสัญญาณเอาท์พุทเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับเวลาในการสลายของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ แล้วจึงนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้านี้ไปควบคุมวงจรกำเนิดความถี่ที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Controlled Oscillator :VCO) ซึ่งนำไปขับลำโพงอีกทีหนึ่ง

วงจรตรวจจับชนิดนี้มีความไวสูงมาก โดยส่วนประกอบของเครื่องกลที่มีวงจรนี้จะเป็นโลหะไม่ได้ เพราะจะไปรบกวนและมีผลต่อวงจรตรวจจับ แต่ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับค่าการเก็บประจุร้าวดีข้อเสียของวงจรตรวจจับชนิดนี้คือ ไม่สามารถแยกแยะได้ว่า โลหะชนิดนั้นเป็น เฟอร์ไรต์หรือนอน-เฟอร์ไรต์ และยังกินกำลังไฟฟ้าสูงอีกด้วย

2.2.4 หลักการของ Off Resonance

จะมีหลักการทำงานคล้ายกับวิธี BFO แต่อาศัยหลักการการสมดุลของสนามแม่เหล็กด้วย ดังบล็อกไดอะแกรมต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจร Off Resonance

เครื่องกำเนิดสัญญาณจะส่งสัญญาณไปยังวงจรขยายบัฟเฟอร์ (Buffer Amplifier) และวงจรตรวจจับ โดยผ่านวงจรปรับแก้แอลซี (LC Tuning) ซึ่งทำหน้าที่เป็นขดลวดตรวจจับ และสัญญาณโดยตรงจากขดลวดตรวจจับจะนำไปเข้าในส่วนควบคุมสมดุล (Control Balance) และต่อไปยังวงจรขยายบัฟเฟอร์และวงจรตรวจจับอีกชุดหนึ่ง ดังรูป 2.4

สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรตรวจจับ ทั้งสองจะนำไปเข้าวงจรขยายความแตกต่าง (Differential Amplifier) ซึ่งจะเป็นตัวจับความแตกต่างของสัญญาณจากวงจรตรวจจับทั้งสอง ในสภาวะปกติเราจะปรับสมดุลให้เอาต์พุตเป็นศูนย์ จากส่วนควบคุมสมดุล และเมื่อมีโลหะเข้าใกล้ขดลวดตรวจจับ จะทำให้เกิดการเลื่อนความถี่เรโซแนนซ์ (Shift Resonance Frequency) ที่วงจรปรับแก้แอลซี เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นที่วงจรขยายความแตกต่าง ซึ่งสามารถตรวจจับได้โดยใช้มิเตอร์ หรืออาจนำสัญญาณจากวงจรขยายความแตกต่างมาสร้างเป็นสัญญาณที่เราจับฟังได้

สำหรับเครื่องตรวจจับชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมเท่าใดนัก เนื่องจากมีความไวต่ำ และวงจรมีความยุ่งยากซับซ้อน

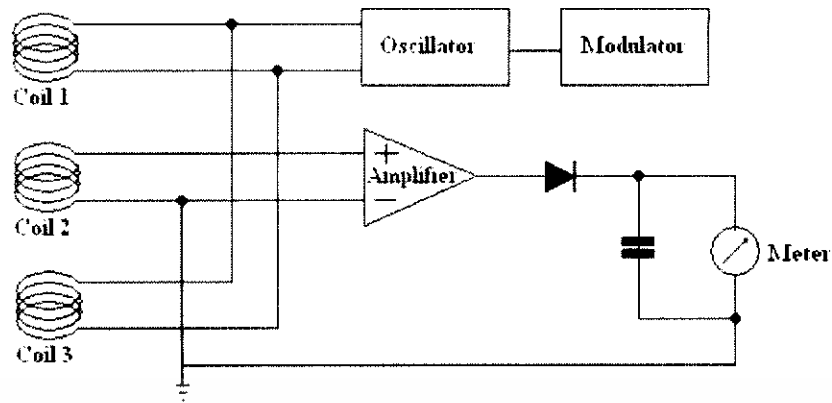
2.2.5 หลักการของ Induction Balance (IB) และ Transmit / Receive (TR)

มีรายละเอียดดังนี้

วงจรกำเนิดความถี่ จะส่งสัญญาณไปยังขดลวดชุดส่ง (Transmit Coil) ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวดชุดส่ง ขดลวดชุดรับ (Receive Coil) ซึ่งวางเหลื่อม (Overlapping) กันกับขดลวดชุดส่งจะรับสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะสมดุล ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดกับขดลวดทั้งสองชุดนั้น มีความแตกต่างกันน้อยมาก เมื่อมีโลหะเข้ามาในสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดความไม่สมดุล เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ขดลวดชุดรับเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้แรงดันตกคร่อมขดลวดชุดรับเปลี่ยนแปลงด้วย เมื่อนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากขดลวดชุดรับไปผ่านวงจรขยาย และวงจรเรียงกระแส และวงจรกรองความถี่แล้ว จะได้สัญญาณเอาต์พุตของระบบเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage) สัญญาณดังกล่าวสามารถนำไปใช้แสดงผลด้วยวงจรอื่น ๆ เช่น วงจรกำเนิดเสียง เป็นต้น เครื่องตรวจจับโลหะที่ใช้หลักการ IB แบ่งเป็น 2 ชนิด ดังนี้

2.2.5.1 IB Detector

ประกอบด้วย ขดลวดตรวจจับ 3 ชุด ดังรูป

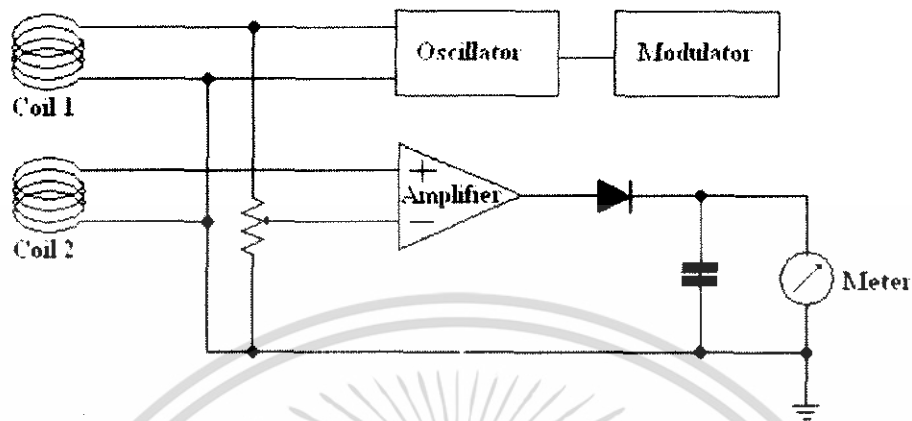


รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจร IB Detector

วงจรกำเนิดความถี่จะผลิตความถี่ป้อนเข้าขดลวด 2 ขด โดยวางขดลวดทั้งสามซ้อนกัน โดยเว้นระยะห่างจากขดลวดประมาณ ขดลวด 1 และ ขดลวด 3 จะต่อกับวงจรกำเนิดความถี่ ซึ่ง ขดลวด 3 จะพันด้วยทิศทางตรงกันข้ามกับขดลวด 1 เพื่อให้ขดลวดทั้งสองให้สนามแม่เหล็กต่างเฟสกัน (Anti-phase Field) สมดุลของสนามแม่เหล็กจะขึ้นกับขดลวด 2 เมื่อนำโลหะเข้าไปใกล้ขดลวด จะเกิดการไม่สมดุลของสนามแม่เหล็กขึ้น ขดลวด 2 จะรับสัญญาณที่เกิดขึ้นจากความไม่สมดุลนี้ และทำให้มีการแสดงผลโดยนำสัญญาณนี้ไปทำการขยายโดยวงจรขยาย และนำไปเรียงกระแสโดยวงจรเรียงกระแส แล้วจึงไปนำขงวงจรแสดงผล เช่น มิเตอร์ เป็นต้น

2.2.5.2 T / R Detector (Transmit / Receive)

ประกอบด้วย ขดลวดตรวจจับ 2 ชุด ดังรูป



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของวงจร T / R Detector

ขดลวดที่ต่อกับวงจรกำเนิดความถี่มีเพียงขดเดียว อีกขดหนึ่งนั้นจะต่อกับวงจรขยายแบบนอนอินเวิร์ททิง โดยอินพุตที่ขาอินเวิร์ททิง จะต่อกับสัญญาณที่เป็นแรงดันอ้างอิง (ใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้) เมื่อส่วนตรวจจับไม่พบโลหะจะต้องทำการปรับสัญญาณอ้างอิง เพื่อไม่ให้มีสัญญาณเอาท์พุทปรากฏขึ้น เมื่อมีโลหะเข้าใกล้ขดลวดตรวจจับ จะเกิดสัญญาณที่ขดรับ สัญญาณที่ไม่สมดุลนี้จะถูกส่งไปยังส่วนแสดงผลต่อไป

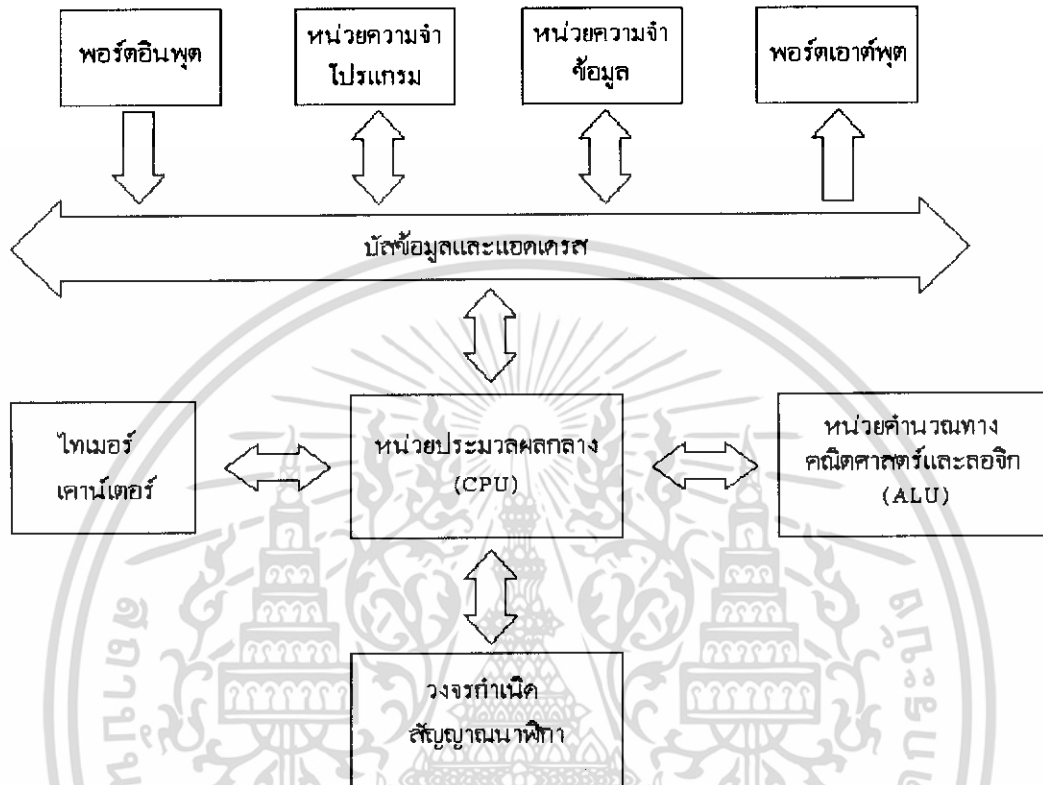
เครื่องตรวจจับโลหะทั้งสองชนิดนี้ สัญญาณที่ได้รับการตรวจจับของขดรับเมื่อตรวจพบโลหะชนิดเฟอร์รัส จะเพิ่มขึ้นและสัญญาณนี้จะลดลงเมื่อเป็นโลหะชนิดนอน-เฟอร์รัส

2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) เป็นชื่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่งซึ่งรวมเอาหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก วงจรรับสัญญาณอินพุต วงจรจับสัญญาณเอาท์พุต หน่วยความจำ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถนำไปใช้งานแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบ ในขณะที่มีขีดความสามารถสูงขึ้น ภายใต้งบประมาณที่เหมาะสม

ไมโครคอนโทรลเลอร์มาจากคำ 2 คำรวมกันคือ “ไมโคร” (micro) ซึ่งหมายถึงไมโครโปรเซสเซอร์ (microprocessor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประมวลผลข้อมูลขนาดเล็ก ภายในประกอบด้วย หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU : Central Processing Unit) หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก (ALU : Arithmetic Logic Unit) วงจรเชื่อมต่อหน่วยความจำ และวงจรสัญญาณนาฬิกา อีกคำ

หนึ่งก็คือคำว่า “คอนโทรลเลอร์” (controller) หมายถึงอุปกรณ์ควบคุม ดังนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม โดยที่สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดรูปแบบการควบคุมได้อย่างอิสระ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์

2.3.1 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ AT89C2051

AT89C2051 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-51 ซึ่งมีหน่วยความจำภายในเป็นแบบแฟลช (flash memory) เหตุผลที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์นี้มีด้วยกันหลายประการดังนี้

1. หน่วยความจำโปรแกรมภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นแบบแฟลช ทำให้สามารถลบและเขียนใหม่ได้นับพันครั้ง จึงสามารถใช้งานในรูปแบบของไมโครคอนโทรลเลอร์ชิปเดี่ยวโดยไม่ต้องใช้หน่วยความจำภายนอก ส่งผลให้สามารถใช้งานพอร์ตอินพุตเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ
2. ต้นทุนและเวลาในการพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ลดลงอย่างมาก เนื่องจากไม่ต้องใช้เครื่องมือพัฒนาจำพวกอีมูเลเตอร์และเครื่องโปรแกรมอีมูเลเตอร์
3. บริษัทผู้ผลิตได้ทำการผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้ออกมาหลายเบอร์ และมีความสามารถแตกต่างกันไป ทำให้มีทางเลือกในการใช้งานสูง

