

ระบบถ่ายภาพด้วยคลื่นดัดดาโซนิกแบบซี-สแกน
ULTRASONIC C-SCAN IMAGING SYSTEM

ศาสตราจารย์ ดร. กอภกฤษ
นายธีรวัฒน์ ทุบาย
นายพนมอนุเบศร์ นกั้วเขียว

โครงการพิเศษที่สนับสนุนโดยส่วนหนึ่งของคณะกรรมการดำเนินงานของศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์

จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในโครงการสนับสนุนด้านกำลังคนทางการเกษตร

ปีการศึกษา 2556

ระบบสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน

ULTRASONIC C-SCAN IMAGING SYSTEM

นายณัฐพล กองกุล

นายธีรวัฒน์ ทูเบีย

นายอนุเบศร์ แก้วเขียว

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

ULTRASONIC C-SCAN IMAGING SYSTEM

MR.NATTAPHOL KONGKUL

MR.THREERAWAT TUBIER

MR.NARUBET KAEOKHIAO

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OR SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013

หัวข้อโครงการพิเศษ ระบบสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน
ULTRASONIC C-SCAN IMAGING SYSTEM

ชื่อนักศึกษา นายณัฐพล กองกุล
นายธีรวัฒน์ ทูเบีย
นายนฤเบศร์ แก้วเขียว

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศ.ทิพวรรณ กล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
|---------------------------|----------------------|
| อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ | |
| อ.สุรชาติ กมลดีลก | |
| อ.ธนภรณ์ สีลาวัฒนานนท์ | |
| รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา | |
| ดร.ศ.ทิพวรรณ กล้ายบุญมี | ศ.ทิพวรรณ กล้ายบุญมี |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

| | |
|----------------------|--|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | ระบบการสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน |
| ชื่อนักศึกษา | นายณัฐพล กองกุล |
| | นายธีรวัฒน์ ทุเบีย |
| | นายนฤเบศร์ แก้วเขียว |
| ปริญญา | วิทยาศาสตร์บัณฑิต |
| สาขาวิชา | ฟิสิกส์ |
| ปีการศึกษา | 2556 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รศ.ดร.วราวุฒิ เถาดีคดา |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี |

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการออกแบบและพัฒนาระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ศึกษาการทดสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย ระบบที่สร้างขึ้นอาศัยหลักการวัดขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับเนื่องมาจากความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ของเสียงภายในเนื้อวัสดุที่แต่ละตำแหน่งตามแนวระนาบ XY ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณจะถูกแปลงเป็นข้อมูลนาฬิกาและบันทึกลงแฟ้มข้อมูลในคอมพิวเตอร์ หลังจากเสร็จสิ้นการสแกนแล้วข้อมูลทั้งหมดจะถูกแปลงเป็นภาพถ่ายซี-สแกนโทมografi ด้วยโปรแกรมสร้างภาพ ภาพถ่ายซี-สแกนมีความละเอียดในการแยกแยะประมาณ 1 mm ในกรณีที่ใช้อัลตราโซนิกโพรบที่มีความถี่ 5 MHz นอกจากนี้ในโครงการพิเศษฉบับนี้ได้นำระบบที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างภาพเหรียญและสร้างภาพวัตถุที่มีเป็นรูปร่างเพื่อหาความต่างของพื้นผิวของวัตถุที่มีรูพรุนและไม่มีรูพรุน

คำสำคัญ : คลื่นอัลตราโซนิก, หัวอัลตราโซนิกโพรบ, ซี-สแกน, อิมพีแดนซ์, แอมพลิจูด

| | |
|----------------------|--|
| Thesis Title | Ultrasonic C-Scan Imaging System |
| Student | Mr.Nuttaphol Kongkul Mr.Threerawat Tubier Mr.Narubet Kaeokhiao |
| Degree | Bachelor of Science |
| Major Program | Physics |
| Academic Year | 2013 |
| Advisor | Associate Professor Dr. Warawoot Thowladda |
| C0-Advisor | Dr.S.Tipawan Khalayboonme |

ABSTRACT

This special project proposes development of low-frequency ultrasonic C-scan imaging for studying nondestructive testing of materials were carried out. The principle of the established system is measuring the peak amplitude of reflected wave due to internal acoustic impedance difference at each location along XY plane. The peak amplitude was converted to Analog data and saved as computer filename. After completing the scan, the data wave, then, transformed to gray-scale C-scan imaging software. Using 5 MHz ultrasonic probe, the resolution of C-scan image was found to be around 1 mm. In addition, the feasibility studies of internal visualization of The developed system was applied to study the possibility of creating images of coins and objects into shape to find the difference of the surface porous and non-porous.

Keywords : Ultrasonic waves, Ultrasonic Probe, C-Scan, Impedance, amplitude

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จมาได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตากรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา และ ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัยตลอดจน เป็นตัวอย่างที่ดีในการทำงานตลอดมา รวมถึงอนุเคราะห์จัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ ตลอดจนงบประมาณในการดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างในน้ำใจของท่านอาจารย์ทั้งสองและขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.วิจิต สิริ โขติ ที่กรุณาให้คำชี้แนะและแนะนำแนวทางในการทำ โครงการพิเศษนี้จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบคุณนายนรเศรษฐ์ พิภูเงิน ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับโปรแกรม และเนื่องจากเราทำ ชุดสแกนไม่สำเร็จ จึงได้รับความช่วยเหลือให้ยืมชุดสแกนจนทำให้โปรเจกสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ญาติผู้ใหญ่ เพื่อนๆ และบุคคลที่มีความปรารถนาดีที่มอบให้แก่กลุ่มของข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณทุกท่าน

นายณัฐพล กองกุล

นายธีรวัฒน์ ทูเบีย

นายนฤเบศร์ แก้วเขียว

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทยหน้า | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญตาราง | VIII |
| สารบัญรูป | IX |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ | |
| 1.1 ความสำคัญและที่มา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 5 |
| 1.3 หลักการและเหตุผล | 5 |
| 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ | 6 |
| 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ | 7 |
| | |
| บทที่ 2 ฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิก | |
| 2.1 ฟิสิกส์ของคลื่นและคลื่นอัลตราโซนิก | 9 |
| 2.2 สมการของการเคลื่อนที่ของคลื่น | 11 |
| 2.3 การเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก | 12 |
| 2.4 แรงและพลังงานในการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกอย่างง่าย | 17 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.5 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่น | 19 |
| 2.6 ระบบอุลตราโซนิก | 22 |
| 2.7 ตัวรับและตัวส่ง | 24 |
| 2.8 ตัวส่ง | 25 |
| 2.9 ตัวรับ | 25 |
| 2.10 ข้อควรรู้ในการใช้งานตัวรับและตัวส่ง | 26 |
| 2.11 อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์และหน้าที่การทำงาน | 27 |
| 2.12 วงจรส่งผ่าน/รับ | 28 |
| 2.13 การลดสัญญาณรบกวนและสภาวะการทำงาน | 31 |
| | |
| บทที่ 3 วิธีการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก | |
| 3.1 ความหมายของภาพถ่ายอัลตราโซนิก | 35 |
| 3.2 อุปกรณ์และระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน | 38 |
| 3.3 คุณสมบัติสำคัญของอัลตราโซนิกโพรบ | 39 |
| 3.4 แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์และตัวรับ | 43 |
| 3.5 เครื่องตรวจจับฟิสิก | 47 |
| 3.6 ออสซิลโลสโคป | 48 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 3.7 หลักการของระบบสร้างภาพอัลตราโซนิกที่พัฒนาขึ้น | 49 |
| 3.8 การออกแบบและชุดพัฒนาเครื่องมือ | 52 |
| 3.8.1 ชุดสแกนทางกลและชุดควบคุมเครื่องสแกนในแนวxyz | 52 |
| 3.9 โปรแกรมสร้างภาพจากเพิ่มข้อมูล | 58 |
| บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง | |
| 4.1 การทดสอบและศึกษาลักษณะสมบัติของระบบสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนที่พัฒนาขึ้น | 60 |
| 4.1.1 ความลาดเอียงของระบบสแกนตามแนวแกน y | 60 |
| 4.1.2 ขีดจำกัดในการตรวจสอบจุดบกพร่องภายในวัสดุ | 62 |
| 4.1.3 การเคลื่อนที่ของอัลตราโซนิกโพรบในแนวตั้งและระยะโฟกัส | 62 |
| 4.1.4 ทดลองหาช่วงแอมพลิจูดคงที่และแอมพลิจูดสูงสุดเรียกว่าโฟกัสเชิงโซน โดย การวัดที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวแกน z | 63 |
| บทที่ 5 บทสรุป แนวทางในการพัฒนาและประยุกต์ | |
| 5.1 สรุปผลการวิจัยพัฒนาระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการทดสอบ | 74 |
| 5.2 ปัญหาที่พบ | 77 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|----------------|------|
| 5.3 ข้อเสนอแนะ | 78 |
| เอกสารอ้างอิง | |
| ภาคผนวก | |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอัลตราโซนิกโพรบที่ใช้ในการสร้างภาพ | 43 |
| ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของ dB กับอัตราส่วนของแอมพลิจูด | 46 |
| ตารางที่ 3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของระยะห่างของโพรบกับขนาดของคลื่นสะท้อน | 66 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1.1 โหมดการแสดงผลภาพที่สร้างขึ้นจากคลื่นอัลตราโซนิก | 3 |
| รูปที่ 1.2 (ก) ระบบ C-Scan และ (ข) ภาพซี-สแกน | 3 |
| รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของคลื่น คาบเวลา และความยาวคลื่น | 9 |
| รูปที่ 2.2 ช่วงของความถี่ ชนิดของคลื่นเสียงและการใช้งาน | 9 |
| รูปที่ 2.3 กฎข้อสองของนิวตัน | 10 |
| รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของสริงเมื่อมี m | 11 |
| รูปที่ 2.5 การไหลของมวลในวัสดุหนึ่งหน่วยปริมาตร | 18 |
| รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของคลื่นเทียบกับเวลาและระยะจัด | 20 |
| รูปที่ 2.7 เปียโซอิเล็กทริก | 22 |
| รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างการเขียนสัญลักษณ์ของอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบต่างๆกัน | 24 |
| รูปที่ 2.9 แสดงผลการทดลองตัวรับตัวหนึ่งโดยลงเปลี่ยนโหลดเป็นค่าต่างๆกันแล้วป้อนคลื่นเสียงความถี่ต่างๆกันเข้ามา | 26 |
| รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของอุลตราโซนิก | 26 |
| รูปที่ 2.11 การส่งและรับสัญญาณอุลตราโซนิกเซ็นเซอร์ | 26 |
| รูปที่ 2.12 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์, วงจรเวลาคงที่ | 27 |
| รูปที่ 2.13 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์, วงจรที่เปลี่ยนแปลงได้ | 28 |
| รูปที่ 2.14 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์ทรานซ์ดิวเซอร์แบบขึ้นส่วนการอิมพัลส์ (Impulse) (แตกออก)ที่ 170 MHz | 29 |
| รูปที่ 2.15 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์, คุณลักษณะการตรวจจับ | 30 |
| รูปที่ 2.16 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์, พื้นผิวตรง | 30 |
| รูปที่ 2.17 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์, การตรวจจับสิ่งของ | 31 |
| รูปที่ 2.18 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์, การเบี่ยงเบนคลื่นเสียง | 32 |
| รูปที่ 2.19 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์, ความเร็วของวัตถุที่ยอมให้ได้ | 32 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายแบบ เอ-สแกน บี-สแกน และซี-สแกน | 36 |
| รูปที่ 3.2 ลักษณะของข้อบกพร่องและภาพถ่ายแบบ เอ-สแกน | 37 |
| รูปที่ 3.3 สัญญาณจากพัลส์-สะท้อนกลับด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่ม | 38 |
| รูปที่ 3.4 สะท้อนกลับ-ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบจุ่มด้วยเทคนิคพัลส์ | 39 |
| รูปที่ 3.5 คุณสมบัติของหัวอัลตราโซนิกโพรบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (V310-N-SU) | 41 |
| รูปที่ 3.6 ลักษณะลำคลื่น โฟกัสอัลตราโซนิก | 43 |
| รูปที่ 3.7 วงจรพัลส์เซอร์ | 45 |
| รูปที่ 3.8 วงจรภาครับสัญญาณ | 45 |
| รูปที่ 3.9 พัลส์เซอร์และตัวรับของ PANAMAETRICS | 46 |
| รูปที่ 3.10 การประยุกต์การใช้งานแบบพัลส์เซอร์ สะท้อนกลับ | 48 |
| รูปที่ 3.11 การประยุกต์ใช้งานเครื่องตรวจจับฟิสิก | 49 |
| รูปที่ 3.12 ออสซิลโลสโคป RIGOL | 50 |
| รูปที่ 4.1 ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบจุ่มด้วยเทคนิคพัลส์-สะท้อนกลับ | 52 |
| รูปที่ 4.2 ระบบที่พัฒนาขึ้น (ก) ชุดสแกน xyz (ข) เครื่องมือที่นำมาติดตั้ง และ (ค) อัลตราโซนิกโพรบ | 53 |
| รูปที่ 4.3 ระยะห่างระหว่างเกลียวของเกลียวหมุนที่ใช้ในเครื่องสแกนทางกลที่พัฒนาขึ้น | 54 |
| รูปที่ 4.4 ชุด Linear Motion System ในแนว x และ y | 55 |
| ผังรูปที่ 4.5 แนวแกน z ใช้ปรับในโหมด manual | 55 |
| รูปที่ 4.6 แบบฟูลสเต็ปมอเตอร์(Full Step Motor) | 57 |
| รูปที่ 4.7 แบบฮาล์ฟสเต็ป(Half Step Motor) | 57 |
| รูปที่ 4.8 ส่วนควบคุมและประมวลผลกลาง | 58 |
| รูปที่ 4.9 ไดอะแกรมการทำงานของชุดควบคุมเครื่องแกน xyz | 59 |
| รูปที่ 4.10 ทิศทางการสแกนหัวอัลตราโซนิกโพรบในโหมดอัตโนมัติ | 60 |
| รูปที่ 4.11 โพลีชาร์ทของโปรแกรมสร้างภาพซี-สแกน | 61 |
| รูปที่ 5.1 การติดตั้งระบบเพื่อวัดความคลาดเคลื่อนในแนวแกน z | 63 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 5.2 สัญญาณคลื่นสะท้อนที่ระยะห่างต่างๆของโพรบกับชิ้นงาน | 66 |
| รูปที่ 5.2 (ต่อ) สัญญาณคลื่นสะท้อนที่ระยะห่างต่างๆของโพรบกับชิ้นงาน | 67 |
| รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายอัลตราโซนิกซี-สแกนของเหรียญจากเครื่องที่พัฒนา | 69 |
| รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายเหรียญ สแตนเลส และจิ้งจก (เครื่องราง) | 70 |
| รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายก่อนที่จะสแกนด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-แกน (ภาพจริง) | 70 |
| รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนของเหรียญ 5 บาท ด้วยความละเอียด = 0.1 mm. | 71 |
| รูปที่ 5.7 ภาพถ่ายด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนของเหรียญ 5 บาท ด้วยความละเอียด = 0.3 mm. | 72 |
| รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนของจิ้งจก(เครื่องราง) | 74 |
| รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนของสแตนเลสที่ไม่มีรูและมีรู | 75 |

บทที่ 1

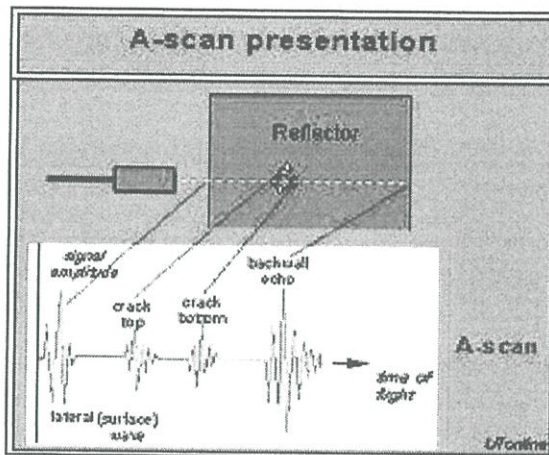
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

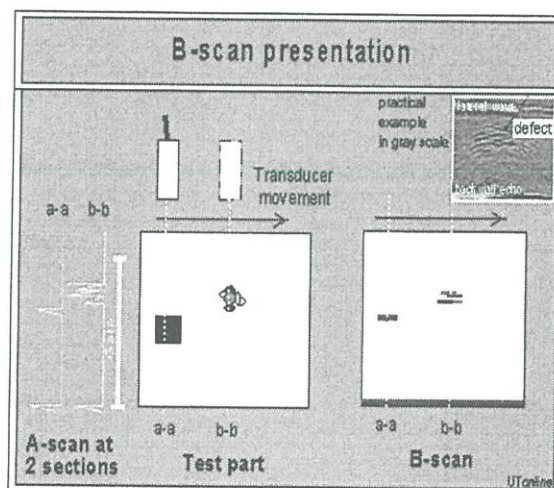
ปัจจุบันการทดสอบวัสดุด้วยเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ได้เข้ามามีบทบาทในแวดวงอุตสาหกรรมการผลิตโลหะและวัสดุ แทนที่การตรวจสอบแบบดั้งเดิมซึ่งต้องทำลายชิ้นงานก่อนจะทำการทดสอบ หรือเมื่อทดสอบเสร็จก็อาจทำให้วัสดุหรือชิ้นงานนั้นๆเกิดความเสียหาย นักวิทยาศาสตร์และนักเทคโนโลยีจึงได้พยายามคิดค้นและเสาะหาแนวทางในการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลายชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำความรู้ทางฟิสิกส์ รวมถึงปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เข้ามาใช้ เทคนิคที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่การทดลองวัสดุด้วยเทคนิคสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งเป็นคลื่นกลที่มีความถี่สูงมากกว่าความถี่เสียงที่มนุษย์สามารถรับฟังได้ กล่าวคือมีความถี่เสียงกว่า 20 kHz โดยระดับเสียงที่มนุษย์เราได้ยินจะอยู่ในช่วง 20 Hz -20 kHz เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นกลชนิดหนึ่ง ฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกจึงสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับคลื่นเสียง การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ดังนั้นถ้าวัสดุมีอะตอมเรียงชิดติดกันมากคลื่นอัลตราโซนิกจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ดี นอกจากนี้ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์อื่นๆ เช่น การสะท้อน การหักเห การแทรกสอด การเลี้ยวเบน และการกระเจิง ก็เป็นเช่นเดียวกับพฤติกรรมของคลื่นเสียง ในการนำคลื่นกลชนิดนี้ไปใช้ตรวจสอบชิ้นงาน อาศัยการแปลงคลื่นอัลตราโซนิกซึ่งเป็นคลื่นกลเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยหัววัดเพียโซอิเล็กทริกและเพื่อความสะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์และประมวลผล จึงนำเอาสัญญาณทางไฟฟ้ามาสร้างเป็นภาพ

การสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกสามารถแบ่งตามวิธีการสแกนอัลตราโซนิกโพรบ ได้เป็นเทคนิคเอ-สแกน (A-Scan), บี-สแกน (B-scan), ซี-สแกน (C-Scan) ดังรูปที่ 1.1 เทคนิคนิคเอ-สแกนเป็นการวัดสัญญาณที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งแล้วนำสัญญาณที่ตรวจวัดได้มาแสดงผลในรูปแอมพลิจูดของสัญญาณกับเวลาในการเคลื่อนที่ของเสียงที่ตำแหน่งนั้นๆ เทคนิคบี-สแกนเป็นการสแกนอัลตราโซนิกโพรบเป็นแนวเส้นตรงโดยการนำสัญญาณที่ได้จากวิธีเอ-สแกน มาเปลี่ยนขนาดของแอมพลิจูดให้เป็น

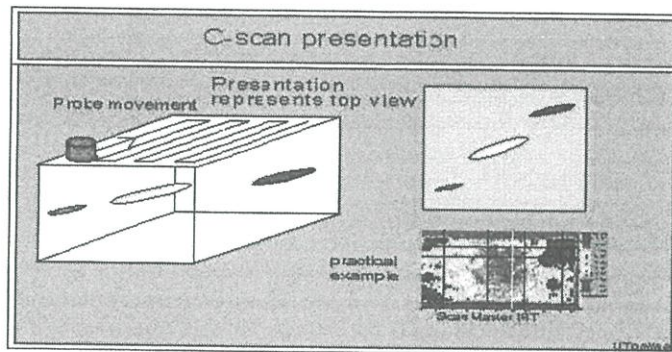
ความสว่าง ณ ตำแหน่งหนึ่งๆตลอดแนวเส้นที่สแกนหัวโพรบไป สุดท้ายเป็นเทคนิคที่ใช้ใน วิทยานิพนธ์นี้คือ เทคนิคซี-สแกน ซึ่งเป็นการสร้างภาพของวัสดุในแนวระนาบ 2 มิติ หรือในแนวระนาบ x-y ที่ความลึก z หนึ่งๆ โดยวิธีการสแกนภาพด้วยวิธีนี้นั้น จะให้อัตราโซนิกโพรบวางห่างจาก วัสดุเป็นระยะคงที่ แล้วสแกนหัวโพรบตามแนวระนาบ x-y ภาพถ่ายที่ได้แสดงด้วยระดับความเข้ม ของสี โดยระดับความเข้มของสีในแต่ละจุดแทนขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับ



(ก)



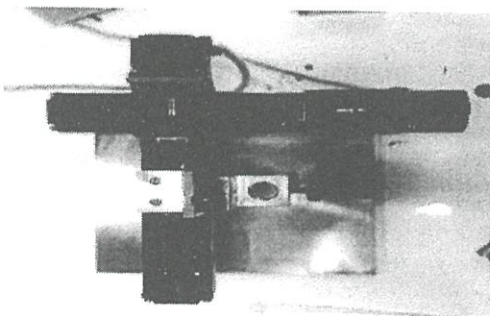
(ข)



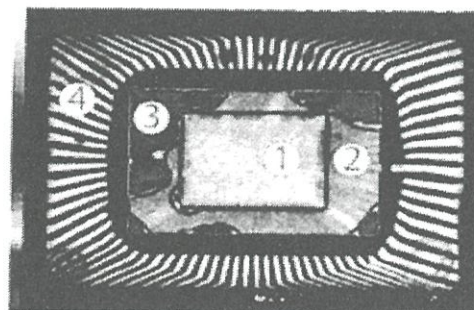
(ก)

รูปที่ 1.1 โหมดการแสดงผลที่สร้างขึ้นจากคลื่นอัลตราโซนิก

โดยทั่วไป เครื่องสร้างภาพด้วยคลื่นเสียงและคลื่นอัลตราโซนิกที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าที่อาศัยหลักพื้นฐานเดียวกันกับเครื่องที่ทำการสร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่ Scanning Acoustic Microscope (SAM) หรือ High Resolution Ultrasonic Scanning System (HYSCAN) แต่ใช้หัววัดอัลตราโซนิกโพรบที่มีความถี่สูงตั้งแต่ 50MHz ถึง 1 GHz การประยุกต์ใช้งานระบบที่มีความละเอียดในการตรวจสอบสูงนี้ ส่วนใหญ่จะใช้ตรวจสอบจุดบกพร่องที่บริเวณผิวของชิ้นงานหรือตรวจสอบจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในเนื้อชิ้นงานที่มีระยะไม่ลึกมากนัก เช่น ใช้ตรวจสอบการไม่ยึดเกาะของเวเฟอร์ (disbanding of Die attach) ในกระบวนการประกอบวงจรรวม (IC packaging) และการตรวจสอบพื้นผิวของวัสดุไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ดังรูปที่ 1.2 ภาพตัวอย่างที่ได้จากระบบ HYSCAN โดยใช้ความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิก 50 MHz



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.2 (ก) ระบบ C-Scan และ (ข) ภาพซี-สแกน

ระบบที่สร้างขึ้นในโรงงานพิเศษนี้ ใช้หัวอัลตราโซนิกโพรบที่มีความถี่ต่ำ ขนาด 5 MHz ในการสร้างภาพ การนำไปประยุกต์ใช้งานจึงต่างกัน โดยมีเป้าหมายเน้นไปที่การทดสอบจุดบกพร่องและความไม่ต่อเนื่องในระดับมหภาค (macroscopic scale) ของวัสดุ การประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่เป็นการตรวจสอบหาจุดบกพร่องหรือรูพรุนในโลหะและส่วนประกอบของเครื่องบิน ที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ถ้าไม่ทำลายชิ้นงานเพื่อเปิดออกดู เป็นต้น การประยุกต์ที่น่าสนใจสำหรับการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกความถี่ต่ำ อีกแนวทางหนึ่ง เป็นการสังเกตความไม่ต่อเนื่องหรือรูปแบบการไหล (flow pattern) ในเนื้อพลาสติกที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบฉีดขึ้นรูป (injection-molding process) ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งในปัจจุบันการออกแบบผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีการฉีดพลาสติก (injection-molded plastic) นั้น อาศัยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กราฟฟิก (computer graphic simulation) แสดงทิศทางทวนไหลภายในแม่พิมพ์ (mold) ของโพลิเมอร์ที่ถูกหลอมเหลว เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยข้อมูลที่ได้เป็นลักษณะการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ที่ออกแบบไว้ที่เวลาต่างๆ ซึ่งเป็นเพียงแบบจำลองไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นภายในเนื้อพลาสติกจากกระบวนการผลิตจริงได้ วิธีทดลองทำได้โดยวิธีสุ่มตรวจสอบด้วยวิธีแบบทำลายชิ้นงาน อย่างไรก็ตามความไม่ต่อเนื่องภายในเนื้อพลาสติกนอกจากรูพรุนหรือโพรงอากาศที่เกิดขึ้นแล้ว ยังรวมถึงความหนาแน่นของเนื้อวัสดุที่แตกต่างกันเนื่องจากการเย็นตัวไม่พร้อมกันในกระบวนการฉีดพลาสติกอีกด้วย เพื่อการศึกษาวิธีสร้างภาพภายในของชิ้นงานวัสดุเพื่อใช้ตรวจสอบชิ้นงานประเภทวัสดุของแข็ง โครงสร้างภายในของตัวไอซี หรือรูปแบบการไหลของพลาสติกที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบฉีดขึ้นรูป ในโรงงานพิเศษฉบับนี้ได้เสนอการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในการสร้างภาพภายในของชิ้นงานวัสดุด้วยเทคนิคการสะท้อนกลับของพัลส์ และเนื่องจากวัสดุประเภทพลาสติกมีสัมประสิทธิ์การลดทอนสูง (กรณีของโพลีไพลีนประมาณ 18.2 dB/cm ที่ความถี่ 5 MHz) สัมประสิทธิ์ของการลดทอนจะสูงขึ้นเมื่อความถี่ของคลื่นเสียงเพิ่มมากขึ้น ระบบที่สร้างจึงใช้หัวอัลตราโซนิกโพรบชนิดความถี่ต่ำในการดำเนินการทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์

จุดประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้ได้แก่

1. เพื่อริเริ่มนำเทคโนโลยีการสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกเข้ามาใช้ในประเทศ สำหรับตรวจสอบวัสดุแบบไม่ทำลายและการวัดคุณสมบัติของวัสดุ
2. เพื่อเรียนรู้และเข้าใจถึงวิธีการนำเอาความรู้ทางฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้สร้างเครื่องมือและระบบวัด
3. เพื่อศึกษาวิธีการวัดลักษณะสมบัติของระบบที่ได้สร้างขึ้นและสามารถสร้างภาพวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในเบื้องต้นและแปลผลจากรูปที่ถ่ายได้

1.3 หลักการและเหตุผล

การสร้างระบบถ่ายภาพของวัสดุเพื่อตรวจสอบข้อบกพร่องหรือคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจำเป็นต้องอาศัยพื้นฐานความรู้สองทางด้วยกัน กล่าวคือ ความรู้ทางฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกและวิศวกรรมเครื่องมือ เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิกคือคลื่นกล ดังนั้นคุณลักษณะต่างๆจึงเหมือนพฤติกรรมของคลื่นกล เมื่อพิจารณาจากสมการคลื่น คลื่นอัลตราโซนิกจะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วที่แตกต่างกันไปในแต่ละวัสดุ โดยเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนผ่านรอยต่อระหว่างวัสดุตัวกลางต่างชนิดกันจะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่น และมีบางส่วนของคลื่นเคลื่อนที่ต่อไป ดังนั้นเมื่อภายในวัสดุมีจุดบกพร่องหรือโพรงอากาศเกิดขึ้น คลื่นอัลตราโซนิกที่กระทบก็จะสะท้อนกลับ สัญญาณของคลื่นที่สะท้อนกลับจะอาศัยเทคโนโลยีทางวิศวกรรมนำไปสร้างเป็นภาพของข้อบกพร่องภายในเนื้อวัสดุขึ้นนั้นที่ตำแหน่งนั้นๆได้ การถ่ายภาพทั่วชิ้นงานจะทำโดยการเคลื่อนตัวส่งและตัวรับสัญญาณอัลตราโซนิกไปทั่วทั้งชิ้นงานในแนวระนาบ และอ่านสัญญาณของคลื่นที่สะท้อนกลับมาเพื่อนำไปสร้างภาพรวมของวัสดุ ภาพถ่ายที่สร้างขึ้นจะสามารถบอกถึงตำแหน่งและรายละเอียดของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุได้ ในทำนองเดียวกันภาพที่ได้ก็สามารถบอกถึงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุในแต่ละตำแหน่งของวัสดุได้เช่นเดียวกัน จึงสะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์และประเมินผลการทดลอง

เพื่อจะเปิดโอกาสให้มีการศึกษาและวิจัยในรายละเอียดต่อไป ไม่ว่าจะใช้ศึกษาฟิสิกส์ของวัสดุหรือหลักการทดสอบแบบไม่ทำลาย ก่อนอื่นจำเป็นต้องมีระบบสำหรับสร้างภาพด้วยวิธีดังกล่าวเสียก่อน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเน้นการศึกษาและสร้างระบบสร้างภาพวัสดุในแนวระนาบแบบซี-สแกนด้วยคลื่นอัลตราโซนิกชนิดคว่ำต่ำ ซึ่งเป็นพื้นฐานของการสร้างภาพด้วยคลื่นเสียงในระดับจุลภาค (microscopic scale) อีกด้วย เนื่องจากระบบสร้างภาพขนาดจุลภาคด้วยคลื่นเสียงจะแตกต่างที่การใช้หัวโพรบอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูงกว่าระบบที่ศึกษาอยู่มาก ในระดับ 100 MHz - 1 GHz

1.4 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษฉบับนี้มีเป้าหมายมุ่งเน้นการสร้างและพัฒนาระบบต้นแบบสำหรับสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกด้วยความถี่ต่ำแบบซี-สแกน เพื่อทำการศึกษาระบบในการสร้างภาพของวัสดุด้วยคลื่นเสียงสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวัสดุ โดยสามารถแสดงภาพจุดบกพร่องภายในเนื้อวัสดุที่สามารถสังเกตด้วยตาเปล่า เครื่องมือและชุดทดลองที่ต้องทำการสร้างและพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เครื่องสแกนในแนว x-y-z วงจรสำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องสแกน วงจรอ่านค่าดิจิทัลเอาต์พุตจากเครื่องตรวจจับฟิสิก การติดตั้งชุดทดลอง และการพัฒนาโปรแกรมสำหรับอ่านและเก็บข้อมูลดิบ ก่อนนำไปสร้างภาพกราฟฟิบบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB นอกจากนี้ได้ทำการทดลองศึกษาเพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำระบบไปทดสอบและสร้างภาพของวัสดุต่างๆเช่น ภาพโครงสร้างภายในของไอซีและวัสดุประเภทพลาสติกเป็นต้น โดยเน้นที่วัสดุประเภทพลาสติกจากกระบวนการผลิตจากกระบวนการผลิตแบบฉีดขึ้นรูปเพื่อแสดงลักษณะการไหลของเนื้อพลาสติกที่เกิดจากการฉีดขึ้นรูป

1.5 รายละเอียดของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษฉบับนี้เสนอรายละเอียดของระบบสร้างภาพแบบซี-สแกน ด้วยอัลตราโซนิก ความถี่ต่ำในระดับ 5 MHz ตั้งแต่หลักการเบื้องต้น แนวทางการออกแบบ จนถึงการนำระบบไปประยุกต์ใช้สร้างภาพวัสดุชนิดต่างๆ โดยแบ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนออกเป็นบทย่อยๆ ดังนี้ ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงฟิสิกส์ที่เกี่ยวกับคลื่นอัลตราโซนิก สมการการเคลื่อนที่ของอัลตราโซนิก ความสัมพันธ์ของอัลตราโซนิกกับวัสดุ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ เพื่อสร้างความรู้ความเข้าใจถึงพื้นฐานและหลักการของคลื่นอัลตราโซนิก เมื่อเข้าใจในเนื้อหาและหลักการประยุกต์ใช้งานด้วยเทคนิคคลื่นอัลตราโซนิกเบื้องต้นแล้ว ต่อไปในบทที่ 3 จะกล่าวถึงรายละเอียดถึงเทคนิคการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก และรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ที่สำคัญ เพื่อให้เข้าใจและเรียนรู้พื้นฐานของระบบสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิก ในบทที่ 4 เป็นขั้นตอนการออกแบบและสร้างเครื่องมือที่จำเป็น ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องสแกนทากลในแนว xyz วงจรควบคุมมอเตอร์สำหรับชุดสแกน และโฟลชาร์ตโคอะแกรมของโปรแกรมสร้างภาพ เนื้อหาในบทที่ 5 เป็นผลการทดลองเพื่อศึกษาหลักการในการสร้างภาพจุดบกพร่องภายในเนื้อชิ้นงานและความเป็นไปได้ในการนำเอาคลื่นอัลตราโซนิกไปสร้างภาพวัสดุสุดท้ายในบทที่ 6 เป็นสรุปผลการทดสอบเครื่องมือและการทดลองพร้อมแนวทางพัฒนาต่อไปในอนาคต ข้อเสนอแนะ และวิจารณ์

บทที่ 2

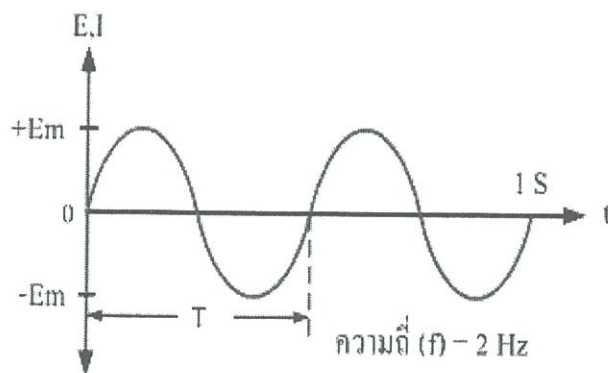
ฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิก

จากความรู้ทางฟิสิกส์พื้นฐานหรือฟิสิกส์ยุคดั้งเดิม เราสามารถแยกพิจารณาฟิสิกส์ของคลื่นออกได้เป็นสองประเภท ได้แก่คลื่นที่เคลื่อนที่โดยอาศัยตัวกลาง เช่น คลื่นเสียงและคลื่นกล และคลื่นที่เคลื่อนที่โดยต้องอาศัยตัวกลาง เช่น คลื่นเสียงและคลื่นกล และคลื่นที่เคลื่อนที่โดยไม่อาศัยตัวกลาง เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นอัลตราโซนิกจัดเป็นคลื่นกล กล่าวคือจะเคลื่อนที่โดยอาศัยการสั่นของอนุภาคตัวกลาง ดังนั้นพฤติกรรมต่างๆของคลื่นอัลตราโซนิกสามารถอธิบายได้โดยฟิสิกส์ของคลื่นกล ในบทนี้เราจะศึกษาฟิสิกส์ของคลื่นก่อนในช่วงต้น เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกต่อไป โดยมีเป้าหมายที่จะศึกษาและเข้าใจพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการทดสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก และในส่วนท้ายจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างคลื่น โซนิกและวัสดุในเชิงฟิสิกส์

2.1 ฟิสิกส์ของคลื่นและคลื่นอัลตราโซนิก

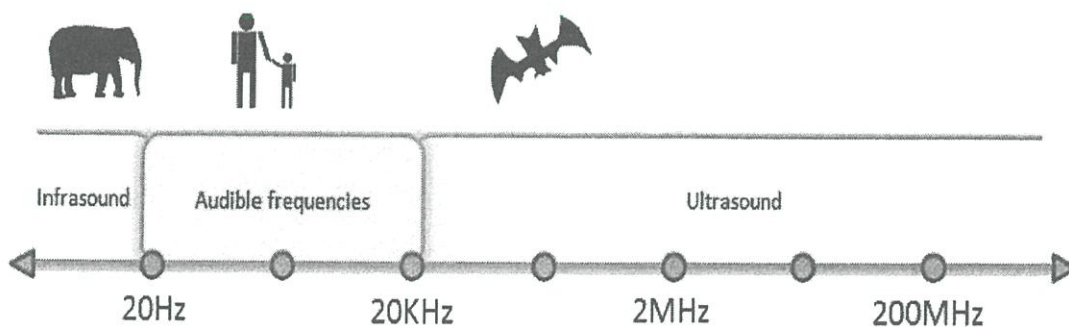
นักฟิสิกส์ให้นิยามของคลื่นว่า คือ การสั่นของอนุภาคกลับไป-กลับมาในลักษณะเป็นคาบซึ่งมีพารามิเตอร์พื้นฐานคือ 1)คาบเวลา ()periodic cycle, T คือระยะเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ครบ (1 รอบ หรือก็คือ ระยะเวลาที่อนุภาคสั่นไป แล้วกลับมายังตำแหน่งเดิม)2(ความยาวคลื่น)wavelength, λ (เป็นระยะทางที่อนุภาคสั่นไปแล้วกลับครบ 1 รอบและ)3) ความถี่ (Frequency, f(คือจำนวนรอบที่อนุภาคสั่นในเวลา 1 วินาที หรือเป็นส่วนกลับของคาบเวลา ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยที่ความเร็วของการเคลื่อนที่ของคลื่น ที่เงื่อนไขขอบเขตว่าอุดมภูมิและความดันคงที่ และเป็นคลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลางยืดหยุ่นสมบูรณ์)perfectly elastic material(จะสัมพันธ์กับความถี่ คาบเวลาในการเคลื่อนที่ และความยาวคลื่น ดังสมการที่)2.1(

$$v = f\lambda = \lambda/T \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของคลื่น คาบเวลา และความยาวคลื่น

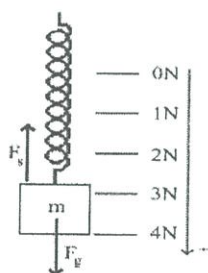
เรายังสามารถแยกคลื่นออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ (1) คลื่นที่เคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เช่น แสง คลื่นวิทยุ เป็นต้น ซึ่งเราเรียกรวมเป็น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ (ข) คลื่นที่ต้องใช้ตัวกลางเป็นการถ่ายทอดพลังงานในการเคลื่อนที่ เช่น เสียง คลื่นน้ำ เป็นต้น โดยเรียกรวมว่าเป็นคลื่นกล โดยคลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นเสียงหรือคลื่นกลแบบหนึ่งซึ่งต้องใช้ตัวกลางเป็นตัวถ่ายทอดพลังงาน และมีความถี่สูงกว่าความถี่เสียง หรือ มากกว่า 20 kHz ขึ้นไป เราจะเรียกคลื่นอัลตราโซนิกว่าเป็นคลื่นเหนือเสียง (ความหมาย ultra แปลว่าสูงหรือเหนือ และ sonic/sound แปลว่าเสียง) แสดงว่าความยาวคลื่นของอัลตราโซนิกนั้น สั้นกว่าคลื่นเสียงทั่วไป ซึ่งจะสะท้อนกลับเมื่อคลื่นวิ่งชนกับสิ่งกีดขวางที่มีขนาดเล็กๆ คลื่นอัลตราโซนิกจึงสามารถใช้ตรวจสอบรอยร้าวหรือจุดบกพร่องขนาดเล็กภายในชิ้นงานวัสดุได้ดีกว่าคลื่นเสียงทั่วไป ช่วงความถี่ ชนิดของคลื่นเสียงและย่านการใช้งานแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ช่วงของความถี่ ชนิดของคลื่นเสียงและการใช้งาน

2.2 สมการของการเคลื่อนที่ของคลื่น

เราจะทำการเปรียบเทียบการขีดยืดหยุ่นของอะตอมในของแข็งเสมือนดังมวลที่ยึดติดเข้าด้วยกันกับสปริง เมื่อได้รับแรงจากภายนอกมากระตุ้น มวลก้อนที่หนึ่งจะส่งถ่ายพลังงานไปยังมวลที่ติดกับสปริง ซึ่งเมื่อมองกลับไปในทางฟิสิกส์ของการเคลื่อนที่ จะมีลักษณะคล้ายกับการเคลื่อนที่ของฮาร์มอนิกอย่างง่าย (simple harmonic motion) ซึ่งพบว่าการเคลื่อนที่ของมวลที่ติดกับสปริงมีลักษณะเป็นแบบของการสั่น (oscillation หรือ vibration) นั่นเอง ดังนั้นการพิจารณาการเคลื่อนที่ของอัลตราโซนิคในขั้นต้นจะเริ่มจากการวิเคราะห์มวลที่ผูกติดกับสปริงในหนึ่งมิติ เพื่อให้เข้าใจในฟิสิกส์ของการเคลื่อนที่แบบอย่างง่าย เพื่อเป็นฐานในการไปพิจารณาในเงื่อนไขขอบเขตอื่นต่อไป ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3

เมื่อนำมวลมาแขวนที่ปลายสปริงและอยู่ในสภาพสมดุล จากกฎข้อสองของนิวตัน

$$\sum F = ma \tag{2.2.1}$$

$$F_s - F_g = 0 \tag{2.2.2}$$

$$F_s = F_g \tag{2.2.3}$$

$$F_s = -kx \tag{2.2.4}$$

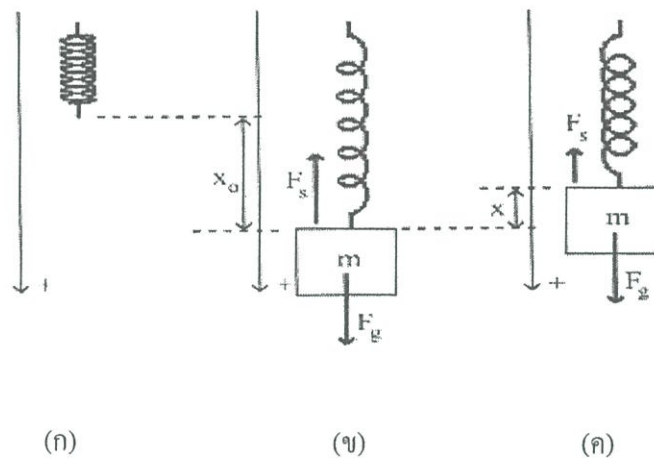
เมื่อ k เรียกว่าค่าคงที่ของสปริง (spring constant)

กฎของฮุค : $\vec{F}_s = -kx$

2.3 การเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก

การหาสมการการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบซิมเปิลฮาร์โมนิก สามารถประยุกต์ใช้กฎข้อสองของนิวตัน โดยมีความเร่งเข้ามาเกี่ยวข้อง

ซึ่งความเร็วและความเร่งสามารถหาได้จากสมการ ตำแหน่งเป็นฟังก์ชัน (เนื่องจากวัตถุมีการเคลื่อนที่) ของเวลา (x_t) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของสปริงเมื่อมี m

พิจารณาการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก เมื่อระบบไม่สมดุลเดิมสปริงอยู่ในตำแหน่งสมดุลดังรูปที่ 2.4 ก จากนั้นนำมวล m มาแขวนที่ปลายสปริงทำให้สปริงยืดออกเป็นระยะ x_0 ดังรูปที่ 2.4 ข ระบบจะอยู่ในตำแหน่งสมดุลอีกครั้ง จากนั้นยกมวล m ขึ้นเป็นระยะ x เหนือตำแหน่งสมดุลดังรูปที่ 2.4 ค แล้วปล่อยให้สปริงสั่น.

จากกฎข้อสองของนิวตัน เมื่อมวล m เคลื่อนที่ (ระบบไม่สมดุล)

$$\sum F = ma \quad (2.3.1)$$

$$F_s - F_g = ma \quad (2.3.2)$$

เมื่อสปริงยืดออกเป็นระยะ $x_0 - x$ อาศัยกฎของฮุค

$$k(x_0 - x) - mg = ma \quad (2.3.3)$$

จากกฎข้อสองของนิวตันเมื่อมวล m อยู่ในตำแหน่งสมดุลมวล m อยู่หนึ่ง

$$\sum F = ma \quad (2.3.4)$$

$$F_s - F_g = 0 \quad (2.3.5)$$

$$kx_0 = mg \quad (2.3.6)$$

แทนค่า mg ลงในสมการด้านบน จะได้ (เมื่อระบบไม่สมดุล)

$$k(x_0 - x) - kx_0 = ma \quad (2.3.7)$$

$$-kx = ma \quad (2.3.8)$$

$$a = -\frac{k}{m}x \quad (2.3.9)$$

นั่นคือความเร่งจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับการกระจัดแต่มีทิศทางตรงกันข้าม เพื่อความสะดวกกำหนดให้

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (2.3.10)$$

เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$a_x = -\omega^2 x \quad (2.3.11)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความเร่ง โดยอาศัยกฎลูกโซ่จะได้

$$a = \frac{dv}{dx} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dv}{dx} = v \frac{dv}{dx} \quad (2.3.12)$$

จะได้ $-\omega^2 x = v \frac{dv}{dx}$

$$v dv = -\omega^2 x dx \quad (2.3.13)$$

อินทิเกรตทั้งสองข้าง โดยมี limit ของตำแหน่งจาก A ไปยังตำแหน่ง x ใด ๆ

$$\int_0^v v dv = -\omega^2 \int_A^x x dx \quad (2.3.14)$$

สาเหตุที่ใช้ตำแหน่งตอนแรกเป็น A เนื่องจากที่ตำแหน่งนี้ความเร็วจะเป็นศูนย์ ให้ปล่อยมวลที่ระยะ $x = A$ เมื่อ A เรียกว่า “แอมพลิจูด” จะได้

$$\int_0^v v dv = -\omega^2 \int_A^x x dx \quad (2.3.15)$$

$$\frac{1}{2} v^2 = -\omega^2 \left(\frac{1}{2} x^2 - \frac{1}{2} A^2 \right) \quad (2.3.16)$$

$$v^2 = \omega^2 (A^2 - x^2) \quad (2.3.17)$$

นั่นคือความเร็วจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง

$$v_x = \pm \omega \sqrt{A^2 - x^2} \quad (2.3.18)$$

การหาสมการเมื่อ ตำแหน่งเป็นฟังก์ชันของเวลาเวลา โดยอาศัยเงื่อนไขของความเร็ว

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (2.3.19)$$

$$\frac{dx}{dt} = \omega \sqrt{A^2 - x^2} \quad (2.3.20)$$

$$\frac{dx}{\sqrt{A^2 - x^2}} = \omega dt \quad (2.3.21)$$

$$\int_{x_0}^x \frac{dx}{\sqrt{A^2 - x^2}} = \int_0^t \omega dt \quad (2.3.22)$$

ในกรณีนี้ $x_0 = A$ แต่โดยทั่วไปจะมีค่าเท่าใดก็ได้แต่ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ A

$$\int_{x_0}^x \frac{dx}{\sqrt{A^2 - x^2}} = \int_0^t \omega dt \quad (2.3.23)$$

$$\left[-\cos^{-1} \frac{x}{A} \right] = \omega t \quad (2.3.24)$$

$$-\cos^{-1} \frac{x}{A} + \cos^{-1} \frac{x_0}{A} = \omega t \quad (2.3.25)$$

เมื่อเทอมที่สองทางซ้ายมือเป็นค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งเริ่มต้นของมวล เราเรียกว่ามุมเฟสเมื่อ

$$\phi = -\cos^{-1} \frac{x_0}{A} \quad (2.3.26)$$

จะได้

$$\cos^{-1} \frac{x}{A} - \phi = \omega t \quad (2.3.27)$$

$$\cos^{-1} \frac{x}{A} = -(\omega t + \phi) \quad (2.3.28)$$

$$\begin{aligned} \frac{x}{A} &= \cos[-(\omega t + \phi)] \\ &= \cos(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (2.3.29)$$

จะได้ตำแหน่งเป็นฟังก์ชันของเวลา

$$x_t = A \cos(\omega t + \phi) \quad (2.3.30)$$

การหาสมการ ความเร็วเป็นฟังก์ชันของเวลา โดยอาศัยเงื่อนไขของความเร็ว

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (2.3.31)$$

$$v = \frac{d}{dt} A \cos(\omega t + \phi) \quad (2.3.32)$$

จะได้ความเร็วเป็นฟังก์ชันของเวลา

$$v_t = -\omega A \sin(\omega t + \phi) \quad (2.3.33)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความเร่ง โดยหาอนุพันธ์ของความเร็วเทียบกับเวลา

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (2.3.34)$$

$$= \frac{d}{dt} [-\omega A \sin(\omega t + \phi)]$$

จะได้ความเร่งเป็นฟังก์ชันของเวลา

$$a_t = -\omega^2 A \cos(\omega t + \phi) \quad (2.3.35)$$

เริ่มต้นใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน โดยพิจารณาแรงที่เกิดจากวัตถุมวล m กระทำที่ปลายสปริง แล้วทำให้วัตถุมีความเร่ง จากนั้นอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความเร่ง จะได้สมการการเคลื่อนที่ของตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ดังนี้

$$x_t = A \cos(\omega t + \phi) \quad (2.3.36)$$

$$v_t = -\omega A \sin(\omega t + \phi) \quad (2.3.37)$$

$$a_t = -\omega^2 A \cos(\omega t + \phi) \quad (2.3.38)$$

$$v_x = \pm \omega \sqrt{A^2 - x^2} \quad (2.3.38)$$

$$a_x = -\omega^2 x \quad (2.3.39)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูด ; ϕ คือมุมเฟส ; $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ คือความเร็วเชิงมุม

ความถี่เชิงมุมของวัตถุมวล m ที่ติดปลายสปริงคือ

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3.40)$$

ค่า sines และค่า cosines บอกให้เราทราบว่าวัตถุเคลื่อนที่แบบสั่น หรือแบบฮาร์โมนิก ที่ใช้คำว่าอย่างง่ายเนื่องจากเคลื่อนที่พื้นฐานแบบฮาร์โมนิกมีหลายรูปแบบ ความเร่งจะ (รหยาซึ่งมีความยุ่งยากในก) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการกระจัดแต่ทิศตรงข้าม

2.4 แรงและพลังงานในการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกอย่างง่าย

เมื่อมวล m ถูกกระทำด้วยแรง F ทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง a จากกฎการเคลื่อนที่ข้อสองของนิวตัน

$$F = ma \quad (2.4.1)$$

เนื่องจากวัตถุเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก $a = -\omega^2 x$

$$F = m(-\omega^2 x) \quad (2.4.2)$$

$$= -m\omega^2 x$$

$$= -kx$$

พิจารณาพลังงานศักย์ของสปริง จาก

$$F = \frac{-dU}{dx} \quad (2.4.3)$$

$$-kx = \frac{-dU}{dx} \quad (2.4.4)$$

อินทิเกรตโดยให้พลังงานศักย์เป็นศูนย์ ที่จุดสมดุล

$$\int_0^U dU = \int_0^x kx dx \quad (2.4.5)$$

$$U = \frac{1}{2} kx^2 \quad (2.4.6)$$

แต่ความถี่เชิงมุมของวัตถุที่ติดปลายสปริงคือ $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

$$U = \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \quad (2.4.7)$$

นั่นคือพลังงานศักย์จะเป็นศูนย์ที่ $x = 0$ และมีค่ามากที่สุดที่ $x = \pm A$

พลังงานจลน์ของวัตถุจาก

$$K = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.4.8)$$

เนื่องจากวัตถุเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก $v = -\omega A \sin(\omega t + \phi)$

$$K = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \phi) \quad (2.4.9)$$

$$= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 [1 - \cos^2(\omega t + \phi)]$$

$$K = \frac{1}{2} m \omega^2 (A^2 - x^2) \quad (2.4.10)$$

จะเห็นว่าพลังงานจลน์จะมีค่ามากที่สุดที่จุดสมดุล ($x = 0$) และเป็นศูนย์ที่ $x = \pm A$

ดังนั้นจะได้พลังงานรวมทั้งหมดของการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกอย่างง่ายคือ