4. ด้วยการใช้หน่วยความจำภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้สามารถป้องกันการคัดลอกข้อมูลของหน่วยความจำโปรแกรมได้เป็นอย่างดี
5. ชุดคำสั่งและสถาปัตยกรรมพื้นฐานเหมือนกับไมโครคอนโทรลเลอร์ MSC-51 ของผู้ผลิตอื่น ไม่ว่าจะเป็นอินเทล, ซิเมนส์ หรือ ดัลลัส

คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C2051

- ต้องการแหล่งจ่ายไฟ + 5V ชุดเดียว
- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ซีพียูขนาด 8 บิต
- ภายในมีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลชสามารถลบและเขียนใหม่ได้ทันที
- หน่วยความจำข้อมูลพื้นฐานเป็นหน่วยความจำแบบ EPROM
- ขาพอร์ตเป็นแบบสองทิศทาง สามารถใช้งานเป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต
- มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบฟูลดูเพล็กซ์
- ไทม์เมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 16 บิต 2 ตัว
- สามารถรองรับแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปต์ได้ 6 ประเภท
- สามารถขยายหน่วยความจำภายนอกเพิ่มเติมได้สูงสุด 64 กิโลไบต์
- มีวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาอยู่ในชิป

พอร์ตของ AT89C2051

PDIP/SOIC

RST/VPP	1	20	VCC
(RXD) P3.0	2	19	P1.7
(TXD) P3.1	3	18	P1.6
XTAL2	4	17	P1.5
XTAL1	5	16	P1.4
(INT0) P3.2	6	15	P1.3
(INT1) P3.3	7	14	P1.2
(T0) P3.4	8	13	P1.1 (AIN1)
(T1) P3.5	9	12	P1.0 (AIN0)
GND	10	11	P3.7

รูปที่ 2.8 ตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C2051

AT89C2051 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 20 ขา ซึ่งมีขาต่างๆดังนี้

ขา Vcc (ขา 20) ใช้สำหรับต่อไฟเลี้ยง +5V

ขา GND (ขา 10) เป็นขากราวด์ สำหรับต่อกับกราวด์ของระบบ

ขาพอร์ท 1(ขา 12-19) มี 8 ขา คือ (P1.0-1.7) แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุตสำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ทใดเป็นอินพุต สามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ทที่ต้องการติดต่อด้วย

ขาพอร์ท 3 (ขา 2-3 , ขา 6-9) ก็เป็นได้ทั้งอินพุตเอาต์พุตได้เช่นกัน และยังเป็นขาที่มีหน้าที่การใช้งานพิเศษ ดังมีรายละเอียดขั้นต้นต่อไปนี้

P3.0 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา RxD

P3.1 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับส่งข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรมหรือขา TxD

P3.2 ใช้เป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา INTO

P3.3 ใช้เป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา INT1

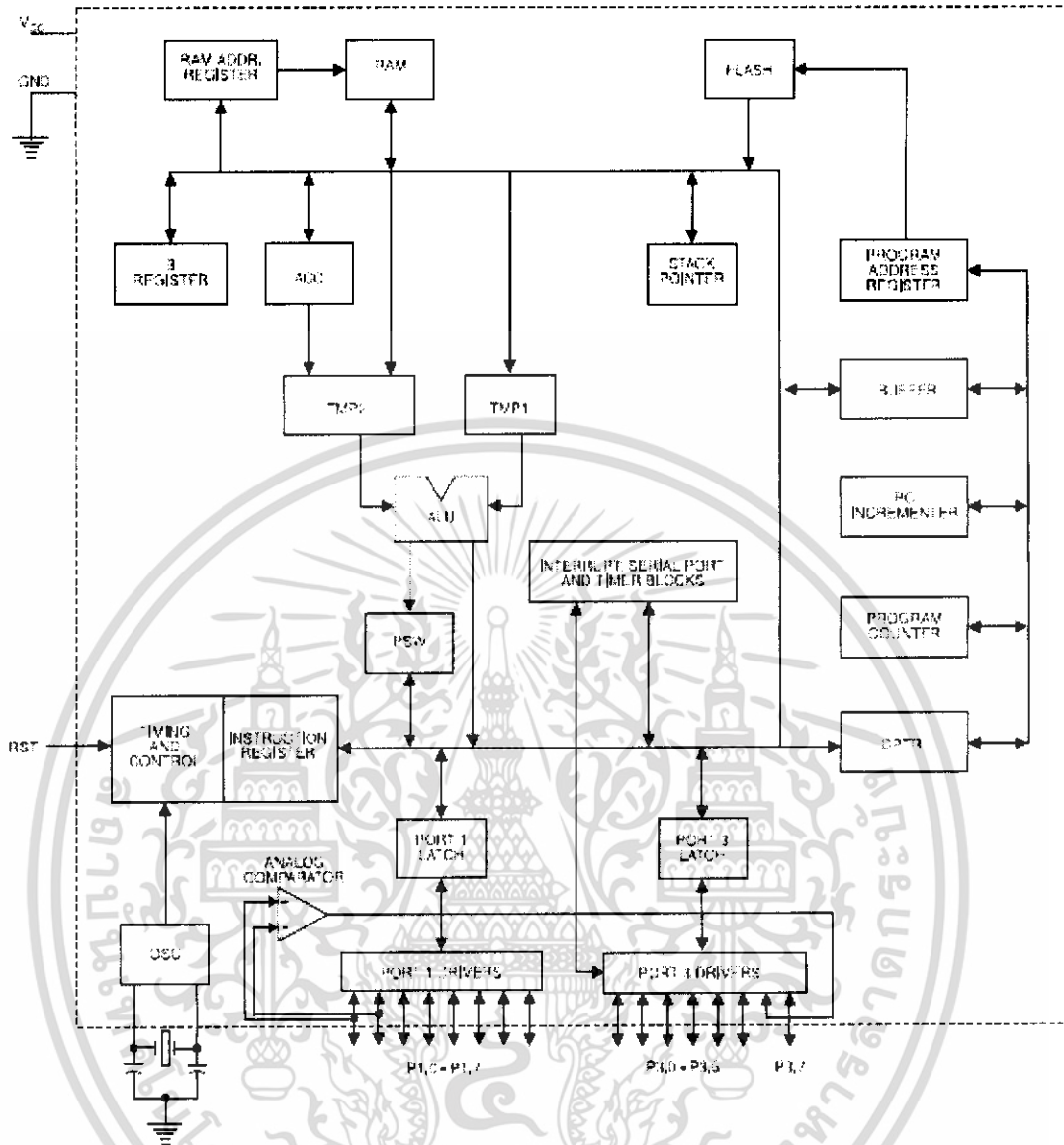
P3.4 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณไทมเมอร์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา T0

P3.5 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา T1

ขา รีเซ็ต (Reset) ใช้ในการรีเซ็ตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในการป้อนสัญญาณเพื่อรีเซ็ต สถานะที่ขานี้ต้องอยู่ในระดับรีเซ็ตอย่างน้อย 2 แมกซีนไซเคิล โดยที่วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกายังคงทำงานต่อเนื่องไปอย่างเป็นปกติ

ขา XTAL1 และ XTAL2 เป็นขาสำหรับต่อคริสตอลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการกำหนดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

Block Diagram

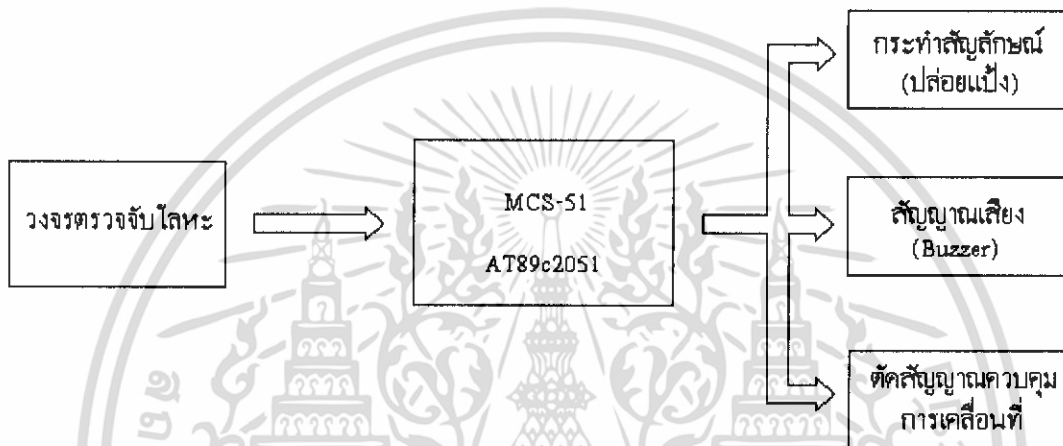


รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างภายในของ AT89C2051

บทที่ 3

หลักการออกแบบ

โครงการนี้เป็นการศึกษาทดลอง คือศึกษาวงจรตรวจจับโลหะชนิดต่างๆ แล้วเลือกวงจรที่เหมาะสมที่สุดมาประกอบเป็นเครื่องตรวจจับโลหะ และทดลองภาคสนามในการค้นหาโลหะว่ามีประสิทธิภาพเป็นอย่างไร โดยมีรายละเอียดของการออกแบบโครงการดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบ

3.1 ส่วนประกอบของโครงการแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ส่วนประกอบทางด้านเมคคาทรอนิกส์ เป็นในส่วนของรูปแบบและโครงสร้างหลักของเครื่องตรวจจับกับระเบิด
2. ส่วนประกอบทางด้านซอฟต์แวร์ เป็นส่วนของการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องตรวจจับกับระเบิด เมื่อค้นพบกับระเบิดและทิศทางการเคลื่อนที่

3.2 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิด

3.2.1 ส่วนตรวจจับโลหะ

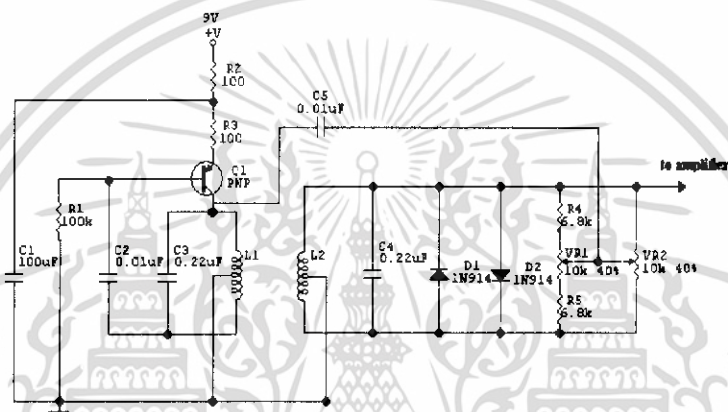
วงจรที่ใช้ในการทดลองสร้างส่วนตรวจจับโลหะนั้น ในที่นี้เราเลือกใช้ T / R Detector เนื่องจากสามารถทำความเข้าใจวงจรได้ง่ายและไม่ซับซ้อน

วงจรประกอบในส่วนตรวจจับโลหะมี 4 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้

1. วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์และภาครับ (Sine wave Oscillator)
2. วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)
3. วงจรเรียงกระแส (Rectifier)
4. วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Comparator)

3.2.1.1 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์และภาครับ (Sine-wave Oscillator)

มีรายละเอียดวงจรดังรูป



รูปที่ 3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์และภาครับ (Sine-wave Oscillator)

ในวงจรนี้เราใช้ขดลวด L1 และ ตัวเก็บประจุ C3 เพื่อสร้างสัญญาณไซน์ แรงดันตกคร่อม L1 จะเป็นแรงดันกำเนิดความถี่ ดังนั้น L1 จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นแล้วส่งออกไปยังบริเวณรอบ ๆ ด้วยความถี่ที่สามารถคำนวณได้จากสมการ

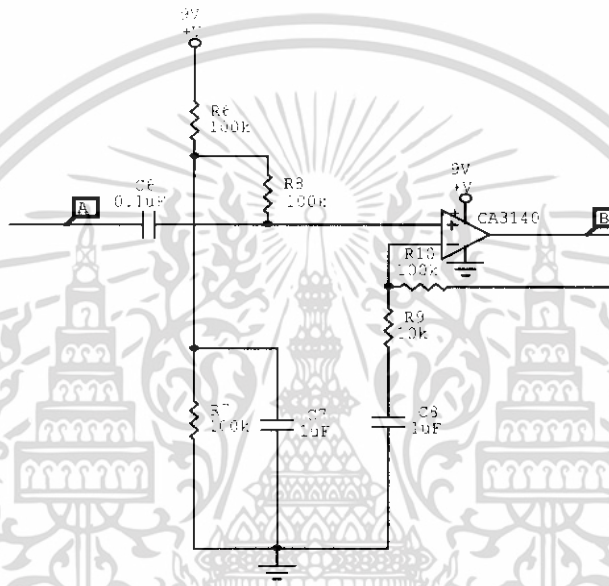
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_3}} \quad (3.1)$$

จากการคำนวณด้วยค่า L1 ที่ใช้ จะได้สัญญาณไซน์ที่มีความถี่ประมาณ 5.55 KHz จากนั้นขดลวดรับ L2 ที่อยู่ใกล้ ๆ จะถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กและผลิตสัญญาณไซน์ที่มีความถี่และเฟสใกล้เคียงค่าเดิมมาก แต่ขนาดแอมพลิจูดอาจลดลงไปบ้างเนื่องจากการสูญเสียในอากาศ ในวงจรยังมีกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงออกโดย C4 สำหรับไดโอด D1, D2 นั้น เป็นตัวช่วยรักษาระดับแรงดันให้คงที่ ส่วน C5 เป็นตัวป้อนกลับสัญญาณ เมื่อมีโลหะเข้าใกล้ขดลวด จะทำให้ขนาด

แอมพลิจูดของสัญญาณใน L2 เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากโลหะดูดซับสนามแม่เหล็กไว้ ซึ่งเรานำการเปลี่ยนแปลงนี้ไปตรวจจับเพื่อแสดงผลว่ามีโลหะอยู่ในบริเวณตรวจจับหรือไม่

3.2.1.2 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)

สำหรับวงจรถ่ายขยายนี้เราใช้แบบนอนอินเวอร์ทีทิง เพื่อทำการขยายสัญญาณที่รับมาจากในวงจรแรก ให้สัญญาณมีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ง่ายขึ้น โดยคำนวณอัตราขยายได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 วงจรขยายนอนอินเวอร์ทีทิง (Non-inverting)

จุด A คือจุดรับสัญญาณจากวงจรก่อนหน้า, จุด B คือจุดส่งต่อสัญญาณไปยังวงจรถัดไป

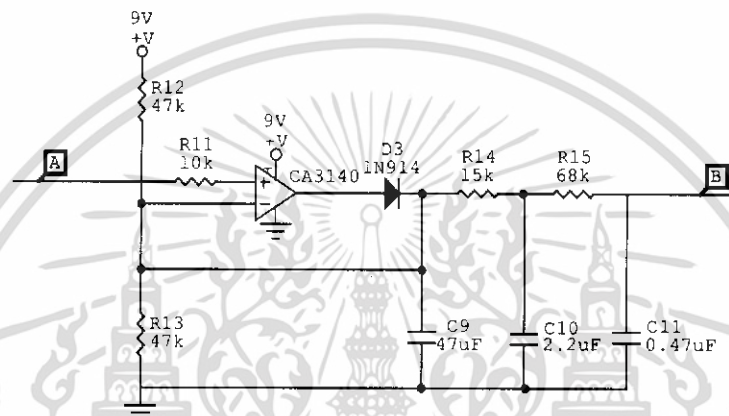
$$Gain = 1 + \frac{R_{10}}{R_9} \tag{3.2}$$

ในเครื่องตรวจจับโลหะชิ้นนี้ เราใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ 9 โวลต์ เพื่อความประหยัดและสะดวก ถึงแม้ว่าออปแอมป์ (op-amp) จะต้องการไฟเลี้ยงทั้งไฟบวกและไฟลบ แต่การสร้างให้ได้ทั้งไฟบวกไฟลบนี้ค่อนข้างสิ้นเปลืองแบตเตอรี่ เมื่อเป็นเช่นนี้แล้วออปแอมป์ จะไม่สามารถรับสัญญาณซิกกลับได้เนื่องจากจะถูกตัด (Cut-off) ที่แรงดันแหล่งจ่าย (supply) คือ 9 โวลต์ และ 0 โวลต์ ดังนั้นเพื่อให้ออปแอมป์รองรับสัญญาณได้ทั้งซิกบวกและลบ เราจึงใช้เทคนิคเพิ่มแรงดันออฟเซต (DC-Offset) เข้าช่วย เพื่อยกระดับสัญญาณและทำให้สัญญาณ

เพี้ยนน้อยที่สุด คือยกระดับอ้างอิง จาก 0 โวลต์ มาที่ 4.5 โวลต์ ดังนี้แล้วจะทำให้รับสัญญาณเข้ามาได้ทั้งหมดโดยไม่ถูกตัด

สัญญาณเมื่อผ่านวงจรขยายนี้แล้วจะมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีเกนคือ 11 เท่า ไม่กลับเฟส แล้วจึงถูกส่งต่อไปยังวงจรเรียงกระแสต่อไป

3.2.1.3 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

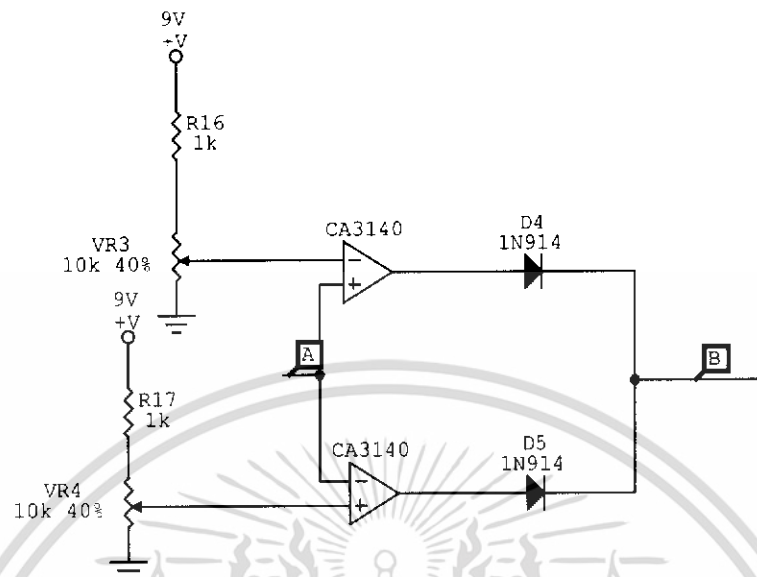


รูปที่ 3.4 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)

จุด A คือจุดรับสัญญาณจากวงจรก่อนหน้า, จุด B คือจุดส่งต่อสัญญาณไปยังวงจรถัดไป

หลังจากที่ทำการขยายสัญญาณแล้ว ก็จะนำมาเข้าวงจรเรียงกระแสเพื่อเปลี่ยนสัญญาณกระแสสลับให้เป็นสัญญาณกระแสตรง โดยในที่นี้วงจรเรียงกระแสแม่นยำ (Precision Half-wave Rectifier) โดยมี C9 มาคัปปลิ่งและ R14, R15, C10, C11 เป็นตัวกรองอันดับสอง เพื่อให้สัญญาณเรียบขึ้น แล้วจึงนำไปเข้าวงจรเปรียบเทียบแรงดันต่อไป

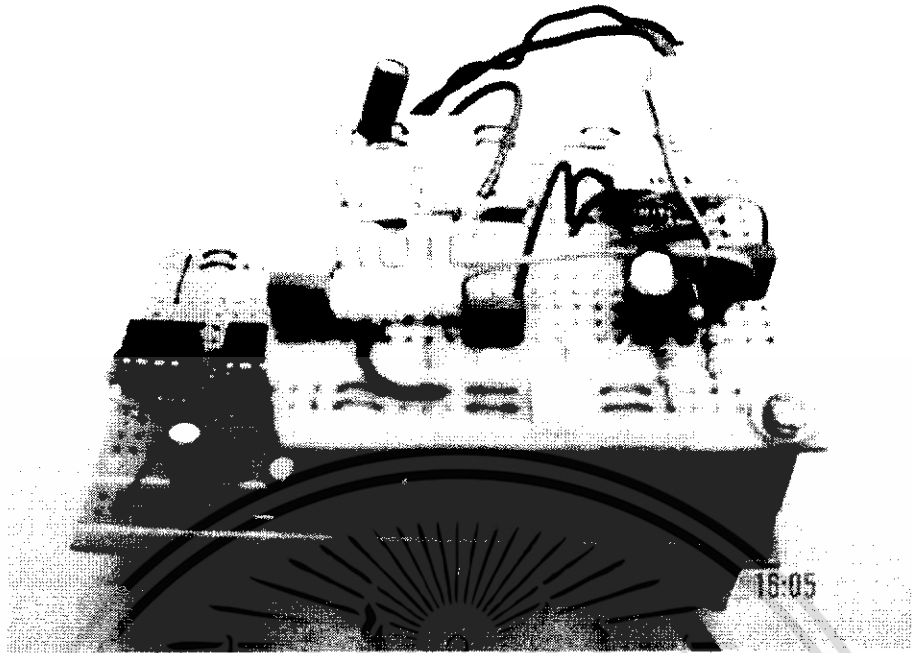
3.2.1.4 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Comparator)



รูปที่ 3.5 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน

จุด A คือจุดรับสัญญาณจากก่อนหน้า, จุด B คือจุดส่งต่อสัญญาณไปยังวงจรถัดไป

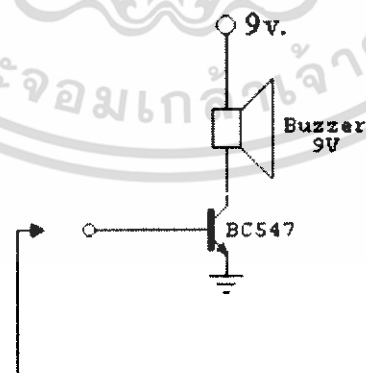
วงจรเปรียบเทียบแรงดันนี้มีไว้เพื่อการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ โดยขณะที่ไม่มีโลหะเข้าใกล้ ต้องปรับค่าแรงดันอ้างอิงที่ VR3, VR4 เพื่อมิให้มีเอาท์พุทเกิดขึ้น เมื่อโลหะเข้าใกล้ สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ก็จะสามารถตรวจจับได้ วงจรนี้จะป้องกันให้ค่าลอจิก 0 เมื่อสัญญาณอยู่ระหว่าง V_{low} - V_{high} คือไม่มีโลหะเข้าใกล้ นอกเหนือจากช่วงนี้จะให้ลอจิก 1 จากนั้นค่าลอจิก 0 และ 1 นี้จะนำไปเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประยุกต์ใช้งานต่อไป



รูปที่ 3.6 แผงวงจรตรวจจับโลหะ

3.2.2 ส่วนกำเนิดสัญญาณเตือน

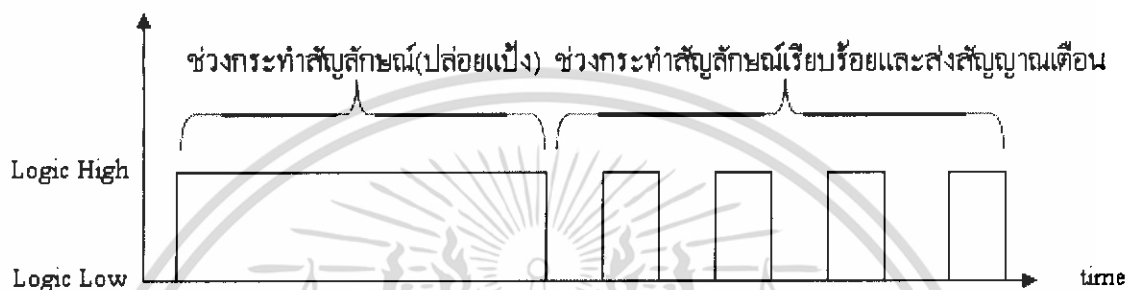
ส่วนกำเนิดสัญญาณเตือนนี้ จะทำงานเมื่อตรวจพบโลหะ โดยจะส่งเสียงยาวติดต่อกันตั้งแต่เริ่มตรวจพบโลหะ แล้วปล่อยแฉิ่งเพื่อกระทำสัญลักษณ์ และเมื่อกระทำสัญลักษณ์เรียบร้อยแล้ว จะส่งเสียงแบบติดดับสลับกันไปเพื่อให้ผู้ใช้งานทราบว่าได้กระทำสัญลักษณ์เสร็จเรียบร้อยแล้วพร้อมเคลื่อนที่เพื่อไปตรวจสอบบริเวณอื่นต่อไป



รับสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์

รูปที่ 3.7 วงจรสัญญาณเตือน

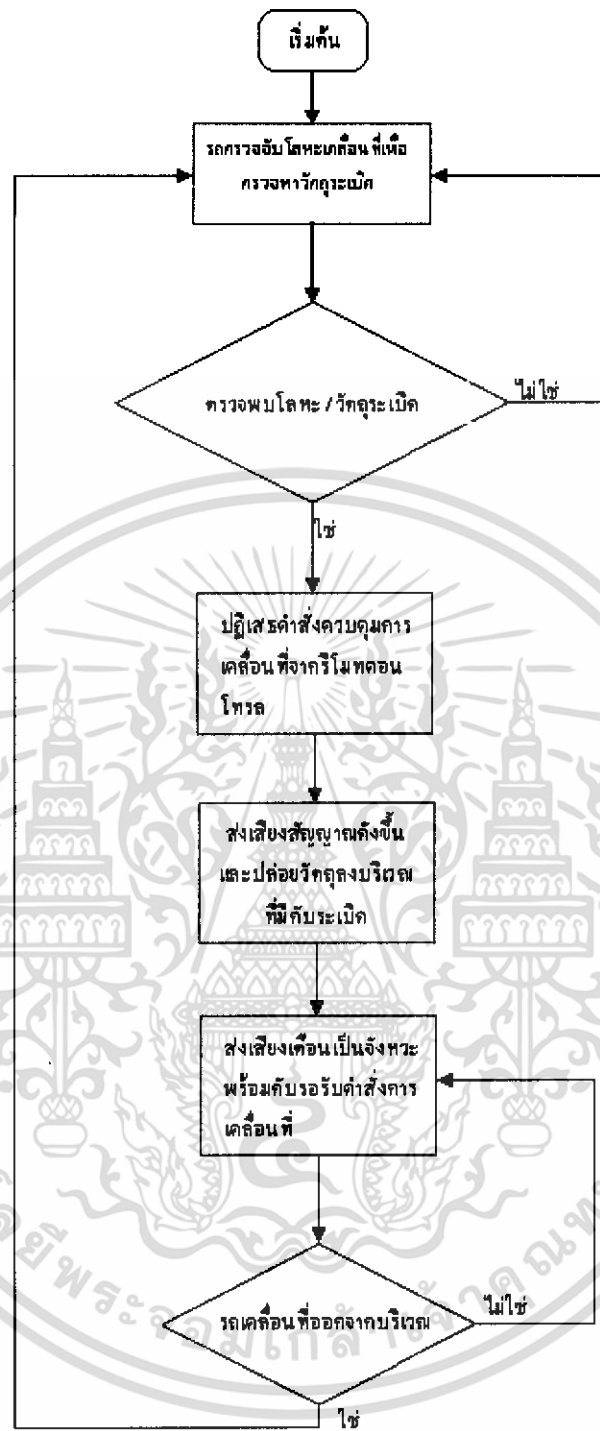
จากรูปวงจรสัญญาณเตือนจะเห็นว่าได้นำเอาทรานซิสเตอร์มาใช้เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อควบคุมการส่งสัญญาณเตือน โดยตั้งแต่ช่วงเริ่มตรวจพบโลหะ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งลอจิก 1 เข้าไปที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ ส่งผลให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสให้ไหลจากขาคอลเลกเตอร์ ไปยังอิมิตเตอร์ได้ ซึ่งก็จะทำให้บัซเซอร์ (buzzer) ทำงานและส่งเสียงยาวต่อเนื่อง เมื่อกระทำสัญลักษณ์เรียบร้อยแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณพัลส์เป็นจังหวะติดต่อกัน เพื่อเตือนให้ผู้ใช้งานทราบว่าได้กระทำสัญลักษณ์เรียบร้อยแล้วและให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอื่นต่อไป