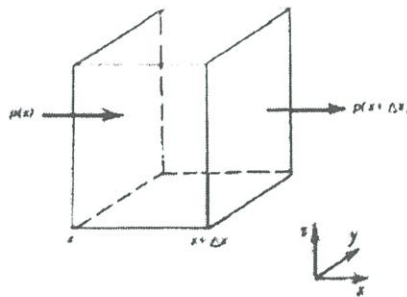
$$E_T = K + U \quad (2.4.11)$$

$$= \frac{1}{2} m \omega^2 (A^2 - x^2) + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2$$

$$= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} k A^2 \quad (2.4.12)$$

2.5 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่น

จากหัวข้อทั้งหมดที่ผ่านมา แสดงให้เห็นถึงพื้นฐานทางฟิสิกส์ของการเคลื่อนที่ของการสั่นหรือคลื่นที่เกิดในวัสดุตัวกลางของแข็ง โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของตำแหน่ง x เทียบกับเวลาที่เกิดการสั่นหรือเวลาที่คลื่นเดินทางไป ในหัวข้อนี้พิจารณาถึงสมการการเคลื่อนที่ของอัลตราโซนิค ซึ่งพิจารณาการเคลื่อนที่ของการสั่นหรือคลื่นกล ทั้งในกรณีเทียบกับเวลา และเทียบกับตำแหน่งแต่การพิจารณาในระบบในความเป็นจริงไม่ได้พิจารณาแค่เพียงอะตอมหนึ่งอะตอมที่ยึดกับแรงสปริง สิ่งที่พิจารณาเป็นอะตอมที่มีอยู่มากกว่าหลายล้านล้านตัวภายในหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังนั้นลองจินตนาการถึง คลื่นเสียงที่ผ่านตัวกลางในทิศทาง x เนื่องจากคลื่นเสียงเป็นคลื่นตามยาว ดังนั้น โมเลกุลหรืออะตอมภายในตัวกลางก็จะอัดและขยายตัวเกิดความแตกต่างของความหนาแน่นภายในวัสดุตัวกลาง และเคลื่อนที่แบบอัดและขยายไปในทิศทางเดียวกับแรงที่มากกระทำ หรือก็คือ เคลื่อนที่ไปในทิศทาง x ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การไหลของมวลในวัสดุหนึ่งหน่วยปริมาตร

จากรูป สมมติเงื่อนไขขอบเขตในการพิจารณาเสียก่อนว่า วัสดุตัวกลางเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันทุกด้าน และเป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกันตลอด (homogeneous) เมื่อได้รับแรงจากคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่มาในทิศทาง x ส่งผลให้เกิดการสั่นภายในปริมาตรของวัสดุทำให้การขจัดของการสั่นของอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง Δx แรงจากคลื่นที่เข้ามากระทำกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุตัวกลาง นิยามว่าเป็น ความแตกต่างของความดันในแต่ละระยะขจัด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$F = [p(x)-p(x-\Delta x)]A \quad (2.5.1)$$

เมื่อ F คือ แรงจากคลื่นเสียงที่มากระทำกับวัสดุ

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ถูกแรงมากระทำ

p คือ ความดันแรงดัน

พิจารณาเงื่อนไขใน 1 มิติ จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันได้ว่า

$$F=ma=m\frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.5.2)$$

เมื่อ m เป็นมวลของวัสดุตัวกลาง เท่ากับ $\rho A \Delta x$ ดังนั้นจากสมการ 2.5.1 สามารถเขียนสมการที่ 2.5.2 ใหม่ได้เป็น

$$\frac{p(x)-p(x+\Delta x)}{\Delta x} = -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.5.3)$$

จากสมการ 2.5.3 เมื่อ U เป็นความเร็ว และ d เป็นระยะขจัด สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \quad (2.5.4)$$

เมื่อพิจารณาความดัน p ใน 1 มิติ สามารถเขียนความดันในรูปกฎของฮุก (Hook's law) ได้ว่า

$$P = -\text{elastic modulus} \times \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.5.5)$$

เมื่อนำสมการ 2.5.4 และ 2.5.5 มารวมกัน จะได้เป็นดังสมการ ต่อไปนี้

$$\frac{\partial^2 d}{\partial x^2} = \frac{\rho}{\text{elastic modulus}} \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \quad (2.5.6)$$

เรียกสมการ 2.5.6 ว่าเป็น สมการการเคลื่อนที่ของคลื่น (wave equation) และจากที่ทราบแล้วว่า ความเร็วคลื่น V จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น และ โมดูลัสของความยืดหยุ่น ดังสมการ

$$v = \sqrt{\frac{\text{elastic modulus}}{\text{density}}} \quad (2.5.7)$$

เราจึงเขียนสมการคลื่นใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 d}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \quad (2.5.8)$$

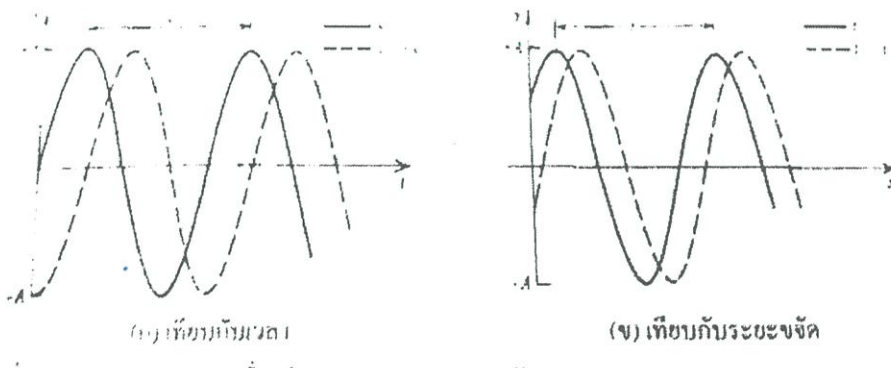
โดยสมการนี้บอกให้ทราบถึงการเคลื่อนที่ของคลื่นว่า ระยะขจัดหรือความดันของคลื่นเสียงจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรต่อเวลาและต่อระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไป โดยคุณสมบัติที่ทำให้คลื่นเดินทางได้ยากหรือง่ายขึ้น ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ ความเร็วคลื่น โดยขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นและความหนาแน่นของวัสดุตัวกลาง ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ เฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด รูปคำตอบของผลเฉลยทั่วไป เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$d = Ae^{i(\omega t \pm kx)} \quad (2.5.9)$$

หรือเขียนในรูปของ sine-cosine เฉพาะจำนวนจริง จะได้เป็นฟังก์ชันของ cosine ดังสมการที่ (2.22)

$$d = A \cos(\omega t \pm kt) \quad (2.5.10)$$

กราฟคำตอบของผลเฉลยของสมการที่ 2.5.10 แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของคลื่นเทียบกับเวลาและระยะขจัด

2.6 ระบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic)

หมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 15 KHz เท่านั้น แต่พวกที่อายุยังน้อย ๆ อาจจะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่านี้ได้คั้งนั้น โดยปกติแล้วคำว่าอัลตราโซนิกจึงมักจะหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz ขึ้นไป จะสูงขึ้นจนถึงเท่าใดไม่ได้ระบุจำกัดเอาไว้

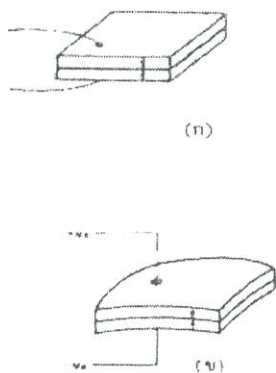
สาเหตุที่มีคนนำเอาคลื่นย่านอัลตราโซนิกมาใช้ก็เพราะว่าเป็นคลื่นที่มีทิศทางทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจงเรื่องนี้เป็นคุณสมบัติของคลื่นอย่างหนึ่งยังคลื่นมีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นก็จะยิ่งสั้นลงถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิด (ที่ให้เสียงนั้นออกมา) ของตัวกำเนิดเสียงความถี่นั้นเช่น คลื่นความถี่ 300 Hz ในอากาศจะมีความยาวถึงประมาณ 1 เมตรเศษ ๆ ซึ่งจะยาวกว่าช่องที่ให้คลื่นเสียงออกมาจากตัวกำเนิดเสียงโดยทั่วไปมากมายคลื่นจะหักเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียงทำให้เกิดการกระจายทิศทางคลื่นแต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาอยู่ในย่านอัลตราโซนิกอย่างเช่น 40 KHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียงประมาณ 8 มม. เท่านั้นซึ่งเล็กกว่ารูเปิดของตัวที่ให้กำเนิดเสียงความถี่นี้มากคลื่นเสียงจะไม่มีผลเลี้ยวเบนที่ขอบจึงพุ่งออกมาเป็นลำแคบๆ หรือที่เราเรียกว่า มีทิศทาง

การมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิกทำให้เรานำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่นนำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic remote control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic cleaner) โดยให้น้ำสั่นที่ความถี่สูงเครื่องวัดความหนาของวัตถุโดยส่งแก่ระยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมาเครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ท้องทะเลใช้ในเครื่องหาตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกาย ใช้ทดสอบการรั่วไหลของท่อ เป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น คลื่นเสียงต้องเดินทางผ่านอากาศแล้วความถี่ที่ใช้ก็มักจะจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 KHz เพราะที่ความถี่สูงขึ้นไปอากาศจะดูดคลื่นเสียงเพิ่มขึ้นมากทำให้ระดับความแรงของคลื่นเสียงที่ระยะห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็วส่วนการใช้งานด้านการแพทย์ซึ่งต้องการรัศมีทำการสั้น ๆ ก็อาจใช้ความถี่ในช่วง 1 MHz ถึง 10 MHz ขณะที่ความถี่เป็น GHz (10^9 Hz) ก็มีใช้กันในหลายๆการใช้งานที่ตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านไม่ใช่อากาศ อุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานในรูปอื่นให้มาเป็นพลังงานทางกลโดยการสั่นไปมาซึ่งทำให้เกิดคลื่น

เสียงย่านอัลตราโซนิกกระจายไปในอากาศได้หรือแปลงพลังงานทางกลให้มาเป็นพลังงานในรูปอื่นได้นั้นมีชื่อเรียกว่า อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer) ในปัจจุบันอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับหลักการที่ใช้แบบที่นิยมใช้กันมากได้แก่

- แบบเปียโซอิเล็กทริก (Piezo-electric Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานทางกลโดยมีความถี่เรโซแนนซ์คงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง
- แบบแมกนีโตสตริกทีฟ (Magnetostrictive Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าในขดลวดกับตำแหน่งความยาวของแกนเหล็กที่สวมขดลวดนั้นอยู่
- แบบอิเล็กโตรสตริกทีฟ (Electrostrictive Transducer) ซึ่งแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานทางกล

ทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริกภายในตัวอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริกแบบที่มีใช้กันในปัจจุบันซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นมาในระดับหนึ่งแล้วจะประกอบด้วยชั้นสารเซรามิกสี่เหลี่ยมซึ่งมีผิวโลหะเงินฉาบอยู่ทั้ง 2 หน้าเพื่อให้ต่อสายไฟออกมาเป็นขา 2 ขา ชั้นสารเซรามิกนี้ประกอบขึ้นจากสารเซรามิก 2 ชั้นประกบกันอยู่โดยวางให้ขั้วโคโพลทางไฟฟ้าภายในอะตอมของมันมีทิศทางตรงข้ามกันดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7

(ก) โครงสร้างภายในตัวอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริกที่ใช้สารเซรามิก

(ข) เมื่อป้อนแรงดันให้แก่ตัวมันจะทำให้ชั้นสารเซรามิกโค้งงอไปมาทำให้เกิดคลื่นเสียงอุลตราโซนิกกระจายไปในอากาศ

ชั้นสารเซรามิกถูกยึดติดภายในตัวถังอย่างดีเพื่อไม่ให้เกิดการสั่นขณะที่มีมันทำงานอยู่ได้รับผลกระทบกระเทือนจากภายนอกตัวถังมักจะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางและมีความสูงประมาณ 1 ถึง 2.5 ซม. ด้านหน้าทำเป็นช่องเปิดมีตะแกรงติดอยู่เพื่อให้คลื่นอุลตราโซนิกเข้ามาหรือออกจากช่องเปิดได้โดยสะดวกถ้าตัวถังทำมาจาก โลหะก็ควรต่อตัวถังลงกราวด์เพื่อทำหน้าที่ชิลด์สำหรับบางยี่ห้อเขาจะต่อขาหนึ่งติดกับตัวถังมาให้เลย เมื่อพลิกดูขา 2 ขาที่โผล่ออกมาจากตัวถังจะเห็นมีขาหนึ่งติดกับตัวถังเมื่อมีสัญญาณแรงดันมาตกคร่อมขั้วทั้งสองของชั้นสารเซรามิกดังรูป (ข) จะทำให้ชั้นสาร โค้งงอมากหรือน้อยหรือในทิศทางใดตามขนาดและทิศทางการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณนั้นๆทำให้เกิดการกดอัดอากาศโดยรอบเกิดเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณนั้นออกไปโดยทั่ว ๆ ไปกำลังเอาท์พุทที่ออกมาจะตกประมาณ 10% ของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปแต่กำลังเอาท์พุทจะสูงสุดที่ค่าประมาณนี้ต่อเมื่อความถี่ของสัญญาณตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งเป็นความถี่ทางกลตามธรรมชาติของชั้นสารเซรามิกนั้นๆ ส่วนที่ความถี่อื่น ๆ กำลังเอาท์พุทจะลดลงกว่านี้มาก

ในการทำงานกลับกันเมื่อมีคลื่นเสียงที่มีความถี่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของชั้นสารเซรามิกเข้ามาจะทำให้ชั้นสาร โค้งงอไปมาและเกิดสัญญาณแรงดันซึ่งมีขนาดเล็กขึ้นมารวมขั้วทั้งสองของตัวมันเองได้คุณสมบัติโดยทั่วไปของอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริกก็คือมีค่าความต้านทานไฟตรงสูงมากอาจสูงถึง 100 MW เรียกว่าถ้าเอาอิมิตเตอร์ธรรมดามาตั้งสเกลวัดค่าความต้านทานสูง ๆ เข็มจะไม่กระดิกเลย แต่ในขณะที่มันทำงานความต้านทานทางด้านไฟสลับจะลดลง

2.7 ตัวส่งและตัวรับ

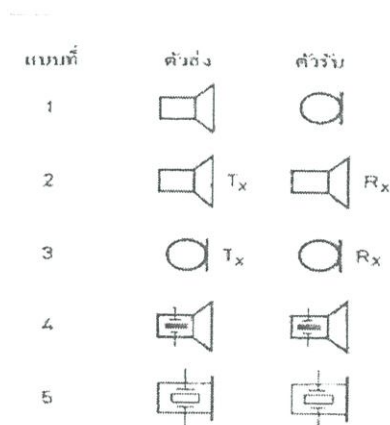
ทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริกที่ใช้สารเซรามิก (หรือที่ผู้ผลิตบางรายเรียกว่าอุลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบเซรามิก) จะมีอยู่ 2 อย่าง คือ ตัวส่งหรือ Transmitter และ ตัวรับ (เสียง) หรือ Receiver

2.8 ตัวส่ง

อูลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่ถูกออกแบบเจาะจงมาให้แปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุให้ ออกมาเป็นคลื่นเสียงย่านอูลตราโซนิก หน้าที่ของตัวส่งจึงคล้าย ๆ กับเป็นลำโพง

2.9 ตัวรับ

อูลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่ถูกออกแบบเจาะจงมาให้แปลงคลื่นเสียงย่านอูลตราโซนิกที่มา ตกกระทบตัวมันให้ออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าหน้าที่ของตัวรับจึงคล้าย ๆ กับเป็นไมโครโฟนด้วยเหตุนี้ เวลาเขียนสัญลักษณ์ของอูลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์จึงนิยมเขียนตามหน้าที่ของมันคือถ้าเป็นตัวส่งก็ เขียนสัญลักษณ์เป็นลำโพงถ้าเป็นตัวรับก็เขียนสัญลักษณ์เป็นไมโครโฟน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างการเขียนสัญลักษณ์ของอูลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบต่างๆกัน

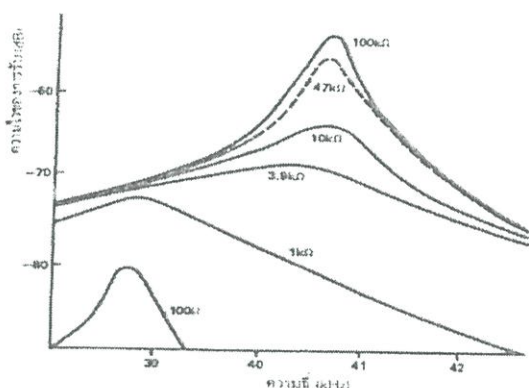
อูลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์แบบเซรามิกที่มีจำหน่ายกันจะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ให้เลือก ตั้งแต่ 23 KHz ขึ้นไปจนถึง 40 KHz แต่ที่พบเห็นกันบ่อยก็มี 23 KHz, 25 KHz, และ 40 KHz โดย ความถี่ 40 KHz เป็นรุ่นที่นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะมีทิศทางดีกว่า

2.10 ข้อควรรู้ในการใช้งานตัวส่งและตัวรับ

เนื่องจากสเปคตลอดจนรายละเอียดต่าง ๆ ของอุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์หาได้ยากดังนั้นจึงสามารถที่จะสรุปสิ่งที่ควรรู้ในขั้นต้นของอุปกรณ์อุลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์เพื่อเป็นแนวทางในการใช้งานดังนี้