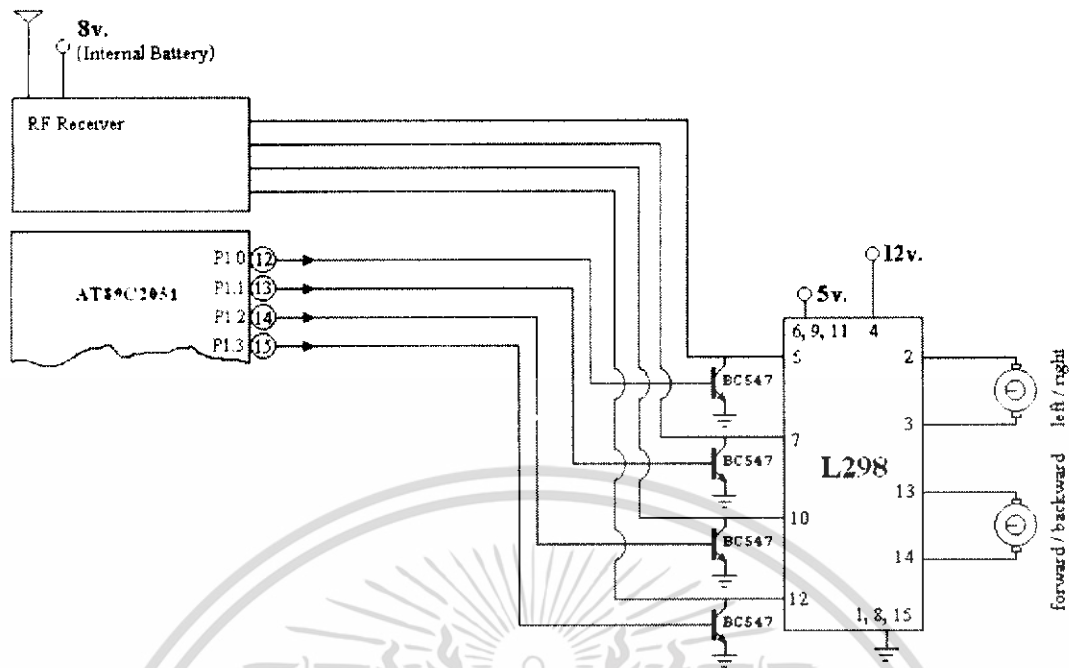
รูปที่ 3.8 สัญญาณควบคุมเสียงจากไมโครคอนโทรลเลอร์

3.2.3 ส่วนควบคุมและประมวลผล

ในที่นี้ได้นำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์มาเพื่อประมวลผลการทำงานเพื่อตัดสินใจอย่างอัตโนมัติเมื่อพบวัตถุโลหะหรือกับระเบิด โดยขั้นตอนการประมวลผลและตัดสินใจของไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นดังรูป

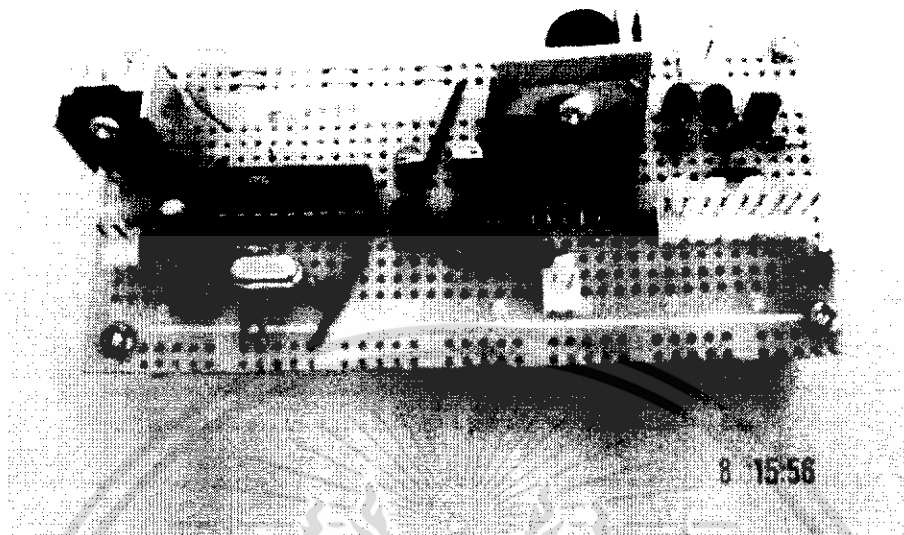


รูปที่ 3.9 แผนผังแสดงการทำงานและการตัดสินใจของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.10 วงจรควบคุมการหยุดรถ

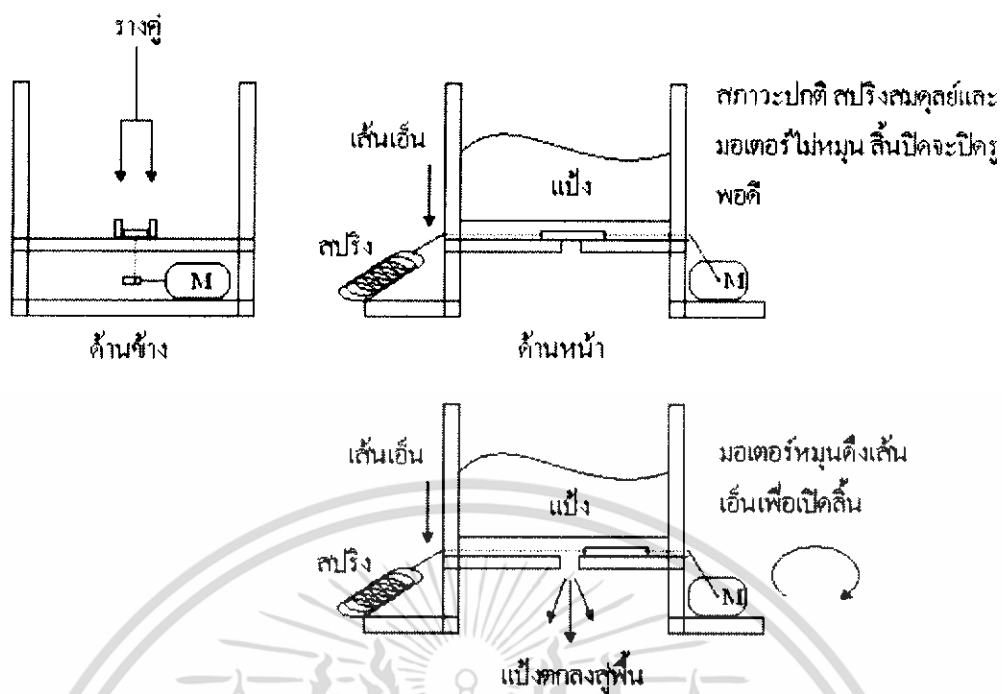
จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่ามีการนำทรานซิสเตอร์มาเป็นสวิตช์เพื่อใช้ตัดสัญญาณควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวโรบอท เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์มีคำสั่งให้รถหยุด จะส่งลอจิก 1 ออกไปทางพอร์ต 1.0 – 1.3 ทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสและลัดกระแสลงสู่กราวด์ ทำให้ไม่มีสัญญาณอินพุตไปยังมอเตอร์ไคร์ฟเวอร์ ทำให้มอเตอร์หยุดหมุน และเมื่อสิ้นสุดการกระทำสัญญาณแล้ว มอเตอร์จะส่งค่าลอจิก 0 ออกทางพอร์ตดังกล่าว ทำให้ทรานซิสเตอร์ไม่นำกระแส ส่งผลให้มอเตอร์ไคร์ฟเวอร์ได้รับลอจิก 1 จากตัวรับสัญญาณบังคับวิทยุ (RF Receiver)



รูปที่ 3.11 แผงวงจรควบคุม, วงจรกำเนิดสัญญาณเตือน, วงจรขับเคลื่อนและ
วงจรขับมอเตอร์(ปล่อยเบี่ยง)

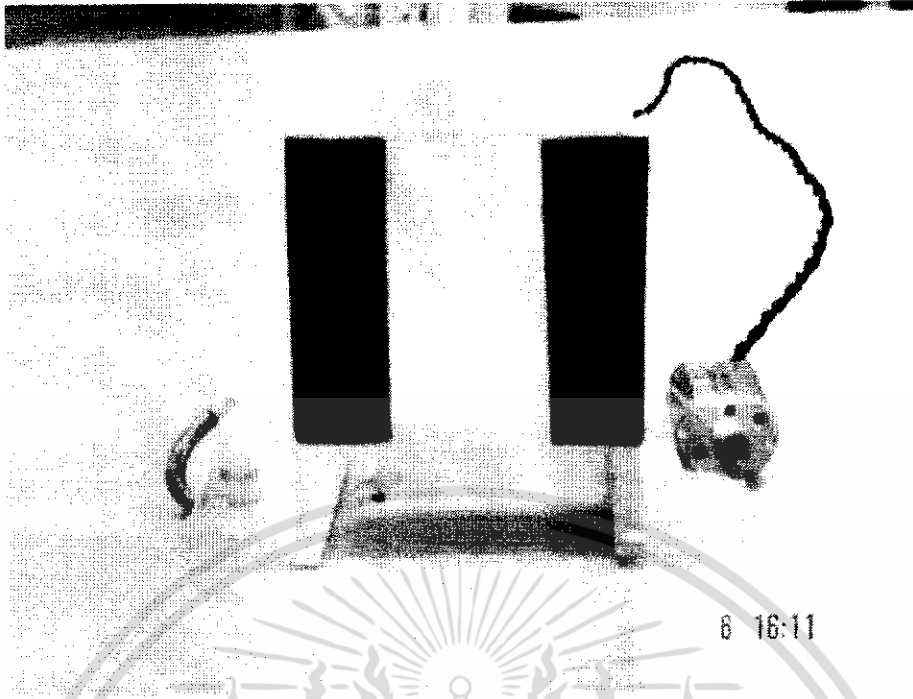
3.2.4 ส่วนกระทำสัญลักษณ์เมื่อตรวจพบโลหะ

ส่วนนี้จะติดอยู่ส่วนหน้าของตัวรถ เพราะต้องการให้อยู่ตำแหน่งใกล้เคียงกับขดลวดตรวจจับโลหะ เพื่อให้กระทำสัญลักษณ์ได้ใกล้เคียงกับตำแหน่งของโลหะที่ตรวจพบ โดยส่วนนี้จะทำจากแผ่นอะคริลิคตัดเป็นทรงสี่เหลี่ยมขนาดเล็กสำหรับใส่ผงแป้งในการทำสัญลักษณ์ ที่กันจะเจาะรูเป็นวงกลมแล้วปิดด้วยแผ่นอะคริลิคขนาดเล็กอีกแผ่น โดยแผ่นอะคริลิคแผ่นนี้ปลายด้านหนึ่งถูกตรึงกับสกรู ส่วนอีกด้านหนึ่งผูกติดกับมอเตอร์ โดยมีวิธีการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบส่วนปล่อยแป้แสดงตำแหน่งที่ตรวจพบโลหะ(ถ้าระเบิด)

สภาวะปกติสปริงสมดุลและมอเตอร์ยังไม่หมุน แผ่นอะคริลิกแผ่นเล็กจะปิดรูวงกลมพอดี แต่เมื่อตรวจพบโลหะจะทำให้มอเตอร์หมุนด้วยสัญญาณพัลส์ 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งที่มอเตอร์หมุนจะดึงเส้นเอ็นให้เปิดรูวงกลมชั่วขณะหนึ่งทำให้แป้หล่นลงมา แล้วแรงสปริงก็จะดึงเส้นเอ็นกลับไปปิดรูวงกลมตามเดิม ด้วยเหตุที่แป้เป็นวัตถุที่เป็นของแข็งและจับตัวเป็นก้อน การสั่งงานให้เปิดด้วยพัลส์ 3 ลูกกลิ้งนี้ จะช่วยให้แป้ร่วงหล่นได้อย่างสะดวกยิ่งขึ้น



6 16:11

รูปที่ 3.13 ชุดกระทำสัญลักษณ์ (ปล่อยแป้ง)



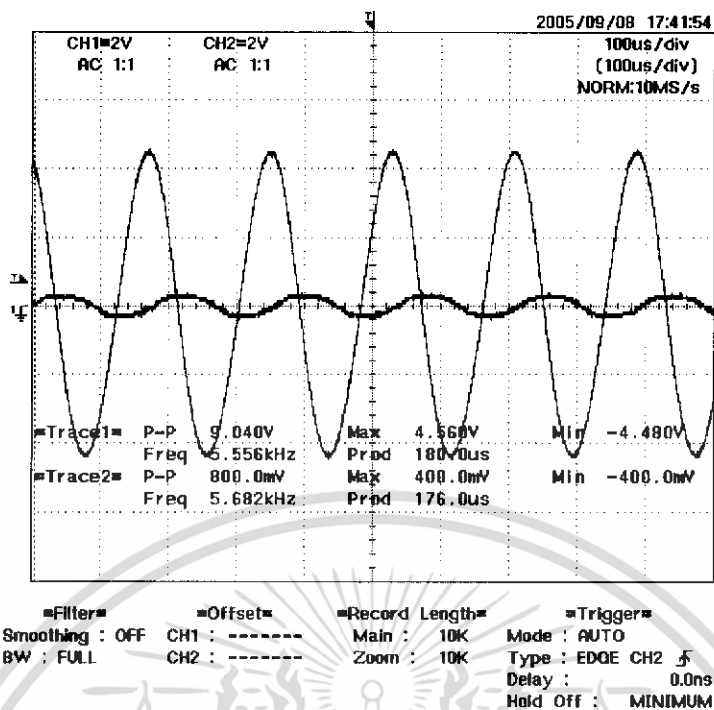
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในขั้นตอนการทดลองนี้ เราได้นำหุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิดมาตรวจสอบกับวัตถุโลหะชนิดต่าง ๆ กัน โดยการนำวัตถุนั้น ๆ เคลื่อนที่เข้าใกล้แล้วตรวจจับจนวงจรสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ ดังแสดงผลดังตารางนี้

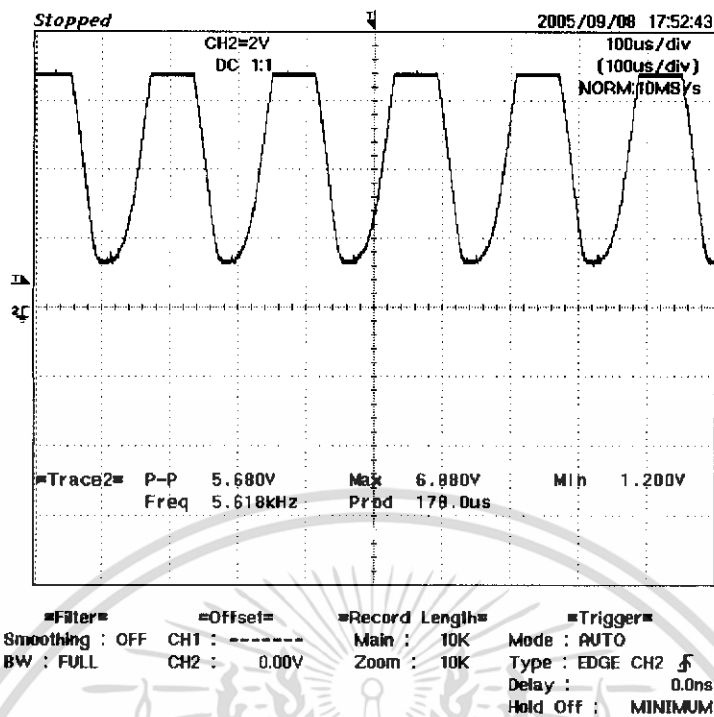
ตารางที่ 4.1 ระยะทางที่สามารถตรวจจับได้ของวัตถุโลหะแต่ละชนิดและขนาด

ชนิดโลหะ	ระยะที่ตรวจจับ (ซม.)
เหรียญ 5 บาท	7.25
เหรียญ 1 บาท	4.5
เหรียญ 50 สตางค์	4.1
แผ่นทองแดง (6 x 10 ตร.ซม.)	12
ก้อนเหล็กถ่วงน้ำหนัก (2 x 2 x 2 ลบ.ซม.)	13.5

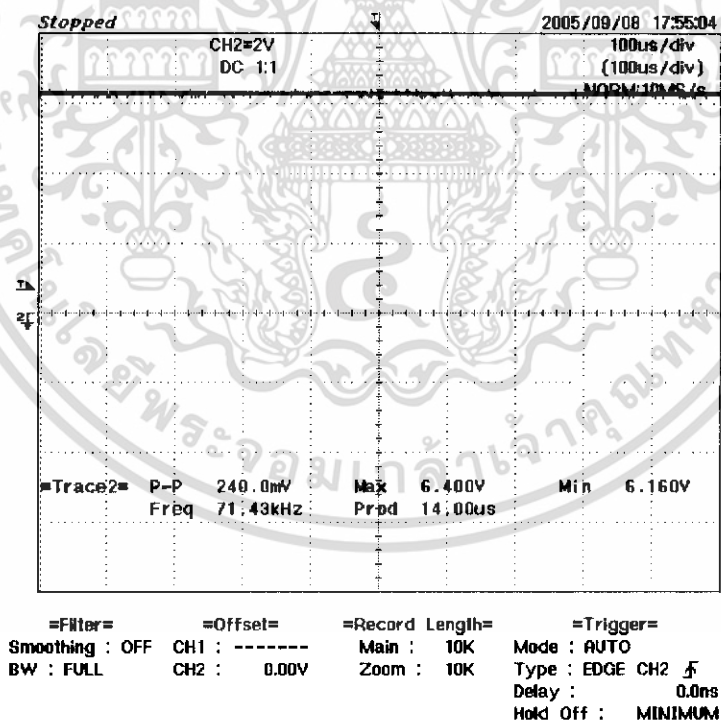


รูปที่ 4.1 รูปสัญญาณที่เกิดขึ้นที่ขดลวดชุดรับและชุดส่ง

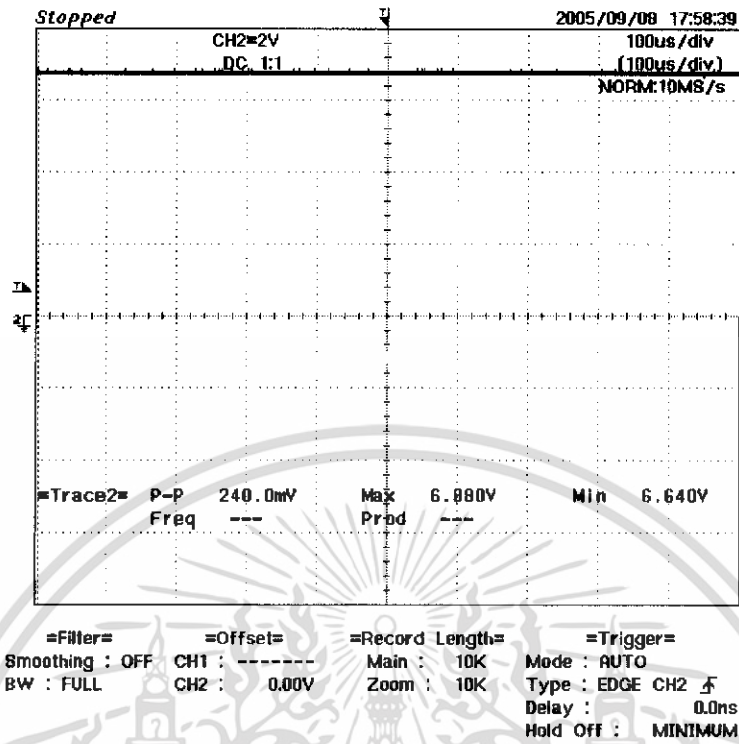
รูปสัญญาณดังรูปที่ 4.1 คือรูปสัญญาณไซน์ที่เกิดขึ้นที่ขดลวดชุดรับและชุดส่ง โดยสัญญาณ Trace 1 แสดงถึงสัญญาณที่ขดลวดชุดส่ง และ Trace 2 แสดงถึงสัญญาณที่ขดลวดชุดรับ ซึ่งมีแอมพลิจูดน้อยกว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นในขดลวดชุดส่งเนื่องจากเกิดการสูญเสียกำลังสัญญาณไปในอากาศ



รูปที่ 4.2 รูปสัญญาณจากขดลวดชุดรับที่ถูกขยายแล้ว



รูปที่ 4.3 รูปสัญญาณจากวงจรขยายที่ได้รับการเรียงกระแสแล้ว



รูปที่ 4.4 รูปสัญญาณจากวงจรเปรียบเทียบแรงดันหลังจากพบวัตถุโลหะ

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปัจจัยที่มีผลต่อความไวในการตรวจจับได้แก่

- ขนาดและชนิดของโลหะเนื่องจากมีผลในการรบกวนและเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก
- ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ขดส่ง อันเนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน หากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมาก ความเข้มสนามแม่เหล็กก็จะมากขึ้น แต่จะใช้กำลังไฟฟ้าสูงตามไปด้วย
- การจัดตำแหน่งขดลวดของขดส่งและขดรับ
- ความถี่ที่ใช้งานในลวดขดส่ง ยิ่งความถี่มากจะมีความไวในการตรวจจับมาก

5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ ผลที่ได้ไม่เป็นที่พอใจเท่าที่ควร เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัดอยู่บ้าง

5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการนี้

นอกเหนือจากประโยชน์ที่ได้จากการตรวจจับโลหะและชิ้นส่วนประกอบวัตถุระเบิดแล้ว ในขั้นตอนการศึกษาและทดลองนั้น ยังได้เพิ่มพูนความรู้ความเข้าใจแก่ผู้ทดลองอีกด้วย ทั้งในแง่ทฤษฎีที่ดี ในแง่การปฏิบัติที่ดี ซึ่งประสบการณ์และความเข้าใจต่าง ๆ เหล่านี้ จะได้นำไปใช้เป็นประสบการณ์ในการโครงการในลักษณะต่าง ๆ ต่อไป

5.4 ปัญหาที่พบในการทำโครงการนี้

ปัญหาที่สำคัญและพบบ่อยครั้ง คือ การจัดวางตำแหน่งของขดลวดขณะทำการทดลองบนโปรโตบอร์ด เนื่องจากหลุดเลื่อนได้ง่าย ทำให้การอ่านค่าเป็นไปได้ยาก อีกทั้งความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่เร็วเกินกว่าที่ส่วนตรวจจับจะตรวจจับได้ทัน

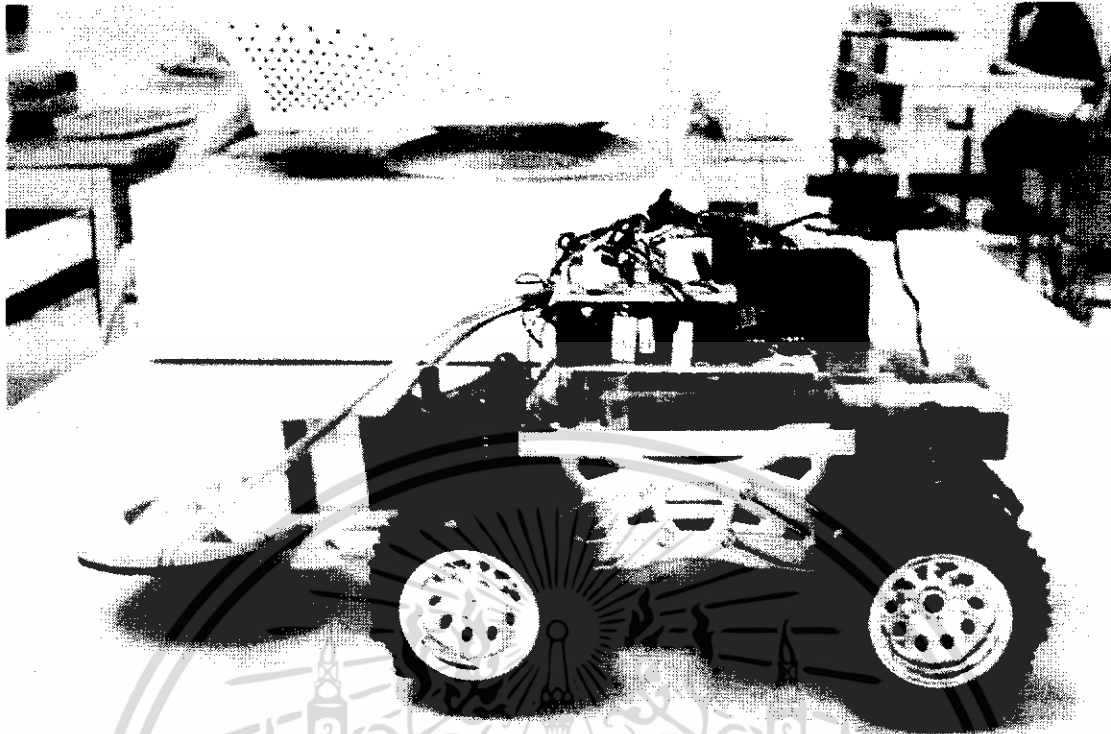
เอกสารอ้างอิง

- [1] บัณฑิต จามรภูติ. คู่มือการใช้งาน Protel 99. เชียงใหม่ : สำนักพิมพ์บัณฑิต. 2544.
- [2] สมยศ จุณณะปิยะ. การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์. พิมพ์ครั้งที่ 3.
กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543
- [3] กฤษณะ พรหมศรี, ฉัตรชัย สุขศรีเมือง. “การควบคุมหุ่นยนต์หลายตัว” วิทยานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2546.
- [4] คณากร จงบุญวัฒนา, สุทธิศักดิ์ สุริยะจันทร์หอม. “หุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิด” วิทยานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2542.
- [5] วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล. เรียนรู้และปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์
MCS-51 แบบแฟลช