1. ไม่ควรให้ตัวทรานสดิวเซอร์ได้รับการกระแทกหรือตกจากที่สูงเพื่อป้องกัน โครงสร้างภายในมิให้เสียหาย
2. ทรานสดิวเซอร์ที่มีขายกันโดยทั่วไปจะทนแรงดันตกคร่อมตัวมันสูงสุดได้ไม่เกินกว่า $20 V_{rms}$ ดังนั้นขนาดของสัญญาณที่จะป้อนให้กับทรานสดิวเซอร์ก็ควรจะอยู่ในขีดจำกัดอันนี้
3. ความถี่เรโซแนนซ์ (ความถี่ที่ตัวมันทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด) ของทรานสดิวเซอร์ 40 KHz ที่มีขายกันโดยทั่วไปจะผิดพลาดไปไม่เกิน ± 1 KHz และมีแถบความถี่ (Bandwidth) ประมาณ 4.5 KHz สำหรับตัวส่ง และมีแถบความถี่ประมาณ 5.0 KHz สำหรับตัวรับจะเห็นได้ว่าแถบความถี่ของตัวรับจะกว้างกว่าของตัวส่งอยู่เล็กน้อยเพื่อให้แน่ใจว่าตัวรับจะสามารถรับความถี่ทั้งหมดที่ออกมาจากตัวส่งได้
4. อุณหภูมิใช้งานของตัวทรานสดิวเซอร์ควรอยู่ในช่วง $-20^{\circ} C$ ถึง $+60^{\circ} C$
5. ทั้งตัวส่งและตัวรับจะมีทิศทางการเคลื่อนย้ายคลึงกันมากกล่าวคือที่ตำแหน่งเบนจากแนวแกนของตัวส่งไปประมาณ 30° ความแรงของคลื่นเสียงที่ถูกส่งออกไปจะลดลงจากแนวแกนประมาณ 10 dB ในทำนองเดียวกันถ้าคลื่นเสียงพุ่งเข้ามาในแนวที่เบี่ยงเบนไปจากแนวแกนของตัวรับไปประมาณ 30° ความไวหรือขนาดแรงดันที่ออกมาจะลดลงไปประมาณ 10 dB ด้วยเช่นกันดังนั้นในการใช้งานที่เป็นการควบคุมระยะไกลในที่โล่งแจ้งจึงควรพยายามให้ทั้งตัวรับและตัวส่งอยู่ในแนวที่พุ่งตรงเข้าหากันให้มากที่สุด อย่างไรก็ตามในกรณีที่อยู่ในห้องอาจจะเบี่ยงเบนจากกันได้เล็กน้อยเพราะคลื่นเสียงอุลตราโซนิคสามารถสะท้อนกับกำแพง พื้น และวัตถุที่อยู่ในห้องทำให้คลื่นเสียงเข้าไปหาตัวรับได้หลายทาง
6. ในกรณีที่ใช้งานตัวรับจะต้องมีตัวต้านทานต่อขนานกับตัวรับเพื่อทำหน้าที่เป็นโหลดตามปกติแล้วตัวต้านทานตัวนี้ควรมีค่าอยู่ในช่วงจาก 10 kW – 100 kW จากการทดลองพบว่าถ้าเปลี่ยนโหลดจาก 100 kW มาเป็น 10 kW ความไวจะลดลงประมาณ 10 ถึง 20 dB แต่แถบความถี่จะกว้างขึ้น ถ้าใช้ค่าความต้านทานต่ำลงไปอีกความถี่เรโซแนนซ์ (ความถี่กลาง) จะลดลงไปจากที่ระบุไว้ถ้าการใช้งานมี

7. สัญญาณรบกวนมากควรใช้โพลด์ที่มีความต้านทานสูงสักหน่อยเพื่อให้ตัวส่งมีความไวสูงและมีแถบความถี่แคบ ตัวอย่างการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 2.9

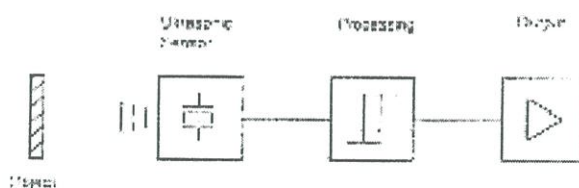


รูปที่ 2.9 แสดงผลการทดลองตัวรับตัวหนึ่งโดยลองเปลี่ยนโพลด์เป็นค่าต่าง ๆ กันแล้วป้อนคลื่นเสียงความถี่ต่างๆกันเข้ามา

8. ตามปกติแล้วเราสามารถนำเอาตัวส่งและรับมาใช้งานแทนกันได้ในการใช้งานส่วนใหญ่และตัวส่งหรือตัวรับของยี่ห้อใด รุ่นใด ก็สามารถที่จะนำมาใช้แทนกันได้ในงานส่วนใหญ่ขอเพียงแต่ให้มีความถี่เรโซแนนซ์เดียวกันเท่านั้นเองอย่างไรก็ตามในบางกรณีอาจต้องเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสมมูลทางด้านไฟสลับเพื่อให้ลักษณะผลตอบแทนของทางความถี่สอดคล้องกับของเดิม

2.11 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์หน้าที่และการทำงาน

รูปแบบต่าง ๆ ของอุลตราโซนิกเซ็นเซอร์ประกอบด้วย ตัวตรวจจับด้วยคลื่นอุลตราโซนิก ชุดส่งสัญญาณชุดประมวลผล และชุดเอาต์พุต ดังรูปที่ 2.10

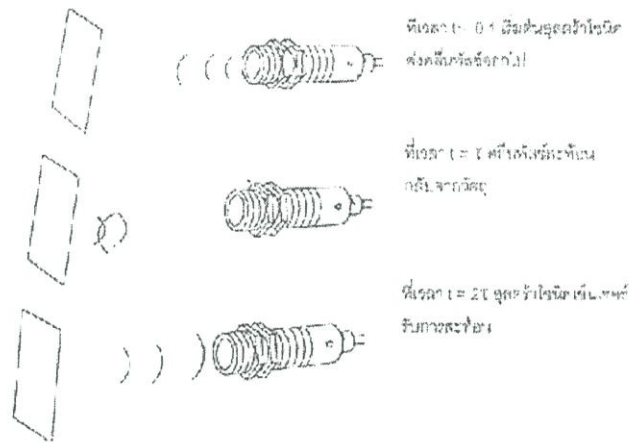


รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของอุลตราโซนิก

มักจะใช้เป็นภาครับ และ ภาคส่งอาจมีระบบซึ่งประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ แยกกันอยู่ 2 ส่วน ในระหว่างการทำงานเซ็นเซอร์จะทำการส่งสัญญาณเสียงซึ่งเรียกว่า “ซาวด์พาร์เซลส์” (Sound parcels) ให้ขบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ ของเวลาทำงานไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีการรับการสะท้อนครั้งแรกเกิดขึ้น

2.12 วงจรส่งผ่าน / รับ

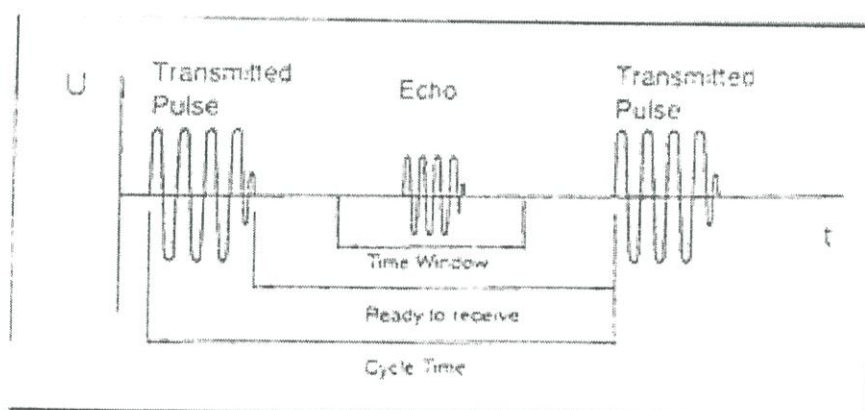
สำหรับการทำงานเป็นวงจรของอุลตราโซนิคเซ็นเซอร์จะส่งผ่านคลื่นพัลส์เสียงในช่วงเวลาสม่ำเสมอ หรือช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงคลื่นเสียงที่ปล่อยออกไปจะถูกสะท้อนได้โดยวัตถุที่เหมาะสม โดยเซ็นเซอร์และระบบการทำงานจะรับการสะท้อนของคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับมา (ดังแสดงในรูปที่ 2.11) ความกว้างของคลื่นพัลส์ของเสียงอยู่ในช่วง 2 - 200 ไมโครเซท



รูปที่ 2.11 การส่งและรับสัญญาณอุลตราโซนิคเซ็นเซอร์

เวลาในการเดินทางของคลื่นพัลส์ของคลื่นเสียงเป็นการวัดระยะห่างจากวัตถุที่ขึ้นอยู่กับนชนิดของเซ็นเซอร์ ระยะห่างนี้นำไปแสดงในรูปของ สัญญาณอนาล็อก (Analogue Signal) (เช่น 0 - 20 mA) สัญญาณลอจิก (Logic Signal) (เช่น สัญญาณลอจิก 8 bit) ตลอดจน ซีเรียลอินเตอร์เฟส (Serial Interface) (RS232) หรือการเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงในรูปของสวิทช์พัลส์ที่เรียกว่า ไทม์เฟรม (Time

Frame) เนื่องจากขบวนการดำเนินไปตามเวลาที่คลื่นสะท้อนเดินทางไม่ใช่เป็นไปตามความเข้มของคลื่นสะท้อน จึงจัดได้ว่าอัลตราโซนิกเซ็นเซอร์มีข้อดีเหนือกว่าเซ็นเซอร์แบบออปติคัล (Optical Sensor) เวลาที่คลื่นสะท้อนการเดินทางจะทำให้ขบวนการดำเนินโดยไม่ขึ้นกับความเข้มของคลื่นสะท้อนตรงเท่าที่วัตถุยังคงสะท้อนคลื่นที่สามารถตรวจจับได้ออกมาดังนั้นคุณลักษณะการสวิตช์ไม่เปลี่ยนไปแม้ในสถานะที่การสะท้อนเป็นไปอย่างไม่ดีคลื่นสะท้อนที่อ่อนจะมีผลต่อความถูกต้องในการตรวจจับวัตถุซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถทำการตรวจจับวัตถุได้เลยความเร็วที่เปลี่ยนไปของคลื่นพัลส์ของเสียงมีผลกระทบต่อพิสัย การทำงานของสวิตช์ (ระยะทาง) โดยตรงเซ็นเซอร์ทำงานด้วยวงจรเวลาที่คงที่ (เช่น $t = 20 \text{ ms}$) จะส่งคลื่นเสียงออกมาอย่างสม่ำเสมอ (ดังแสดงในรูปที่ 2.12) ดังนั้นวงจรเวลาจะเป็นตัวกำหนดช่วงและวงจรการทำงานของสวิตช์ของเซ็นเซอร์

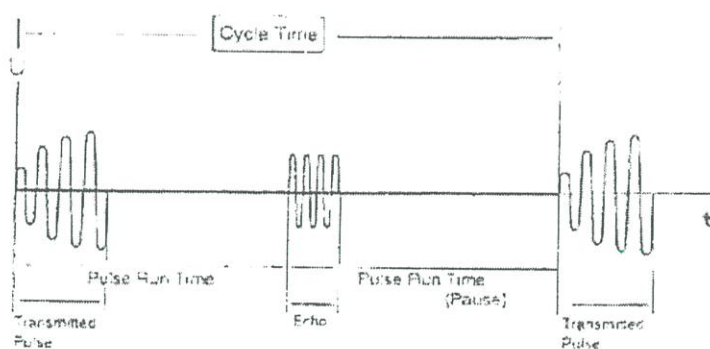


รูปที่ 2.12 อัลตราโซนิกเซ็นเซอร์, วงจรเวลาคงที่

ยกตัวอย่างเช่นคลื่นเสียงที่มีความเร็ว $v = 340 \text{ m/s}$ (20°C) ในช่วงเวลา $t = 20 \text{ ms}$ (50 Hz) จะเดินทาง $S = Vxt = 6.8 \text{ m}$ เนื่องจากระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์และวัตถุที่ได้จากการทำงานของเซ็นเซอร์คิดที่ไปและกลับจึงได้ระยะทางจริงสูงสุดสำหรับวงจรเวลานี้เป็น 3.4 m แอมพลิจูดของส่วนของคลื่นเสียงและซิวิตตี้ (Sensitivity) ของตัวรับต้องมีการพิจารณาเลือกใช้เพื่อให้คลื่นสะท้อนที่เดินทางมาถึงหลังจากเวลาของวงจรเวลาที่

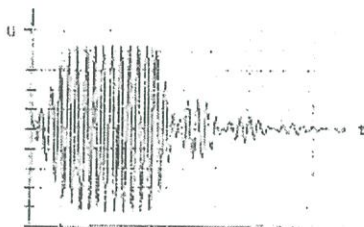
กำหนดไปแล้วจะไม่ได้รับการตรวจจับเนื่องจากคลื่นสะท้อนนั้นอ่อนมากซึ่งสัญญาณคลื่นนี้จะทำให้เซ็นเซอร์สวิตช์มีการทำงานผิดพลาดหรือให้ข้อมูลที่ผิด เช่น เซ็นเซอร์แบบ อนุาลอก (Analog Sensor) เพื่อให้การตรวจจับวัตถุเป็นไปอย่างถูกต้องวัตถุต้องอยู่นิ่งเป็นเวลาที่พอเพียงสำหรับสำหรับสะท้อนอย่างน้อย 1 ส่วนของคลื่นเสียงภายในขอบเขตที่เซ็นเซอร์จะทำงานได้รอบมากที่สุดของการสวิตช์ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงกับอัตราส่วนของวัตถุต่อที่ว่างและจะพิจารณาให้มีค่าน้อยกว่ารอบของความถี่ที่จุดนี้เวลาที่ขยายจะสิ้นสุดระหว่างการส่งผ่านของพัลส์และการรับคลื่นสะท้อนแรกจะถูกนำไปใช้วัดสำหรับวงจรเวลาเมื่อเวลาดำเนินไปเท่ากับเวลาที่คลื่นสะท้อนเดินทางไป และกลับสิ้นสุดส่วนของคลื่นสะท้อนต่อไปจะถูกส่งออกการหยุดลงชั่วขณะของเวลาพิเศษที่คลื่นเดินทางทำขึ้นเพื่อลดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่ดำเนินมาจากตรวจจับวัตถุมากกว่าหนึ่งระยะ โดยเซ็นเซอร์สามารถถูกปรับให้เหมาะสมตามสภาพแวดล้อมซึ่งหมายถึงสำหรับการตรวจจับวัตถุที่อยู่ไกลเวลาการเดินทางจะนานเป็นผลให้

ต้องการความถี่ต่ำในทางตรงกันข้ามความถี่ของวงจรจะเพิ่มขึ้นเมื่อวัตถุเข้าใกล้เซ็นเซอร์ทำงานให้วงจรเวลาสั้นลงและพลังงานที่ส่งออกไปสามารถปรับในช่วงเวลาของคลื่นเสียงที่ปล่อยไปเวลาที่เพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดเมื่อมีการสวิตช์ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 อุลตราโซนิคเซ็นเซอร์ , วงจรที่เปลี่ยนแปลงได้

ทรานส์คิวเซอร์จะถูกใช้สำหรับพลังงานที่ส่งออกไป (ดังแสดงในรูปที่ 2.14) ดังนั้นคลื่นสะท้อนเบื้องหลังสามารถควบคุมได้ด้วยการลดพลังงานในการส่งผ่านวัตถุที่อยู่ใกล้เซ็นเซอร์

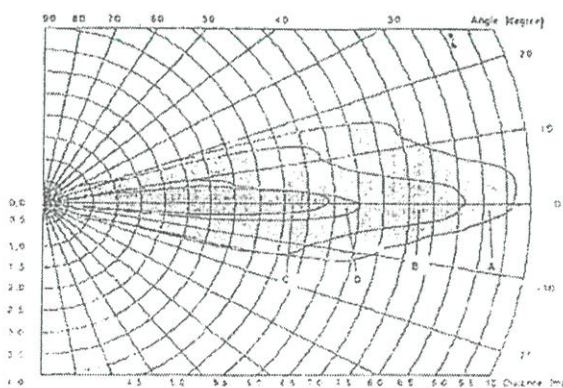


รูปที่ 2.14 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์ทรานส์ดีวเซอร์แบบขึ้นส่วนการอิมพัลส์ (Impulse) (แตกออก)

ที่ 170 MHz

2.13 การลดสัญญาณรบกวนและสภาวะการทำงาน

ผลที่เกิดจากคลื่นรบกวนและการทรอดแทรกในการประยุกต์ใช้อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์คือการตรวจจับวัตถุได้แต่ระยะที่ใกล้กับเซ็นเซอร์และไม่สามารถตรวจจับวัตถุที่มีการสะท้อนได้ไม่ดี เนื่องจากความจริงที่ว่าคลื่นอุลตราโซนิกจะสะท้อนได้จากวัตถุเกือบทุกชนิด และง่ายต่อการเบี่ยงเบนวัตถุเหล่านั้นจะทำให้สวิทช์เปิด-ปิดเมื่อเข้าใกล้บริเวณที่เซ็นเซอร์สามารถตรวจจับได้ดังกราฟทำนายคุณลักษณะของเซ็นเซอร์ (ดังรูปที่ 2.15)



รูปที่ 2.15 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์ , คุณลักษณะการตรวจจับ

เพื่อหาคุณลักษณะของวัตถุชนิดต่างๆ จะวางในตำแหน่งของวัตถุในระยะห่างเท่า ๆ กันที่มุมตั้งฉากกับแนวแกนของเซ็นเซอร์จุดที่สวิทช์ทำงานก็จะถูกกำหนดขึ้น ตัวอย่างวัสดุที่ใช้คือ