ภาคผนวก ก



8 15:50

รูปหุ่นยนต์ตรวจจับกับระเบิดพร้อมใช้งาน





ภาคผนวก ข

โปรแกรมควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (ภาษาแอสเซมบลี)

```

SW1      EQU  P1.0
SW2      EQU  P1.1
SW3      EQU  P1.2
SW4      EQU  P1.3
SW5      EQU  P1.4
SWE      EQU  P1.5
DETECT   EQU  P3.4

ORG 0000H
MOV P3,#0FFH
MOV P1,#00H
MAIN: JNB  DETECT,$
      SETB SW1
      SETB SW2
      SETB SW3
      SETB SW4
      SETB SW5
      MOV  R1,#3
PD:   SETB SWE
      ACALL DELAY
      CLR  SWE
      ACALL DELAY
      DJNZ R1,PD
      CLR  SW1
      CLR  SW2
      CLR  SW3
      CLR  SW4
      CLR  SW5
CHE:  JNB  DETECT,MAIN
      SETB SW5
      ACALL DELAY
      CLR  SW5

```

ACALL DELAY

ACALL CHE

DELAY: MOV R6,#125

DELAY1: MOV R7,#200

DJNZ R7,\$

MOV R7,#200

DJNZ R7,\$

MOV R7,#200

DJNZ R7,\$

MOV R7,#200

DJNZ R7,\$

MOV R7,#200

DJNZ R7,\$

MOV R7,#200

DJNZ R7,\$

MOV R7,#200

DJNZ R7,\$

MOV R7,#200

DJNZ R7,\$

MOV R7,#200

DJNZ R7,\$

MOV R7,#200

DJNZ R7,\$

DJNZ R6,DELAY1

RET

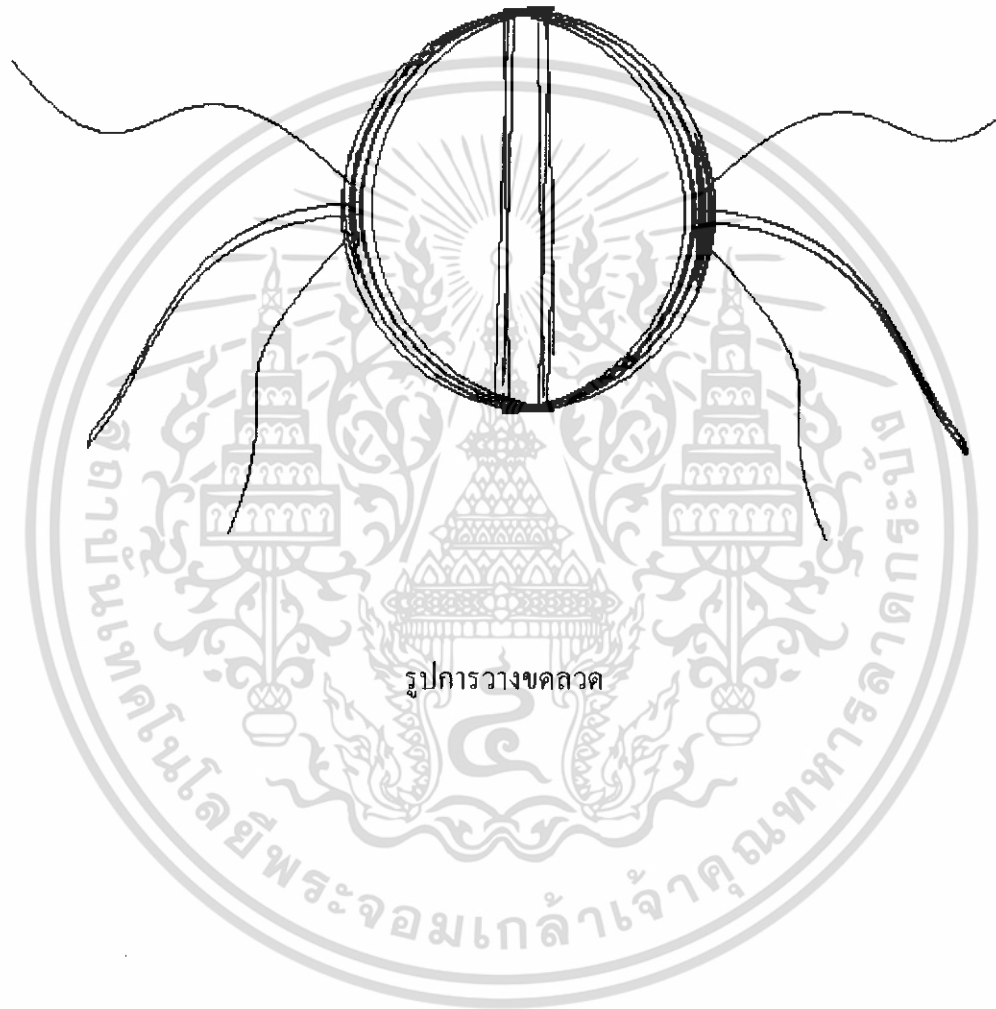
END

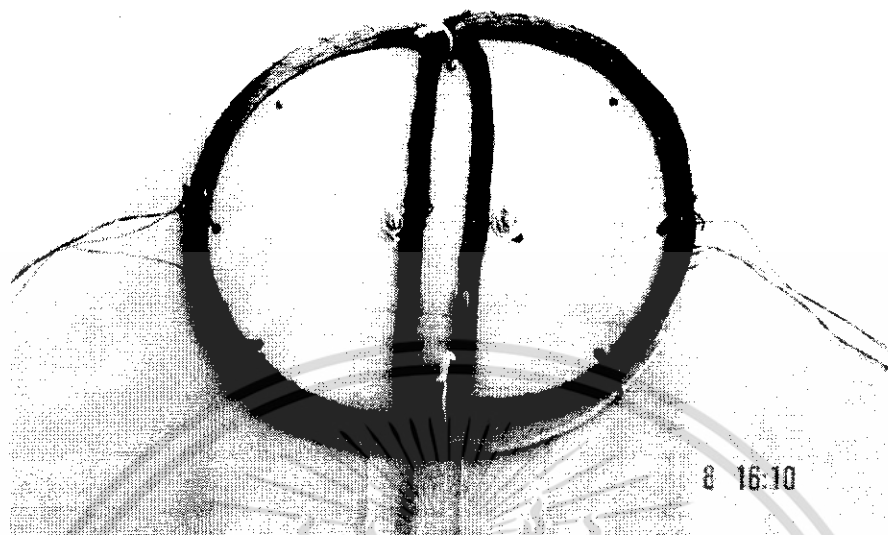


ภาคผนวก ค

การสร้างขดลวดตรวจจับ

ในที่นี้การสร้างขดลวดตรวจจับ จะสร้างโดยการนำลวดทองแดงขนาด 32 SWG มาพันเป็นวงกลมด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 นิ้ว พัน 75 รอบก่อน แล้วจึงแทปสายด้วยความยาวพอประมาณแล้วจึงพันต่อไปอีก 75 รอบ ทำเช่นนี้ 2 ชุด ก็จะได้ขดลวดชุดส่งและชุดรับ จากนั้นจึงนำขดลวดมาตัดให้เป็นรูปครึ่งวงกลม แล้วนำมาซ้อนกัน กระยะให้พอเหมาะ โดยดูจากรูปสัญลักษณ์ที่ได้





รูปคลวดตรวจจับ

การสร้างโรบอท (ส่วนตัวรถและส่วนบังคับวิทยุ)

ในขณะนี้คณะผู้จัดทำได้ไปหาซื้อชุดรถบังคับวิทยุเด็กเล่นมาโดยตรง โดยเลือกขนาดให้พอเหมาะ และตัวรถมีโครงสร้างแข็งแรงทนทาน และทดสอบระบบบังคับวิทยุให้ใช้งานได้ในระยะทางที่ต้องการ



ภาคผนวก ง

Features

Compatible with MCS-51™ Products
2K Bytes of Reprogrammable Flash Memory
– Endurance: 1,000 Write/Erase Cycles
2.7V to 6V Operating Range
Fully Static Operation: 0 Hz to 24 MHz
Two-level Program Memory Lock
128 x 8-bit Internal RAM
15 Programmable I/O Lines
Two 16-bit Timer/Counters
Six Interrupt Sources
Programmable Serial UART Channel
Direct LED Drive Outputs
On-chip Analog Comparator
Low-power Idle and Power-down Modes

Description

The AT89C2051 is a low-voltage, high-performance CMOS 8-bit microcomputer with 2K bytes of Flash programmable and erasable read only memory (PEROM). The device is manufactured using Atmel's high-density nonvolatile memory technology and is compatible with the industry-standard MCS-51 instruction set. By combining a versatile 8-bit CPU with Flash on a monolithic chip, the Atmel AT89C2051 is a powerful microcomputer which provides a highly-flexible and cost-effective solution to many embedded control applications.

The AT89C2051 provides the following standard features: 2K bytes of Flash, 128 bytes of RAM, 15 I/O lines, two 16-bit timer/counters, a five vector two-level interrupt architecture, a full duplex serial port, a precision analog comparator, on-chip oscillator and clock circuitry. In addition, the AT89C2051 is designed with static logic for operation down to zero frequency and supports two software selectable power saving modes. The Idle Mode stops the CPU while allowing the RAM, timer/counters, serial port and interrupt system to continue functioning. The power-down mode saves the RAM contents but freezes the oscillator disabling all other chip functions until the next hardware reset.

Pin Configuration

PDIP/SOIC

RST/VPP	1	20	VCC
(RXD) P3.0	2	19	P1.7
(TXD) P3.1	3	18	P1.6
XTAL2	4	17	P1.5
XTAL1	5	16	P1.4
(INT0) P3.2	6	15	P1.3
(INT1) P3.3	7	14	P1.2
(TO) P3.4	8	13	P1.1 (AIN1)
(T1) P3.5	9	12	P1.0 (AIN0)
GND	10	11	P3.7



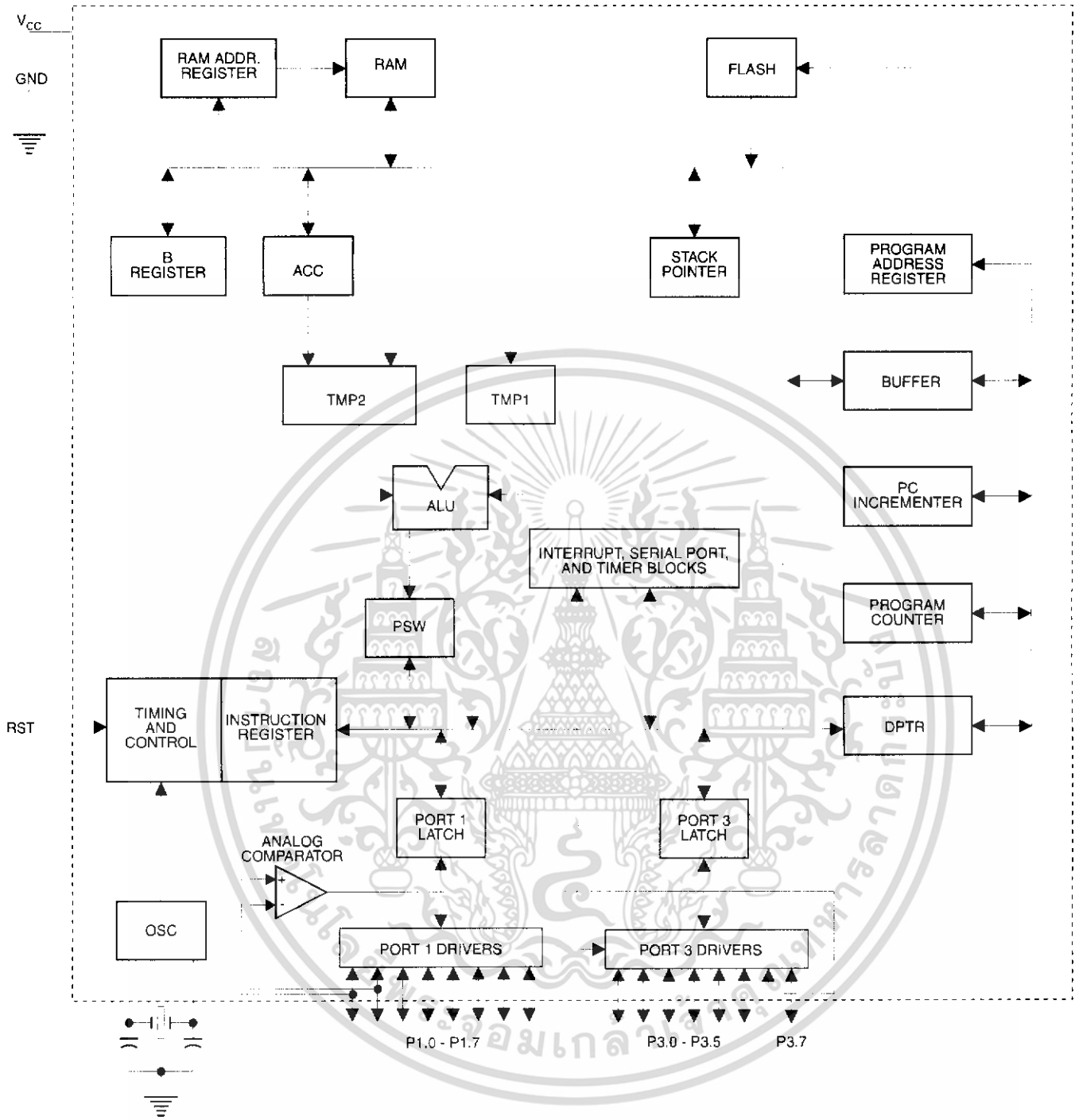
8-bit Microcontroller with 2K Bytes Flash

AT89C2051

Rev. 0368E-02/00



Block Diagram



In Description

CC

Supply voltage.