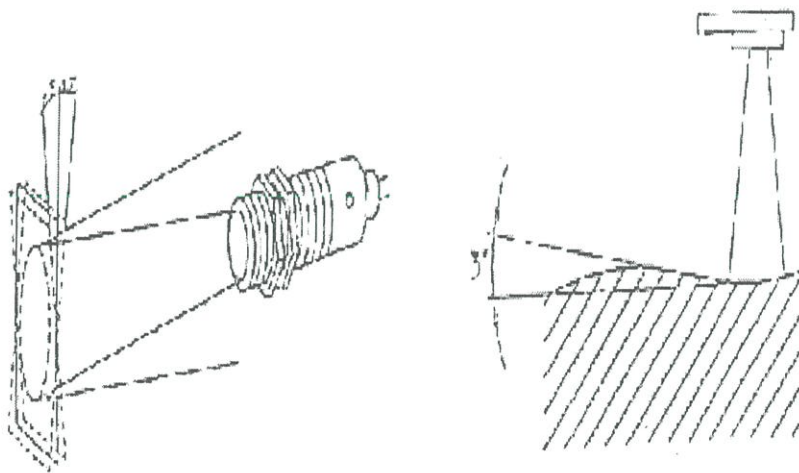
A : แผ่นงานขนาด 700 x 700 mm.ขอบเขตที่อยู่ด้านนอกส่วนโค้งชั้นนี้โดยปกติจะไม่มีวัตถุตรวจจับได้

B : แผ่นงานขนาด 100 x 100 mm.แผ่นงานอ้างอิงมาตรฐานกำหนดโดยข้อมูลทางเทคนิคทั่วไป

C : ท่อพลาสติก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 160 mm.คลุมด้วยสั๊กพลาสติกใช้เป็นตัวแทนมาตรฐาน

D : แท่นไม้ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm.วัสดุทดสอบเช่นระยะความปลอดภัยย้อนกลับในยานพาหนะ

เพื่อให้ปราศจากปัญหาในการทำงานจะไม่มีวัสดุอื่นใดที่ไม่ใช่เป้าหมายในขอบเขตนอกสุดในทางกลับกันวัตถุเป้าหมายต้องอยู่ภายในบริเวณพื้นที่ที่สามารถตรวจจับได้ทั้งขนาดรูปร่าง เพื่อป้องกันปัญหาการตรวจจับคลื่นเสียงพื้นผิวของวัตถุควรมีขนาดใหญ่เท่าที่จะเป็นได้ราบเรียบ และมีมุมเอียงไม่เกิน 3 กับแกนของเซ็นเซอร์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.16) จากข้อกำหนดดังกล่าวเมื่อทำการตรวจจับวัตถุทรงกลม หรือวัตถุผิวไม่เรียบ (ของเหลว, ของผสม) ก็จะเกิดปัญหาขึ้น

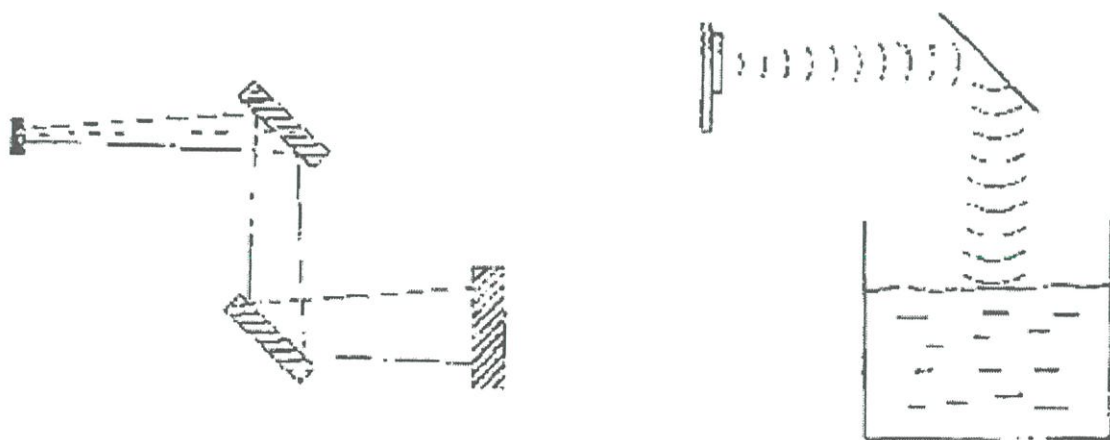


รูปที่ 2.16 อนุตร้าโซนิกเซ็นเซอร์,พื้นผิวตรง



รูปที่ 2.17 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์, การตรวจจับสิ่งของ

อุลตราซาวด์สามารถนำมาเบี่ยงเบนด้วยตัวสะท้อนอย่างง่าย ที่ทำจากวัสดุใด ๆ (ดังแสดงในรูปที่ 2.18) พื้นที่ตรวจจับยังคงเท่าเดิมทำให้ใช้กับตัวสะท้อนขนาดใหญ่ได้โดยใช้ตัวเบี่ยงเบนไม่เกิน 2 ตัว ติดตั้งภายในทางเดินของคลื่นเสียงในแนวทางเดินตั้งฉากอย่างถูกต้อง

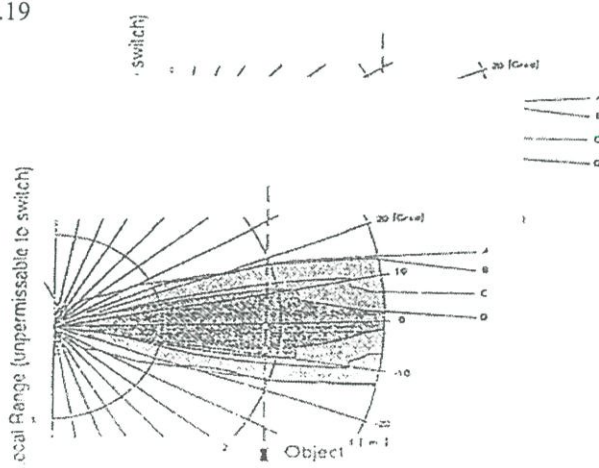


รูปที่ 2.18 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์ , การเบี่ยงเบนคลื่นเสียง

ด้วยวิธีนี้สามารถนำไปใช้ป้องกันป้องกันเซ็นเซอร์จากการใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่เป็นอันตราย ต่อเซ็นเซอร์และทำให้ลดคลื่นสะท้อนที่ไม่ต้องการจากวัตถุการรวมคลื่นเสียงผ่านม่านกัน หรือท่อโดย

ปกติไม่สามารถทำได้เนื่องจากการหักเหของแสง บนขอบ และกำแพงเพื่อหลีกเลี่ยงการสอดแทรกจากเครื่องมือที่ให้กำเนิดคลื่นเสียงอื่น ๆ สัญญาณที่รับได้จะถูกทดสอบความถี่ในตัวเองวิธีการนี้ไม่สามารถทำให้สำเร็จได้เมื่อใช้เซ็นเซอร์ชนิดเดียวกัน (ทรานซ์ควิเซอร์และความถี่ชนิดเดียวกัน) หรือมีย่านรบกวนกว้าง (เช่น ในอากาศอัด) สอดแทรกกันเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบระหว่างเซ็นเซอร์จะต้องมีการติดตั้งที่ระยะปลอดภัยคลื่นรบกวนกับแอมพลิฟายเออร์ขนาดใหญ่สามารถปิดกั้นเซ็นเซอร์ไม่ให้รับคลื่นสะท้อนที่อ่อนกว่าคลื่นรบกวนได้

เซ็นเซอร์บางชนิดแก้ปัญหาการสอดแทรกนี้โดยสัญญาณเตือนที่เข้าที่พู่ที่แยกต่างหากเพื่อเป็นการชดเชยการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเสียงจากอุณหภูมิที่ขึ้น ๆ ลง ๆ เช่นเซ็นเซอร์บางชนิดจึงรวมเอาเซ็นเซอร์อุณหภูมิเข้าไปด้วยโดยจะทำการวัดอุณหภูมิบริเวณเซ็นเซอร์ และวัตถุ (ระยะสูงสุด 6 m) ขบวนการหลาย ๆ ขบวนการของสัญญาณที่ช่วยในการเกิดคลื่นรบกวนที่เกิดขึ้นเป็นครั้งคราว เช่นคลื่นรบกวนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอากาศ หรือคลื่นรบกวนกับคลื่นอุลตราซาวด์ที่มีองค์ประกอบมาก (ในอากาศ, เครื่องจักรกล) ด้วยวิธีการนี้เอาที่พู่ที่ได้จากการเซ็นเซอร์จะถูกกระตุ้นเมื่อจำนวนของคลื่นสะท้อนมีความเข้มข้นเดียวกันและในการเดินทางเท่ากันได้ถูกรับเอาไว้ ข้อเสียคือความถี่ของการทำงานค่อนข้างลดลงเมื่อทำการตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านอย่างรวดเร็วผ่านจุดที่ทำมุมตั้งฉากกับแกนของเซ็นเซอร์ในกรณีนี้ความเร็วของวัตถุที่ยอมรับได้กำหนดมาจากระยะห่างของวัตถุและระยะห่างจากเซ็นเซอร์ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 อุลตราโซนิกเซ็นเซอร์, ความเร็วของวัตถุที่ยอมรับได้

หากมีวัตถุมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความยาวของแต่ละด้านเท่ากับ 100 mm.(แผ่นงานอ้างอิงมาตรฐานส่วนโค้ง B) ในระยะห่าง 2 m จากเซ็นเซอร์พร้อมกับย่านความไว 3 m นั้น ต้องการตรวจจับด้วยเซ็นเซอร์จะต้องมีเวลาปฏิกิริยา 280 ms. การพิจารณาประยุกต์ใช้งานดังนี้

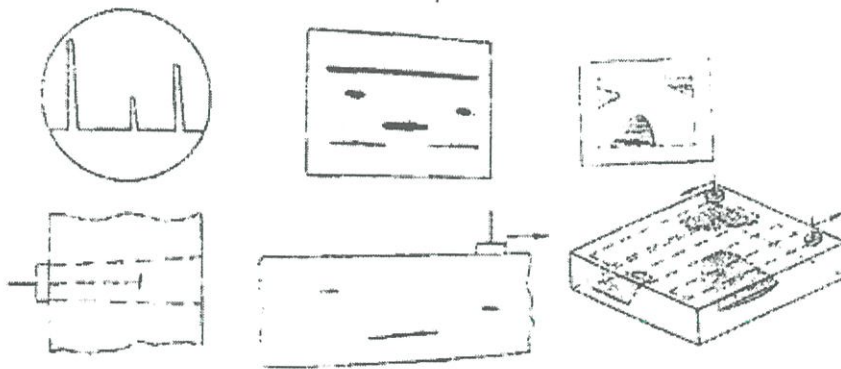
ระยะเวลาช่องวัตถุในการตรวจจับ (ดังแสดงไว้ในกราฟด้านบน) : 1.24 m. เวลาค้นหาที่น้อยที่สุดที่ภายในช่วงการทำงานของเซ็นเซอร์ (เวลาปฏิกิริยา) : 280 ms. ความเร็วสูงสุด $v = s/t = 1240 \text{ mm} / 280 \text{ ms} = 4.43 \text{ m/s}$. เพื่อที่จะตรวจจับแท่งไม้ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 mm. (ส่วนโค้ง D) ได้ในระยะ 3 m เราใช้การคำนวณดังนี้ $s = 0.19 \text{ m}$, $t = 280 \text{ ms}$, $v = 0.68 \text{ m/s}$

บทที่ 3

วิธีการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

3.1 ความหมายของภาพถ่ายอัลตราโซนิก

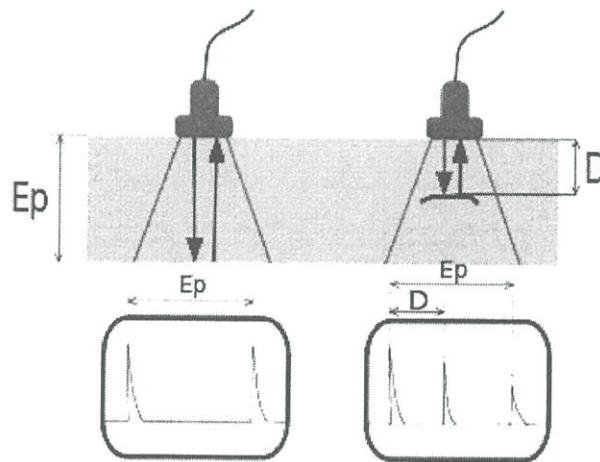
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อต้นว่าภาพถ่ายของอัลตราโซนิกแบ่งออกเป็น 3 แบบหลักๆขึ้นอยู่กับวิธีการสแกนหัวอัลตราโซนิกโพรบ ได้แก่ การสแกนแบบ เอ-สแกน บี-สแกน และซี-สแกน แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยพื้นฐานการตีความหรือแปลความหมายของภาพถ่าย เราจะศึกษาในกรณีของ เอ-สแกนเป็นหลัก ซึ่งภาพถ่ายแบบเอ-สแกน แสดงสัญญาณที่ตำแหน่งเพียงจุดเดียวจะช่วยสร้างความเข้าใจและให้ความหมายในการตีความภาพถ่ายของวัสดุที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ส่วนหลักการตีความภาพถ่ายจากเทคนิคตรวจสอบแบบ บี-สแกน และซี-สแกน เป็นการนำสัญญาณจากเอ-สแกน มาวิเคราะห์เพิ่มเติมในแนว 1 มิติและ 2 มิติ ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายแบบ เอ-สแกน บี-สแกน และซี-สแกน

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาการตีความของสัญญาณที่ได้จากการตรวจสอบวัสดุด้วยเทคนิค เอ-สแกน ที่ได้จากการวัดด้วยอัลตราโซนิกแบบพัลส์-สะท้อนกลับ รูปที่ 3.2 เป็นลักษณะของข้อบกพร่องในเนื้อชิ้นงานแบบต่างๆ พิจารณาจากรูปที่ 3.2 สัญญาณแบบพัลส์-สะท้อนกลับพื้นฐานจะประกอบไปด้วย (1) การสะท้อนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างอัลตราโซนิก โพรบกับชิ้นงาน (2) การสะท้อนกลับของ

คลื่นเมื่อเคลื่อนที่ชนกับผนังของชิ้นงาน และ (3) เกิดการสะท้อนเนื่องจากมีข้อบกพร่องอยู่ภายใน ในกรณีที่มีจุดบกพร่องมากกว่าหนึ่งจุด ลักษณะของสัญญาณอัลตราโซนิกแบบ เอ-สแกน แสดงดังรูปที่ 3.2 และ ในกรณีที่มีรอยร้าวหรือความไม่ต่อเนื่องที่มีขนาดใหญ่กว่าลำคลื่นอัลตราโซนิกซึ่ง ดูคลื่นพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกไปมาก คลื่นอัลตราโซนิกที่ยังคงวิ่งต่อด้วยพลังงานที่เหลืออาจมีความเข้มไม่พอที่จะวิ่งสะท้อนกลับมายังหัวอัลตราโซนิกโพรบลักษณะของกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ในการตรวจสอบวัสดุชิ้นงานจริง ข้อบกพร่องหรือรอยร้าวต่างๆ รวมถึงผนังของชิ้นงาน อาจไม่มีรูปร่าง ตั้งฉากกับลำคลื่นเสมอไป สัญญาณที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 และ 3.2 ตามลำดับ และกรณีสุดท้ายเมื่อ วัสดุชิ้นงานมีข้อบกพร่องที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของการเกิดการกระเจิงของลำคลื่นอัลตราโซนิกลักษณะของภาพถ่ายแสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะของข้อบกพร่องและภาพถ่ายแบบ เอ-สแกน

จากภาพถ่ายในรูปที่ 3.2 พบว่าสัญญาณหรือภาพถ่ายที่สร้างขึ้น สามารถตีความได้สองประเด็นด้วยกัน ได้แก่ (ก) การตีความจากผลของแอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับ ซึ่งแสดงถึงการมีหรือไม่มีจุดบกพร่องในเนื้อวัสดุ ขนาดของแอมพลิจูดบอกถึงขนาดของจุดบกพร่องและอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างจากอิมพีแดนซ์ของเนื้อวัสดุ และ (ข) คาบเวลาเป็นการแสดงระยะทางหรือตำแหน่งที่มีจุดบกพร่องในเนื้อวัสดุชิ้นงานทดสอบ สามารถคำนวณได้จากสมการฟิสิกส์พื้นฐาน

$$2d=vt \longleftrightarrow d=vt/2 \quad (3.1)$$

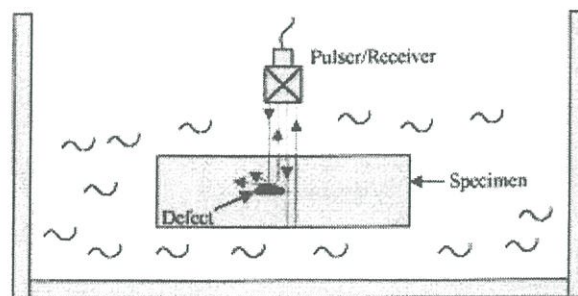
เมื่อ d เป็นระยะทางหรือตำแหน่งของจุดบกพร่อง หน่วยเป็นเมตร

v เป็นความเร็วเสียงของวัสดุชิ้นงาน หน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

t เป็นคาบเวลาที่วัดจากตำแหน่งสะท้อนที่ผิวหน้าถึงตำแหน่งที่เกิดจุดบกพร่อง (roundtriptransittime) หน่วยเป็น วินาที

เนื่องจากการเคลื่อนที่ไปและกลับ ดังนั้นระยะทางที่ได้จึงเป็นสองเท่าของระยะทางจริง ดังนั้นในสมการที่ (3.1) จึงต้องหารผลคูณระหว่างความเร็วเสียงและเวลาในการเคลื่อนที่ด้วยสอง