ND

Ground.

Port 1

Port 1 is an 8-bit bi-directional I/O port. Port pins P1.2 to P1.7 provide internal pullups. P1.0 and P1.1 require external pullups. P1.0 and P1.1 also serve as the positive input (IN0) and the negative input (AIN1), respectively, of the on-chip precision analog comparator. The Port 1 output buffers can sink 20 mA and can drive LED displays directly. When 1s are written to Port 1 pins, they can be used as outputs. When pins P1.2 to P1.7 are used as inputs and are internally pulled low, they will source current (I_{IL}) because of the internal pullups.

Port 1 also receives code data during Flash programming and verification.

Port 3

Port 3 pins P3.0 to P3.5, P3.7 are seven bi-directional I/O pins with internal pullups. P3.6 is hard-wired as an input to the output of the on-chip comparator and is not accessible as a general purpose I/O pin. The Port 3 output buffers can sink 20 mA. When 1s are written to Port 3 pins they are pulled high by the internal pullups and can be used as outputs. As inputs, Port 3 pins that are externally being pulled low will source current (I_{IL}) because of the pullups.

Port 3 also serves the functions of various special features of the AT89C2051 as listed below:

Port Pin	Alternate Functions
P3.0	RXD (serial input port)
P3.1	TXD (serial output port)
P3.2	$\overline{INT0}$ (external interrupt 0)
P3.3	$\overline{INT1}$ (external interrupt 1)
P3.4	T0 (timer 0 external input)
P3.5	T1 (timer 1 external input)

Port 3 also receives some control signals for Flash programming and verification.

RST

Reset input. All I/O pins are reset to 1s as soon as RST goes high. Holding the RST pin high for two machine cycles while the oscillator is running resets the device.

Each machine cycle takes 12 oscillator or clock cycles.

XTAL1

Input to the inverting oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

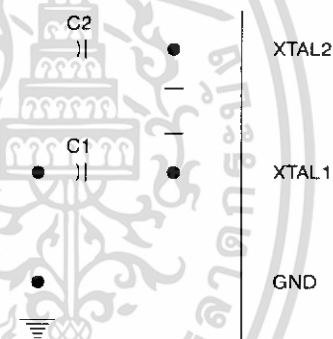
XTAL2

Output from the inverting oscillator amplifier.

Oscillator Characteristics

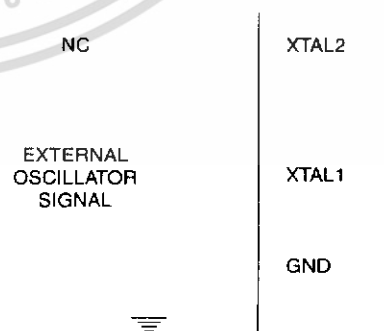
XTAL1 and XTAL2 are the input and output, respectively, of an inverting amplifier which can be configured for use as an on-chip oscillator, as shown in Figure 1. Either a quartz crystal or ceramic resonator may be used. To drive the device from an external clock source, XTAL2 should be left unconnected while XTAL1 is driven as shown in Figure 2. There are no requirements on the duty cycle of the external clock signal, since the input to the internal clocking circuitry is through a divide-by-two flip-flop, but minimum and maximum voltage high and low time specifications must be observed.

Figure 1. Oscillator Connections



Note: C1, C2 = 30 pF ± 10 pF for Crystals
= 40 pF ± 10 pF for Ceramic Resonators

Figure 2. External Clock Drive Configuration



4.5MHz, BiMOS Operational Amplifier with MOSFET Input/Bipolar Output

The CA3140A and CA3140 are integrated circuit operational amplifiers that combine the advantages of high voltage PMOS transistors with high voltage bipolar transistors on a single monolithic chip.

The CA3140A and CA3140 BiMOS operational amplifiers feature gate protected MOSFET (PMOS) transistors in the input circuit to provide very high input impedance, very low input current, and high speed performance. The CA3140A and CA3140 operate at supply voltage from 4V to 36V (either single or dual supply). These operational amplifiers are internally phase compensated to achieve stable operation in unity gain follower operation, and additionally, have access terminal for a supplementary external capacitor if additional frequency roll-off is desired. Terminals are also provided for use in applications requiring input offset voltage nulling. The use of PMOS field effect transistors in the input stage results in common mode input voltage capability down to 0.5V below the negative supply terminal, an important attribute for single supply applications. The output stage uses bipolar transistors and includes built-in protection against damage from load terminal short circuiting to either supply rail or to ground.

The CA3140A and CA3140 are intended for operation at supply voltages up to 36V ($\pm 18V$).

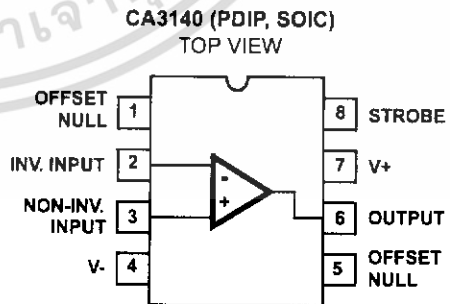
Features

- MOSFET Input Stage
 - Very High Input Impedance (Z_{IN}) -1.5T Ω (Typ)
 - Very Low Input Current (I_I) -10pA (Typ) at $\pm 15V$
 - Wide Common Mode Input Voltage Range (V_{ICR}) - Can be Swung 0.5V Below Negative Supply Voltage Rail
 - Output Swing Complements Input Common Mode Range
- Directly Replaces Industry Type 741 in Most Applications
- Pb-Free Plus Anneal Available (RoHS Compliant)

Applications

- Ground-Referenced Single Supply Amplifiers in Automobile and Portable Instrumentation
- Sample and Hold Amplifiers
- Long Duration Timers/Multivibrators (μ seconds-Minutes-Hours)
- Photocurrent Instrumentation
- Peak Detectors
- Active Filters
- Comparators
- Interface in 5V TTL Systems and Other Low Supply Voltage Systems
- All Standard Operational Amplifier Applications
- Function Generators
- Tone Controls
- Power Supplies
- Portable Instruments
- Intrusion Alarm Systems

Pinout



CA3140, CA3140A

Absolute Maximum Ratings

DC Supply Voltage (Between V+ and V- Terminals)	36V
Differential Mode Input Voltage	8V
DC Input Voltage	(V+ +8V) To (V- -0.5V)
Input Terminal Current	1mA
Output Short Circuit Duration [∞] (Note 2)	Indefinite

Operating Conditions

Temperature Range	-55°C to 125°C
-------------------	----------------

Thermal Information

Thermal Resistance (Typical, Note 1)	θ_{JA} (°C/W)	θ_{JC} (°C/W)
PDIP Package*	115	N/A
SOIC Package	165	N/A
Maximum Junction Temperature (Plastic Package)	150°C	
Maximum Storage Temperature Range	-65°C to 150°C	
Maximum Lead Temperature (Soldering 10s)	300°C (SOIC - Lead Tips Only)	

*Pb-free PDIPs can be used for through hole wave solder processing only. They are not intended for use in Reflow solder processing applications.

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTES:

- θ_{JA} is measured with the component mounted on a low effective thermal conductivity test board in free air. See Tech Brief TB379 for details
- Short circuit may be applied to ground or to either supply.

Electrical Specifications $V_{SUPPLY} = \pm 15V, T_A = 25^\circ C$

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	TYPICAL VALUES			
			CA3140	CA3140A	UNITS	
Input Offset Voltage Adjustment Resistor		Typical Value of Resistor Between Terminals 4 and 5 or 4 and 1 to Adjust Max V_{IO}	4.7	18	k Ω	
Input Resistance	R_I		1.5	1.5	T Ω	
Input Capacitance	C_I		4	4	pF	
Output Resistance	R_O		60	60	Ω	
Equivalent Wideband Input Noise Voltage (See Figure 27)	e_N	BW = 140kHz, $R_S = 1M\Omega$	48	48	μV	
Equivalent Input Noise Voltage (See Figure 35)	e_N	$R_S = 100\Omega$	$f = 1kHz$	40	40	nV/ \sqrt{Hz}
			$f = 10kHz$	12	12	nV/ \sqrt{Hz}
Short Circuit Current to Opposite Supply	I_{OM}^+	Source	40	40	mA	
	I_{OM}^-	Sink	18	18	mA	
Gain-Bandwidth Product, (See Figures 6, 30)	f_T		4.5	4.5	MHz	
Slew Rate, (See Figure 31)	SR		9	9	V/ μs	
Sink Current From Terminal 8 To Terminal 4 to Swing Output Low			220	220	μA	
Transient Response (See Figure 28)	t_r	$R_L = 2k\Omega$ $C_L = 100pF$	Rise Time	0.08	0.08	μs
	OS		Overshoot	10	10	%
Settling Time at 10V _{p-p} , (See Figure 5)	t_s	$R_L = 2k\Omega$ $C_L = 100pF$	To 1mV	4.5	4.5	μs
			Voltage Follower To 10mV	1.4	1.4	μs

Electrical Specifications For Equipment Design, at $V_{SUPPLY} = \pm 15V, T_A = 25^\circ C$, Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	CA3140			CA3140A			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	$ V_{IO} $	-	5	15	-	2	5	mV
Input Offset Current	$ I_{IO} $	-	0.5	30	-	0.5	20	pA
Input Current	I_I	-	10	50	-	10	40	pA

CA3140, CA3140A

Electrical Specifications For Equipment Design, at $V_{SUPPLY} = \pm 15V$, $T_A = 25^\circ C$, Unless Otherwise Specified (Continued)

PARAMETER	SYMBOL	CA3140			CA3140A			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Large Signal Voltage Gain (Note 3) (See Figures 6, 29)	A _{OL}	20	100	-	20	100	-	kV/V
		86	100	-	86	100	-	dB
Common Mode Rejection Ratio (See Figure 34)	CMRR	-	32	320	-	32	320	$\mu V/V$
		70	90	-	70	90	-	dB
Common Mode Input Voltage Range (See Figure 8)	V _{ICR}	-15	-15.5 to +12.5	11	-15	-15.5 to +12.5	12	V
Power-Supply Rejection Ratio, $\Delta V_{IO}/\Delta V_S$ (See Figure 36)	PSRR	-	100	150	-	100	150	$\mu V/V$
		76	80	-	76	80	-	dB
Max Output Voltage (Note 4) (See Figures 2, 8)	V _{OM+}	+12	13	-	+12	13	-	V
	V _{OM-}	-14	-14.4	-	-14	-14.4	-	V
Supply Current (See Figure 32)	I ₊	-	4	6	-	4	6	mA
Device Dissipation	P _D	-	120	180	-	120	180	mW
Input Offset Voltage Temperature Drift	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	-	8	-	-	6	-	$\mu V/^\circ C$

NOTES:

3. At $V_O = 26V_{P-P}$, +12V, -14V and $R_L = 2k\Omega$.
4. At $R_L = 2k\Omega$.

Electrical Specifications For Design Guidance At $V_+ = 5V$, $V_- = 0V$, $T_A = 25^\circ C$

PARAMETER	SYMBOL	TYPICAL VALUES		UNITS	
		CA3140	CA3140A		
Input Offset Voltage	V_{IO}	5	2	mV	
Input Offset Current	I_{IO}	0.1	0.1	pA	
Input Current	I_i	2	2	pA	
Input Resistance	R_i	1	1	T Ω	
Large Signal Voltage Gain (See Figures 6, 29)	A _{OL}	100	100	kV/V	
		100	100	dB	
Common Mode Rejection Ratio	CMRR	32	32	$\mu V/V$	
		90	90	dB	
Common Mode Input Voltage Range (See Figure 8)	V _{ICR}	-0.5	-0.5	V	
		2.6	2.6	V	
Power Supply Rejection Ratio	PSRR $\Delta V_{IO}/\Delta V_S$	100	100	$\mu V/V$	
		80	80	dB	
Maximum Output Voltage (See Figures 2, 8)	V _{OM+}	3	3	V	
	V _{OM-}	0.13	0.13	V	
Maximum Output Current:	Source	I _{OM+}	10	10	mA
	Sink	I _{OM-}	1	1	mA
Slew Rate (See Figure 31)	SR	7	7	V/ μs	
Gain-Bandwidth Product (See Figure 30)	f _T	3.7	3.7	MHz	
Supply Current (See Figure 32)	I ₊	1.6	1.6	mA	
Device Dissipation	P _D	8	8	mW	
Sink Current from Terminal 8 to Terminal 4 to Swing Output Low			200	200	μA

High-speed diodes

1N4148; 1N4448

FEATURES

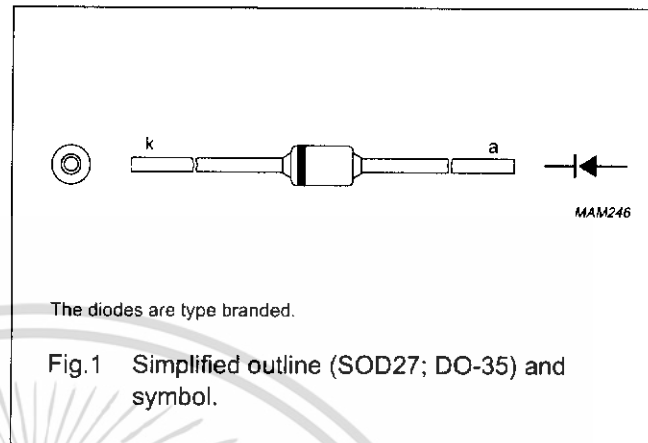
- Hermetically sealed leaded glass SOD27 (DO-35) package
- High switching speed: max. 4 ns
- General application
- Continuous reverse voltage: max. 100 V
- Repetitive peak reverse voltage: max. 100 V
- Repetitive peak forward current: max. 450 mA.

APPLICATIONS

- High-speed switching.