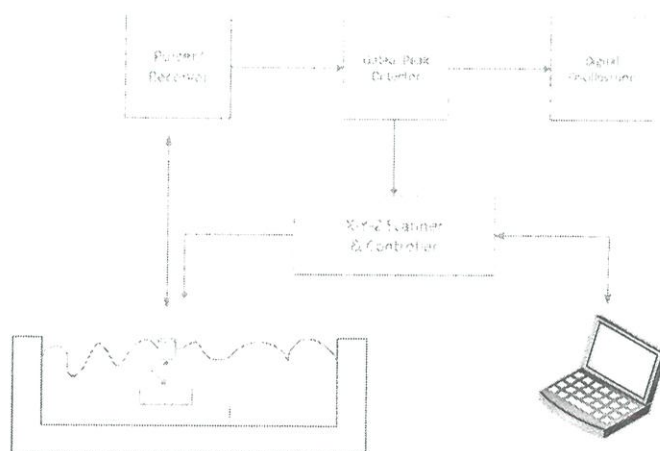
ภาพถ่ายแบบซี-สแกน อาศัยพื้นฐานทั้งสองหลักการดังกล่าวในการสร้างภาพ โดยคาบเวลาหรือเวลาที่คลื่นใช้ในการเคลื่อนที่ไปจนกระทบกับรอยต่อหรือจุดบกพร่องถือเป็นระยะความลึกที่ใช้ในการสร้างภาพ โดยการตรวจสอบแบบซี-สแกน จะพิจารณาเฉพาะจุดบกพร่องที่ความลึกเพียงระยะเดียวว่าที่ความลึกจุดหนึ่งๆมีจุดบกพร่องเป็นอย่างไร และใช้แอมพลิจูดและขนาดของแอมพลิจูดเป็นพารามิเตอร์ชี้ตำแหน่งของจุดบกพร่องและขนาดของจุดบกพร่องนั้น โดยในการทดสอบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เป็นการสร้างภาพด้วยวิธีการจุ่ม ดังนั้นสัญญาณที่ได้จะต่างจากแบบสัมผัสเล็กน้อย รูปที่ 3.3 สัญญาณสะท้อนสัญญาณแรกจะเป็นสัญญาณที่เกิดจากอัลตราโซนิก โพรบกับน้ำหรือของเหลวที่ใช้เป็นตัวคลัปปลิง หลังจากสัญญาณแรกจึงจะเป็นสัญญาณที่ได้จากการสะท้อนวัสดุจริง



รูปที่ 3.3 สัญญาณจากพัลส์-สะท้อนกลับด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่ม

3.2 อุปกรณ์และระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน

จากที่กล่าวไว้แล้วในตอนต้นว่า การตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกคือการสร้างภาพของรอยตำหนิและจุดบกพร่องภายในเนื้อของวัสดุตัวกลางที่ทำการทดสอบ วิธีการสร้างภาพที่ให้รายละเอียดและง่ายต่อการพิจารณา เป็นการสร้างภาพของจุดบกพร่องภายในเนื้อของวัสดุทั้งชิ้นกล่าวคือ แสดงทั้งภาพ ขนาด ลักษณะ และตำแหน่งของจุดบกพร่อง โดยเราเรียกว่า การสร้างภาพแบบซี-สแกน วิธีการ-สแกน อ-สร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกด้วยวิธีซาย์หลักการของความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ภายในเนื้อวัสดุ พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการสร้างภาพได้แก่ ความแรงของสัญญาณ หรือ แอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ว่า เมื่อวัสดุเดินทางไปกระทบกับรอยต่อหรือ 2 ขอบเขตที่มีความหนาแน่นและความเร็วเสียงที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดคลื่นแยกออกเป็นสองส่วนด้วยกัน คือ คลื่นส่วนที่วิ่งต่อเข้าไปในเนื้อวัสดุที่สอง และคลื่นที่สะท้อนและเคลื่อนที่กลับ จากหลักการอนุรักษ์พลังงานหรือหลักการที่ว่าความดันเสียงในตัวกลางที่หนึ่งจะต้องเท่ากับความดันเสียงในตัวกลางที่สอง ทำให้เข้าใจว่าแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อกระทบกับรอยต่อระหว่างสองวัสดุตัวกลางในเนื้อชิ้นงานที่ทำการทดสอบจากหลักการดังกล่าว เราสามารถนำเอาขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นที่สะท้อนกลับมาประยุกต์สร้างภาพเพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องหรือความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานวัสดุและสามารถนำภาพถ่ายที่ได้ไปวิเคราะห์ หาปัญหาและสาเหตุ เพื่อแก้ไขและประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไปได้



รูปที่ 3.4 สะท้อนกลับ-ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบจุ่มด้วยเทคนิคพัลส์

ระบบสำหรับใช้สร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน ด้วยเทคนิคสั-สะท้อนกลับ แสดงคังรูปที่ 3.4 ซึ่งประกอบไปด้วย

- แทงค้ำน้ำหรืออ่างน้ำ-สำหรับใส่น้ำหรือของเหลวที่ใช้เป็นตัวคัลป์ปลิงพลังงานอัลตราโซนิก
- หัวอัลตราโซนิกโพรบ-เป็นตัวแปลงสัญญาณจากไฟฟ้าเป็นคลื่นอัลตราโซนิก และแปลงจากคลื่นอัลตราโซนิกเป็นสัญญาณไฟฟ้า
- ตัวกระตุ้นพัลส์และตัวรับ-เป็นตัวส่งพัลส์ไฟฟ้าไปกระตุ้นหัวโพรบ และขยายสัญญาณไฟฟ้าของคลื่นที่รับได้
- เครื่องสแกนเชิงกลในแนวxyzและชุดควบคุม-สำหรับควบคุมหัวโพรบในแนว xyz
- เครื่องตรวจจับพีค-เป็นตัวอ่านอแมปลิจูดสูงสุดของสัญญาณในหน้าต่าง
- ออสซิลโลสโคป-สำหรับเฝ้าดูสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกในขณะที่เตรียมการทดลอง
- คอมพิวเตอร์-ใช้ประมวลผลสัญญาณและสร้างภาพ

รายละเอียดของเครื่องมือหลักที่สำคัญ ได้แก่ หัวอัลตราโซนิก เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์กระตุ้น เครื่องรับและขนาดสัญญาณอัลตราโซนิก และเครื่องตรวจจับสัญญาณพีค แสดงรายละเอียดในหัวข้อย่อต่อไปนี้

3.3 คุณสมบัติสำคัญของอัลตราโซนิกโพรบ

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้อัลตราซิกโพรบของบริษัท PANAMETRICS โดยจะอ้างอิงกับคุณสมบัติของอัลตราโซนิกโพรบที่ผลิตโดย บริษัท PANAMETRICS

การเลือกอัลตราโซนิกโพรบซึ่งเป็นส่วนสำคัญมากในระบบการวัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนอกจากจะเลือกตามการประยุกต์ใช้งานว่าต้องการใช้เป็นแบบสัมผัสหรือแบบจุ่มแล้ว ยังต้องพิจารณาคุณสมบัติอื่นๆประกอบด้วย โดยที่คุณสมบัติหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือก ได้แก่ รูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมความถี่ซึ่งใช้ในการวัดมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) โดยรูปคลื่นสัญญาณเป็นคุณสมบัติที่บอกถึงอัตราการลดทอนของอัลตราโซนิกโพรบหรือค่าแดมปีง (damping) ของสัญญาณพัลส์อัลตราโซนิก ในกรณีของอัลตราโซนิกที่มีอัตราการลดทอนสูงพัลส์ที่สร้างออกมาจะหยุดในเวลาทีเร็วกว่าหัวอัลตราโซนิกโพรบที่มีอัตราการลดทอนต่ำ หรือก็คือมี

คาบเวลาของรูปคลื่น (waveform duration) น้อยกว่า คาบเวลาของรูปคลื่นเป็นเวลาหัวอัลตราโซนิก โพรบสั้นหรือใช้ในการส่งคลื่นออกมา ในช่วงเวลานี้หัวอัลตราโซนิกจะไม่สามารถตรวจจับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาได้ เราเรียกช่วงนี้ว่า (dead zone) คุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่สำคัญ ได้แก่ สเปกตรัมความถี่ เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงการตอบสนองความถี่ต่อการสั่นของอัลตราโซนิก โพรบ หรือก็คือกราฟที่แสดงให้ทราบถึงความเข้มเสียงที่ผลิตออกมาจากอัลตราโซนิก โพรบที่มีความถี่ต่างๆ โดยมีพารามิเตอร์ที่น่าสนใจ คือ แฟกเตอร์ ซึ่งคุณภาพ (quality factor, Q) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

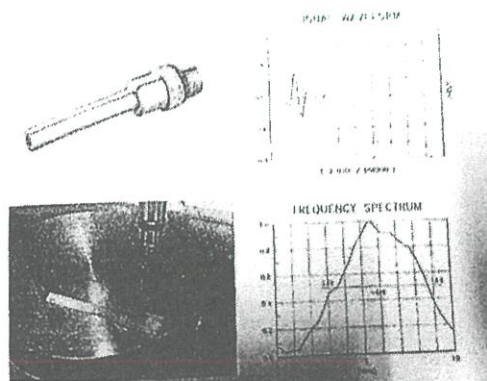
$$Q = \frac{f_c}{\Delta f} \quad (3.2)$$

เมื่อ f_c เป็นความถี่กลางหรือเรโซแนนซ์ (center frequency หรือ resonant frequency)

Δf เป็นช่องความกว้างของความถี่ที่มีความเข้มเสียงลดลงเป็นสองเท่า หรือ -6 dB (bandwidth)

ถ้า Q มีค่าน้อยแสดงว่าอัลตราโซนิก โพรบมีช่องความถี่กว้าง (broad-band) และถ้า Q มีค่ามากแสดงว่าอัลตราโซนิก โพรบมีช่องกว้างความถี่แคบ (narrow-band)

เนื่องจากคุณสมบัติของความละเอียดในอัลตราโซนิก โพรบโมเดล VIDEOSCAN มีค่าสูง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ จึงเลือกใช้หัวอัลตราโซนิก โพรบแบบ VIDEOSCAN รุ่น V310-N-SU มีความถี่กลาง (center frequency) ประมาณ 5MHz เป็นแบบจุ่มที่มีระยะโฟกัส 0.75 นิ้ว ค้างรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 คุณสมบัติของหัวอัลตราโซนิก โพรบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (V310-N-SU)

ลำคลื่นอัลตราโซนิกที่ปล่อยออกจากหัวอัลตราโซนิกโพรบจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงที่อยู่ห่างจากหัวโพรบไปจนถึงตำแหน่งที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดจุดสุดท้ายและเป็นตำแหน่งที่ลำคลื่นเสียงเริ่มกระจายออกไปไม่เป็นลำขนาน เราเรียกช่วงนี้ว่า เฟรสนเนลโซน (Fresnel zone หรือ near field) ช่วงนี้แอมพลิจูดของลำคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสูงไปต่ำและจากต่ำไปสูงสลับกันไป ถัดจากช่วงนี้ไป แอมพลิจูดของคลื่นจะค่อยๆ ลดลงตามระยะทางและลำคลื่นเสียงเมบานออก เรียกช่วงนี้ว่า ฟรอนโฮเฟอร์โซน (Fraunhofer zone หรือ far field) ตำแหน่งของเฟรสนเนลโซน (near field N) มีค่าเป็นดังสมการ

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (3.3)$$

ในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลาง D มากกว่าความยาวคลื่นมากๆ แล้วสามารถประมาณได้ว่า

$$N \approx \frac{D^2 f}{4V} \quad (3.4)$$

เมื่อ f เป็นความถี่หน่วยเป็น MHz

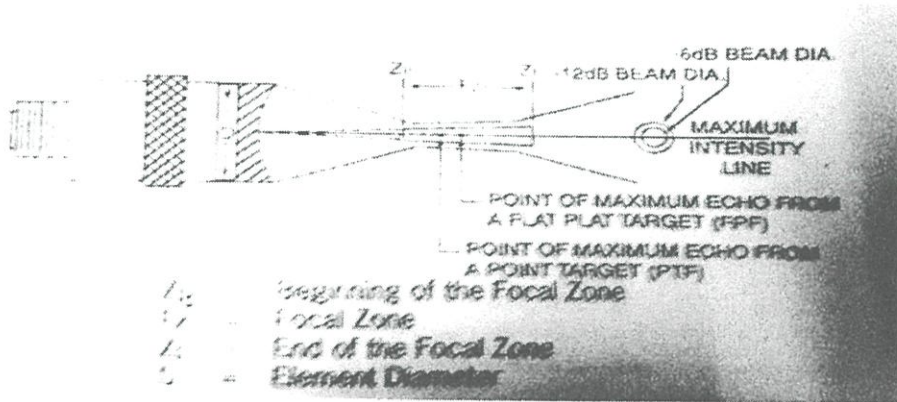
V เป็นความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางใดๆ หน่วยเป็น นิ้วต่อวินาที

D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวโพรบ หน่วยเป็น นิ้ว

นอกจากเฟรสนเนลโซนแล้ว คุณสมบัติสำคัญอื่นๆ ของลำคลื่นอัลตราโซนิกที่ควรรู้ ได้แก่ ความกว้างของลำคลื่นอัลตราโซนิกและโพคัลโซน โดยความกว้างของลำคลื่น (beam diameter ,BD) เป็นคุณสมบัติที่มีผลต่อความไวและความละเอียดในการตรวจสอบ ยิ่งความกว้างลำคลื่นแคบมากเท่าไร ความละเอียดในการตรวจจับจุดบกพร่องขนาดเล็กจะสูง และเนื่องจากลำคลื่นทั้งหมดมารวมกันที่บริเวณนี้จึงมีพลังงานสูง จึงทำให้เกิดการสะท้อนกลับของจุดบกพร่องสูงอีกด้วย เรียกว่ามีความไวในการตรวจสอบสูงขึ้นด้วย โดยความกว้างของลำคลื่นเสียงคิดที่ตำแหน่งแอมพลิจูดลดทอนลงเพียงครึ่งเดียวหรือ -6 dB เป็นดังสมการ

$$BD_{(-6dB)} = \frac{1.02Fv}{fD} \quad (3.5)$$

เมื่อ F เป็นความยาวโฟกัส หน่วยเป็น นิ้ว



รูปที่ 3.6 ลักษณะลำคลื่นโฟกัสอัลตราโซนิก

รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของลำคลื่นอัลตราโซนิกที่ถูกโฟกัส โดยโฟกัสโซน (F_z) หรือช่วงที่แอมพลิจูดของสัญญาณสะท้อนกลับหมดลดทอนไม่เกิน -6 dB จากตำแหน่งโฟกัส สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$F_z = NS_F^2 \left[\frac{2}{1 + (0.5 \times S_F)} \right] \quad (3.6)$$

เมื่อ S_F เป็นโฟกัสซิงเกน (Focussing gain) ดังสมการ

$$S_F = \frac{F}{N} \quad (3.7)$$

โดยโฟกัสซิงเกนแสดงถึงอัตราการขยายของความไวในการตรวจสอบ เมื่อเทียบกับอัลตราโซนิกโพรบที่ไม่มีโฟกัส โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ของโฟกัสซิงเกนกับการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดของสัญญาณจากที่กล่าวมาข้างต้น อัลตราโซนิกโพรบที่ใช้ในระบบการสร้างภาพอัลตราโซนิกแบบซีสแกน ที่พัฒนาขึ้นมา เป็นหัวทรานสดิวเซอร์ แบบที่ใช้จุ่มในของเหลว ของบริษัท PANAMETRICS โมเดล V310-N-SU โดยมีความถี่กลางอยู่ประมาณ 5.6 MHz และหัวโพรบมีการโฟกัสเป็นจุด (spherical focus) โดยมีระยะโฟกัสที่ 0.75 นิ้ว (หรือประมาณ 19 มิลลิเมตร) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก 0.25 นิ้ว (ประมาณ 6 มิลลิเมตร)

จากข้อมูลข้างต้นเราจะเห็นตัวเลขหลายๆของข้อจำกัดในการวัดและสร้างภาพของอัลตราโซนิกที่พัฒนาขึ้น โดยความกว้างของลำคลื่นเป็นแฟกเตอร์ที่จำกัดความละเอียดในการสแกนหรือ

ตรวจวัดความบกพร่องของชิ้นงาน กล่าวคือ จุดบกพร่องหรือรูพรุนในเนื้อชิ้นงานที่เล็กที่สุดที่อัลตราโซนิคโพรบมองเห็นจะประมาณ 900 ไมครอน และโฟคัลโซนบอกว่าลำคลื่นจะมีขนาดเล็กประมาณ 900 ไมครอนในช่วงระยะประมาณ 0.654 นิ้ว หรือกล่าวคือเป็นระยะห่างจากจุดโฟกัสประมาณ $0.654/2=0.327$ นิ้ว ดังนั้นในการวัดและการสร้างภาพ ตำแหน่งในแนวแกน z จะคาดเคลื่อนได้ในช่วงไม่เกิน 0.327 นิ้ว หรือประมาณ 8.3 มิลลิเมตร