DESCRIPTION

The 1N4148 and 1N4448 are high-speed switching diodes fabricated in planar technology, and encapsulated in hermetically sealed leaded glass SOD27 (DO-35) packages.



MARKING

TYPE NUMBER	MARKING CODE
1N4148	1N4148PH or 4148PH
1N4448	1N4448

ORDERING INFORMATION

TYPE NUMBER	PACKAGE		
	NAME	DESCRIPTION	VERSION
1N4148	-	hermetically sealed glass package; axial leaded; 2 leads	SOD27
1N4448			

High-speed diodes

1N4148; 1N4448

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 60134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{RRM}	repetitive peak reverse voltage		–	100	V
V_R	continuous reverse voltage		–	100	V
I_F	continuous forward current	see Fig.2; note 1	–	200	mA
I_{FRM}	repetitive peak forward current		–	450	mA
I_{FSM}	non-repetitive peak forward current	square wave; $T_j = 25\text{ °C}$ prior to surge; see Fig.4			
		$t = 1\ \mu\text{s}$	–	4	A
		$t = 1\ \text{ms}$	–	1	A
		$t = 1\ \text{s}$	–	0.5	A
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} = 25\text{ °C}$; note 1	–	500	mW
T_{stg}	storage temperature		–65	+200	°C
T_j	junction temperature		–	200	°C

Note

1. Device mounted on an FR4 printed-circuit board; lead length 10 mm.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

 $T_j = 25\text{ °C}$ unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_F	forward voltage	see Fig.3			
	1N4148	$I_F = 10\ \text{mA}$	–	1	V
	1N4448	$I_F = 5\ \text{mA}$	0.62	0.72	V
		$I_F = 100\ \text{mA}$	–	1	V
I_R	reverse current	$V_R = 20\ \text{V}$; see Fig.5		25	nA
		$V_R = 20\ \text{V}$; $T_j = 150\text{ °C}$; see Fig.5	–	50	μA
I_R	reverse current; 1N4448	$V_R = 20\ \text{V}$; $T_j = 100\text{ °C}$; see Fig.5	–	3	μA
C_d	diode capacitance	$f = 1\ \text{MHz}$; $V_R = 0\ \text{V}$; see Fig.6	–	4	pF
t_{rr}	reverse recovery time	when switched from $I_F = 10\ \text{mA}$ to $I_R = 60\ \text{mA}$; $R_L = 100\ \Omega$; measured at $I_R = 1\ \text{mA}$; see Fig.7	–	4	ns
V_{fr}	forward recovery voltage	when switched from $I_F = 50\ \text{mA}$; $t_r = 20\ \text{ns}$; see Fig.8	–	2.5	V

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th(j-tp)}$	thermal resistance from junction to tie-point	lead length 10 mm	240	K/W
$R_{th(j-a)}$	thermal resistance from junction to ambient	lead length 10 mm; note 1	350	K/W

Note

1. Device mounted on a printed-circuit board without metallization pad.

BC214L

BC214L

PNP General Purpose Amplifier

- This device is designed for use as general purpose amplifiers and switches requiring collector currents to 300mA.
- Sourced from process 68.

1 TO-92
1. Emitter 2. Collector 3. Base

Absolute Maximum Ratings* $T_a=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage	-30	V
V_{CBO}	Collector-Base Voltage	-45	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	-5.0	V
I_C	Collector Current (DC) - Continuous	-500	mA
T_J, T_{STG}	Operating and Storage Junction Temperature Range	-55 ~ 150	$^\circ\text{C}$

* These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

NOTES:

- 1) These ratings are based on a maximum junction temperature of 150 degrees C.
- 2) These are steady state limits. The factory should be consulted on applications involving pulsed or low duty cycle operations.

Electrical Characteristics $T_a=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
Off Characteristics					
$V_{(BR)CEO}$	Collector-Emitter Voltage	$I_C = -2\text{mA}, I_B = 0$	-30		V
$V_{(BR)CBO}$	Collector-Base Voltage	$I_C = -10\mu\text{A}, I_E = 0$	-45		V
$V_{(BR)EBO}$	Emitter-Base Voltage	$I_E = -10\mu\text{A}, I_C = 0$	-5.0		V
I_{CBO}	Collector Cut-off Current	$V_{CB} = -30\text{V}, I_E = 0$		-15	nA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	$V_{EB} = -4\text{V}, I_C = 0$		-15	nA
On Characteristics *					
h_{FE}	DC Current Gain	$V_{CE} = -5\text{V}, I_C = -10\mu\text{A}$ $V_{CE} = -5\text{V}, I_C = -2\text{mA}$ $V_{CE} = -5\text{V}, I_C = -100\text{mA}$	100 140 120	400	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = -10\text{mA}, I_B = -0.5\text{mA}$ $I_C = -100\text{mA}, I_B = -5\text{mA}$		-0.25 -0.6	V
$V_{BE(sat)}$	Base-Emitter Saturation Voltage	$I_C = -100\text{mA}, I_B = -5\text{mA}$		-1.1	V
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE} = -5\text{V}, I_C = -2\text{mA}$	-0.6	-0.72	V
Small Signal Characteristics					
f_T	Current gain Bandwidth Product	$V_{CE} = -5\text{V}, I_C = -10\text{mA}$ $f = 100\text{MHz}$	200		MHz
NF	Noise Figure	$V_{CE} = -5\text{V}, I_C = -200\mu\text{A}$ $R_G = 2\text{k}\Omega, f = 15.7\text{KHz}$		2.0	dB
h_{fe}	Small Signal Current Gain	$I_C = -2\text{mA}, V_{CE} = -5\text{V}$ $f = 1\text{KHz}$	140		
C_{OB}	Output Capacitance	$V_{CB} = -10\text{V}, f = 1\text{MHz}$		10	pF

* Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2.0\%$

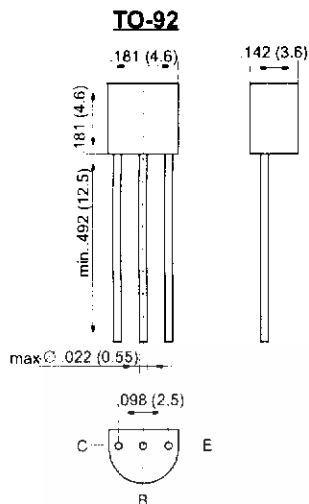
Thermal Characteristics $T_A=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Max.	Units
P_D	Total Device Dissipation	625	mW
	Derate above 25°C	5.0	mW/ $^\circ\text{C}$
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance, Junction to Case	83.3	$^\circ\text{C/W}$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	200	$^\circ\text{C/W}$



BC546 THRU BC549

Small Signal Transistors (NPN)



Dimensions in inches and (millimeters)

FEATURES

- ◆ NPN Silicon Epitaxial Planar Transistors
- ◆ These transistors are subdivided into three groups A, B and C according to their current gain. The type BC546 is available in groups A and B, however, the types BC547 and BC548 can be supplied in all three groups. The BC549 is a low-noise type and available in groups B and C. As complementary types, the PNP transistors BC556 ... BC559 are recommended.
- ◆ On special request, these transistors are also manufactured in the pin configuration TO-18.

MECHANICAL DATA

Case: TO-92 Plastic Package

Weight: approx. 0.18 g

MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Values at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified

		Symbol	Value	Unit
Collector-Base Voltage	BC546	V_{CBO}	80	V
	BC547	V_{CBO}	50	V
	BC548, BC549	V_{CBO}	30	V
Collector-Emitter Voltage	BC546	V_{CES}	80	V
	BC547	V_{CES}	50	V
	BC548, BC549	V_{CES}	30	V
Collector-Emitter Voltage	BC546	V_{CEO}	65	V
	BC547	V_{CEO}	45	V
	BC548, BC549	V_{CEO}	30	V
Emitter-Base Voltage	BC546, BC547	V_{EBO}	6	V
	BC548, BC549	V_{EBO}	5	V
Collector Current		I_C	100	mA
Peak Collector Current		I_{CM}	200	mA
Peak Base Current		I_{BM}	200	mA
Peak Emitter Current		$-I_{EM}$	200	mA
Power Dissipation at $T_{amb} = 25\text{ °C}$		P_{tot}	500 ¹⁾	mW
Junction Temperature		T_j	150	°C
Storage Temperature Range		T_s	-65 to +150	°C

¹⁾ Valid provided that leads are kept at ambient temperature at a distance of 2 mm from case

BC546 THRU BC549

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

		Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	
h-Parameters at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 2\text{ mA}$, $f = 1\text{ kHz}$, Small Signal Current Gain							
	Current Gain Group	A	h_{fe}	220	—	—	
		B	h_{fe}	330	—	—	
		C	h_{fe}	600	—	—	
Input Impedance	Current Gain Group	A	h_{ie}	1.6	2.7	4.5	$k\Omega$
		B	h_{ie}	3.2	4.5	8.5	$k\Omega$
		C	h_{ie}	6	8.7	15	$k\Omega$
Output Admittance	Current Gain Group	A	h_{oe}	—	18	30	μS
		B	h_{oe}	—	30	60	μS
		C	h_{oe}	—	60	110	μS
Reverse Voltage Transfer Ratio							
	Current Gain Group	A	h_{re}	—	$1.5 \cdot 10^{-4}$	—	—
		B	h_{re}	—	$2 \cdot 10^{-4}$	—	—
		C	h_{re}	—	$3 \cdot 10^{-4}$	—	—
DC Current Gain							
at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 10\mu A$	Current Gain Group	A	h_{FE}	—	90	—	—
		B	h_{FE}	—	150	—	—
		C	h_{FE}	—	270	—	—
at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 2\text{ mA}$	Current Gain Group	A	h_{FE}	110	180	220	—
		B	h_{FE}	200	290	450	—
		C	h_{FE}	420	500	800	—
at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 100\text{ mA}$	Current Gain Group	A	h_{FE}	—	120	—	—
		B	h_{FE}	—	200	—	—
		C	h_{FE}	—	400	—	—
Thermal Resistance Junction to Ambient Air		R_{thJA}	—	—	250 ¹⁾	K/W	
Collector Saturation Voltage		V_{CEsat}	—	80	200	mV	
at $I_C = 10\text{ mA}$, $I_B = 0.5\text{ mA}$		V_{CEsat}	—	200	600	mV	
at $I_C = 100\text{ mA}$, $I_B = 5\text{ mA}$							
Base Saturation Voltage		V_{BEsat}	—	700	—	mV	
at $I_C = 10\text{ mA}$, $I_B = 0.5\text{ mA}$		V_{BEsat}	—	900	—	mV	
at $I_C = 100\text{ mA}$, $I_B = 5\text{ mA}$							
Base-Emitter Voltage		V_{BE}	580	660	700	mV	
at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 2\text{ mA}$		V_{BE}	—	—	720	mV	
at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 10\text{ mA}$							
Collector-Emitter Cutoff Current		I_{CES}	—	0.2	15	nA	
at $V_{CE} = 80\text{ V}$	BC546	I_{CES}	—	0.2	15	nA	
at $V_{CE} = 50\text{ V}$	BC547	I_{CES}	—	0.2	15	nA	
at $V_{CE} = 30\text{ V}$	BC548, BC549	I_{CES}	—	0.2	15	nA	
at $V_{CE} = 80\text{ V}$, $T_j = 125\text{ }^\circ C$	BC546	I_{CES}	—	—	4	μA	
at $V_{CE} = 50\text{ V}$, $T_j = 125\text{ }^\circ C$	BC547	I_{CES}	—	—	4	μA	

¹⁾ Valid provided that leads are kept at ambient temperature at a distance of 2 mm from case

BC546 THRU BC549

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

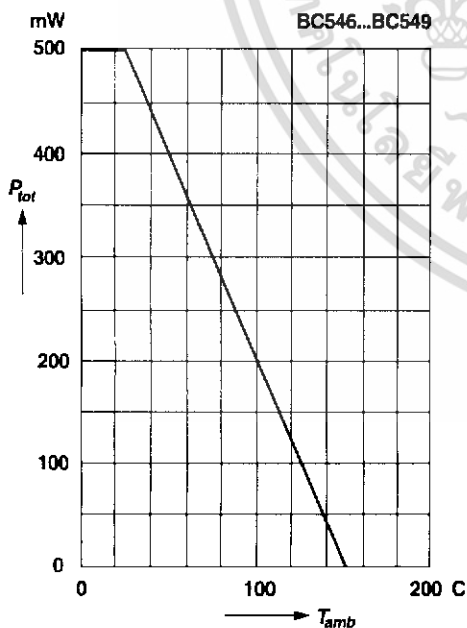
atings at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified

	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
at $V_{CE} = 30\text{ V}$, $T_j = 125\text{ °C}$ BC548, BC549	I_{CES}	–	–	4 4	μA μA
Gain-Bandwidth Product at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 10\text{ mA}$, $f = 100\text{ MHz}$	f_T	–	300	–	MHz
Collector-Base Capacitance at $V_{CB} = 10\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$	C_{CBO}	–	3.5	6	pF
Emitter-Base Capacitance at $V_{EB} = 0.5\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$	C_{EBO}	–	9	–	pF
Noise Figure at $V_{CE} = 5\text{ V}$, $I_C = 200\text{ }\mu\text{A}$, $R_G = 2\text{ k}\Omega$, $f = 1\text{ kHz}$, $\Delta f = 200\text{ Hz}$ BC546, BC547	F	–	2	10	dB
BC548	F	–	1.2	4	dB
BC549	F	–	1.4	4	dB

RATINGS AND CHARACTERISTIC CURVES BC546 THRU BC549

Admissible power dissipation versus temperature

Valid provided that leads are kept at ambient temperature at a distance of 2 mm from case



Pulse thermal resistance versus pulse duration

Valid provided that leads are kept at ambient temperature at a distance of 2 mm from case