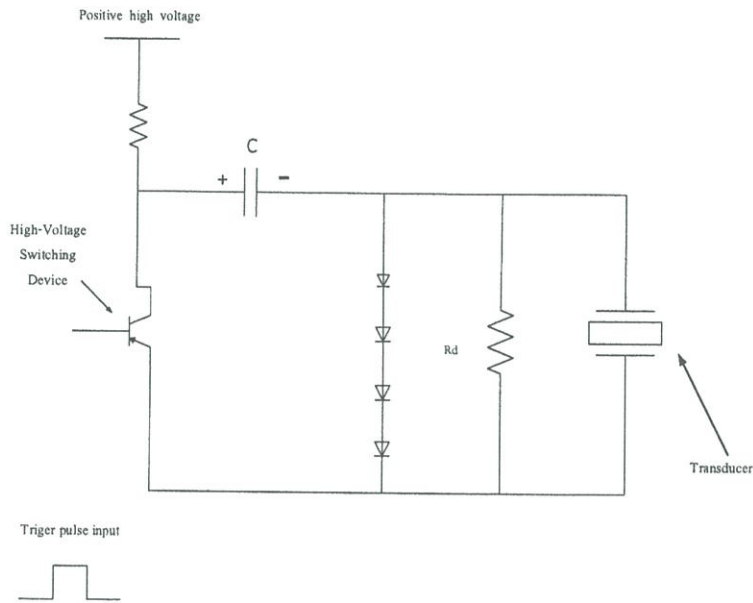
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอัลตราโซนิคโพรบที่ใช้ในการสร้างภาพ

| | หน่วยเป็นนิ้ว | หน่วยเป็นเมตร |
|------------------------|-----------------|---------------|
| ความถี่กลาง | 5.6MHz | - |
| แบนด์วิทซ์ | 5.35MHz | - |
| ลักษณะของการโฟกัส | Spherical Focus | - |
| ระยะโฟกัส | 0.75" | 19 mm |
| ระยะเฟรสเนล N | 1.347" | 34.2 mm |
| ความกว้างของลำคลื่น BD | 0.0355" | 0.902 mm |
| โฟคัลโซน | 0.654 " | 16.6 mm |
| โฟกัสเชิงแกน | 0.557 | - |

3.4 แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์กระตุ้นและตัวรับ

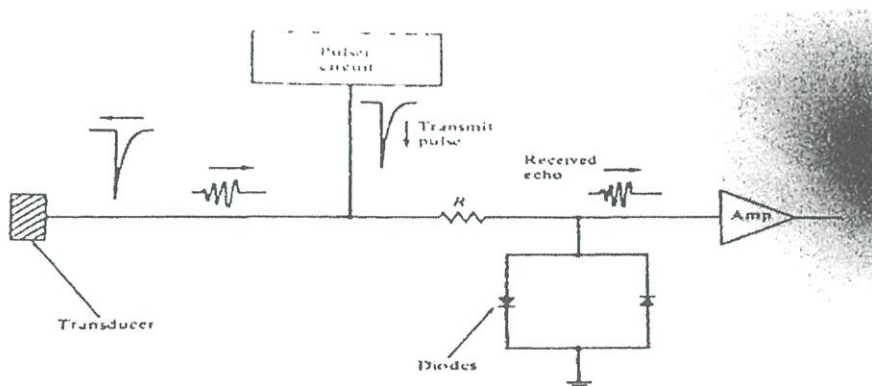
เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อไปกระตุ้นอัลตราโซนิคโพรบให้สร้างความดันคลื่นกลโดยทั่วไปนิยมเรียก พัลส์เซอร์ (pulser) ซึ่งจะส่งด้วยความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อพัลส์เซอร์ส่งแรงดันไปกระตุ้นอัลตราโซนิคโพรบ โดยที่ พัลส์เซอร์จะผลิตพัลส์ของแรงดันไปกระตุ้นอัลตราโซนิคโพรบโดยยังพัลส์ของแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูง ก็จะผลิตคลื่นกลที่มีแอมพลิจูดสูงด้วย ซึ่งจะทำให้มีความไวในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีจุดบกพร่องขนาดเล็กๆ ได้ดี แต่การใส่พัลส์กระตุ้นที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงจะทำให้อัลตราโซนิคโพรบเกิดความร้อนภายในสูงด้วย ดังนั้น พัลส์เซอร์ จึงจำเป็นต้องออกแบบให้สร้างพัลส์ของแรงดัน

ที่มีคาบเวลาสั้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อลดผลของความร้อนและเพิ่มความไวในการตรวจสอบ
 ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรพัลส์เซอร์

ในวิทยานิพนธ์ใช้อัลตราโซนิกโพรบเพียงตัวเดียวทำหน้าที่เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับคลื่นอัลตรา
 โซนิก ดังนั้นจึงเลือกใช้เครื่องพัลส์ที่มีภาคตัวรับอยู่ด้วย โดยภาครับในเครื่องพัลส์เซอร์ส่วนใหญ่
 ประกอบไปด้วยสองส่วน ได้แก่ ส่วนป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินและส่วนขยายสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 3.8



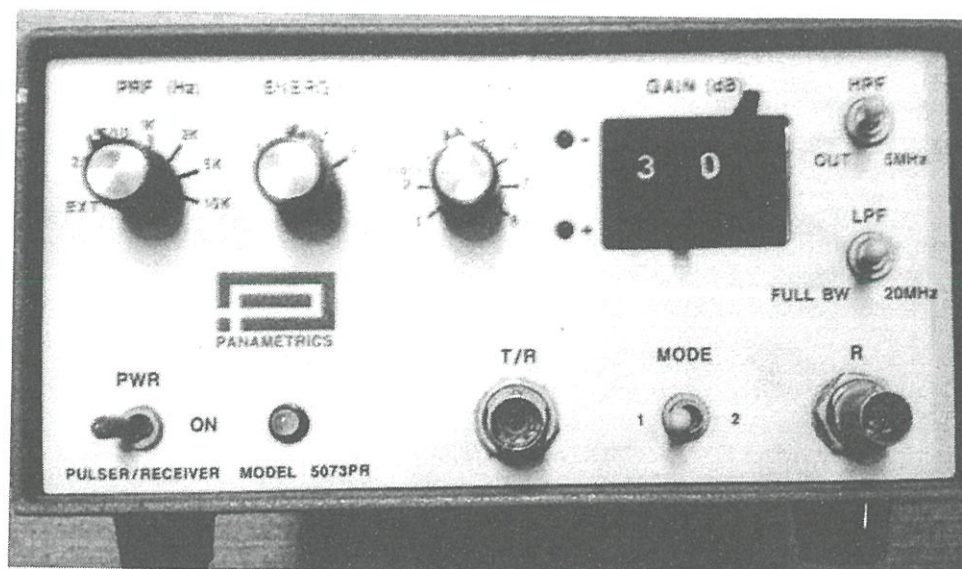
รูปที่ 3.8 วงจรภาครับสัญญาณ

เครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นของบริษัท PANAMETRICS รุ่น 5072PR และ 5073PR แสดงดังรูปที่ 3.9 พารามิเตอร์ของเครื่องพัลส์เซอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ พารามิเตอร์ภาคส่งและภาครับ ในภาครับพารามิเตอร์ที่สำคัญมีอยู่เพียงพารามิเตอร์เดียว ซึ่งก็คืออัตราขยาย/อัตราการลดทอน (gain) ซึ่งนิยามใช้หน่วยของเดซิเบล (dB) ซึ่งเมื่อมีค่าเป็นบวกหมายถึงเพิ่มอัตราขยาย ทำนองกลับกันเมื่อค่าเป็นลบหมายถึงอัตราการลดทอน โดยในรุ่น 5072PR มีอัตราขยายเป็น ± 59 dB และรุ่น 5073 PR มีอัตราขยาย -49 dB ถึง ± 39 dB ความหมายของหน่วยเดซิเบล (dB) คืออัตราเปรียบเทียบแอมพลิจูดของสัญญาณที่ 1 (หรือ สัญญาณขาเข้า) กับสัญญาณที่ 2 (หรือสัญญาณขาออก) ซึ่งเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์

$$\text{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \quad (3.8)$$

เมื่อ A_1 เป็นสัญญาณที่ 1 หรือ สัญญาณขาเข้า

A_2 เป็นสัญญาณที่ 2 หรือ สัญญาณขาออก



รูปที่ 3.9 พัลส์เซอร์และตัวรับของ PANAMAETRICS

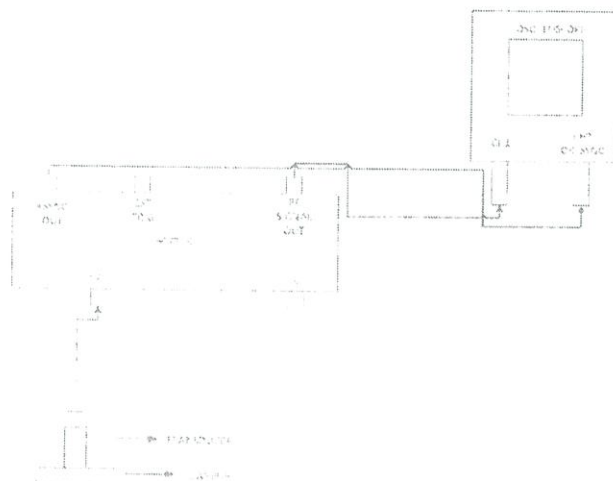
ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของ dB กับอัตราส่วนของแอมพลิจูด

| $\frac{A_1}{A_2}$ | อัตราส่วน | dB |
|-------------------------|-----------|----|
| $\frac{100\%}{70.71\%}$ | 1.4142 | 3 |
| $\frac{100\%}{50\%}$ | 2 | 6 |
| $\frac{100\%}{25\%}$ | 4 | 12 |
| $\frac{100\%}{10\%}$ | 10 | 20 |
| $\frac{100\%}{1\%}$ | 100 | 40 |
| $\frac{100\%}{0.1\%}$ | 1000 | 60 |

จากตารางที่ 2 จะสังเกตเห็นว่า เครื่องพัลส์เซอร์รูน 5073PR มีอัตราการขยาย 100 เท่า

พารามิเตอร์ส่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ พลังงาน การลดทอน สัญญาณการกระเพื่อม และ ความถี่ในการกระตุ้น (PRF) พลังงานของพัลส์กระตุ้นเป็นพารามิเตอร์สำหรับใช้เพื่อควบคุม กำลังไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายออกไปสู่อัลตราโซนิกโพรบ โดยระดับพลังงานที่จ่ายให้กับอัลตราโซนิกโพรบทั้งสองรุ่นในระดับ “ไมโครจูล (μj)” โดยการปรับเพิ่มพารามิเตอร์พลังงานเป็นการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวอัลตราโซนิกโพรบ ยิ่งกระตุ้นสูงขึ้น อัลตราโซนิกโพรบก็จะผลิตคลื่นกลที่มีขนาดแอมพลิจูดสูงตามไปด้วย ส่วนพารามิเตอร์การลดทอนสัญญาณการกระเพื่อม (damping) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมไม่ให้เกิดสัญญาณการกระเพื่อม (ringing effect) โดยลดแรงดันไฟฟ้าและความกว้างของแรงดันไฟฟ้าพัลส์กระตุ้นลง ส่วนพารามิเตอร์สุดท้ายเป็นค่าความถี่ในการสร้างพัลส์กระตุ้น คือ เมื่อเราปล่อยพัลส์แรงดันไปกระตุ้น อัลตราโซนิกโพรบจะสร้างคลื่นกลออกไปหนึ่งลูก และสะท้อนกลับมาแสดงผลบนจอภาพของออสซิลโลสโคป แต่เนื่องจากถ้าสร้างภาพขึ้นมาเพียงลูกเดียว บนจอออสซิลโลสโคปจะแสดงรูปคลื่นของพัลส์เดียวแล้วหายไป เป็นเหตุให้วัดและประมวลผลข้อมูลหรือรูปคลื่นไม่ทัน ดังนั้นเพื่อจะสร้างรูปคลื่นให้คงอยู่ จึงต้องผลิตพัลส์กระตุ้นเป็นจังหวะๆ โดยปกติ

ค่าความถี่ในการปล่อยพัลส์กระตุ้นจะอยู่ที่ประมาณ 100 Hz - 20kHz ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.10 เป็นการนำพัลส์เซอร์มาต่อในการวัดแบบพัลส์-สะท้อนกลับ โดยสัญญาณขาออกหลังจากที่ผ่านการขยายสัญญาณจากภาครับแล้วจะส่งไปแสดงผลที่จอภาพของออสซิลโลสโคป



รูปที่ 3.10 การประยุกต์การใช้งานแบบพัลส์เซอร์ สะท้อนกลับ

3.5 เครื่องตรวจจับพิก (Gated Peak Detector)

เครื่องตรวจจับพิกหรือ พิคคิตแทรกเตอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับอ่านค่าแอมพลิจูดสูงสุดหรือแรงดันไฟฟ้าพิก (peak voltage) ของคลื่นอัลตราโซนิกในช่วงที่เปิดหน้าต่างเอาไว้ (gated window) ต้องใช้งานคู่กับเครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับ โดยนำสัญญาณขาออกที่ผ่านการขยายแล้วมาวิเคราะห์ข้อมูลต่อ ด้วยวิธีเลือกเปิดหน้าต่างบริเวณที่ต้องการอ่านค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ (ในกรณีของเครื่องที่ใช้อยู่เป็นเครื่องตรวจจับพิกของ PANAMETRICS รุ่น 5607 สามารถเปิดหน้าต่างได้แคบที่สุด 30 ns และกว้างที่สุด 20 μs) สัญญาณพิกจะถูกลบสัญญาณเป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต ดังนั้นความละเอียดของการแปลงข้อมูลจากอนาล็อกเป็นดิจิทัลจะเป็นดังสมการ

$$\text{Resolution} = \frac{V_{FS}}{2^8 - 1} \quad (3.9)$$

โดยออสซิลโลสโคปที่ใช้เป็นแบบดิจิทัลออสซิลโลสโคปแบบบันทึกรูปสัญญาณได้ (Digital Storage Oscilloscope, DSO) ของ Tektronix รุ่น TDS340A มีช่วงกว้างความถี่ (bandwidth) เท่ากับ 100 MHz และมีอัตราการสุ่มวัดสัญญาณ (sampling rate) 10 จุด/วินาที ถึง 500 ล้านจุด /วินาที ซึ่งเพียงพอการใช้งานกับอัตราโชนิกโพรบที่นำมาใช้ในการทดลอง โดยมีความละเอียดของฐานเวลา (time base) ในระดับ 5 ns/ช่อง ตัวเลขนี้บอกให้ทราบถึงขีดจำกัดในการวัดความละเอียดของระยะทางหรือความเร็วเสียงที่คำนวณ $d = vt/2$ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ออสซิลโลสโคป RIGOL

การออกแบบและพัฒนาระบบสร้างภาพแบบซี-สแกน

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในวิทยานิพนธ์ ตั้งแต่หลักการ รายละเอียด การออกแบบ และการสร้างชุดเครื่องมือเพื่อประกอบขึ้นเป็นระบบสร้างภาพอัลตราโซนิก

3.7 หลักการของระบบสร้างภาพอัลตราโซนิกที่พัฒนาขึ้น

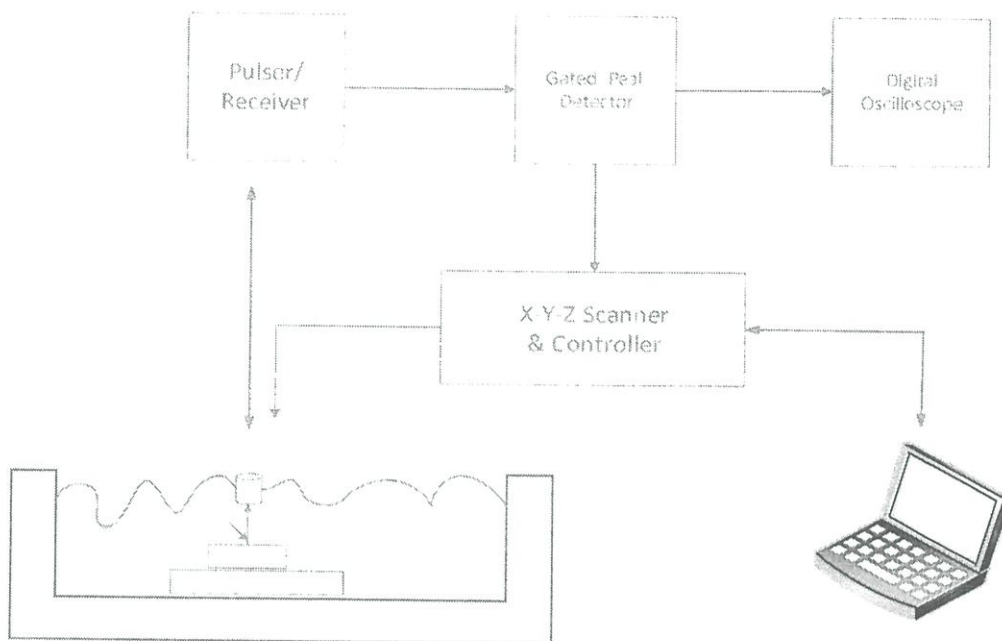
ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่พัฒนาขึ้นใช้เทคนิคการสร้างภาพแบบซี-สแกนด้วยเทคนิคพัลส์-สะท้อนกลับ แสดงดังรูปที่ 3.13 และในรูปที่ 3.14 แสดงภาพถ่ายของระบบที่พัฒนาขึ้น อุปกรณ์และชุดเครื่องมือทั้งหมดของระบบประกอบไปด้วย

- อ่างน้ำ-สำหรับใส่น้ำหรือของเหลวที่ใช้คลื่นปดิ่งอัลตราโซนิก
- หัวอัลตราโซนิกโพรบ-เป็นตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นคลื่นอัลตราโซนิก และแปลงจากคลื่นอัลตราโซนิกเป็นสัญญาณไฟฟ้า
- พัลส์เซอร์และตัวรับ-เป็นตัวสร้างพัลส์ไฟฟ้าเป็นคลื่นอัลตราโซนิกโพรบ และทำหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้าจากคลื่นที่รับ
- เครื่องสแกนเชิงกลในแนว xyz และชุดควบคุม-สำหรับควบคุมหัวโพรบในแนว xyz
- เครื่องตรวจจับฟิสิก-เป็นตัวอ่านแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณที่อยู่ในหน้าต่าง
- ออสซิลโลสโคป-สำหรับเฝ้าดูสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก
- คอมพิวเตอร์-ใช้ประมวลผลสัญญาณและสร้างภาพ

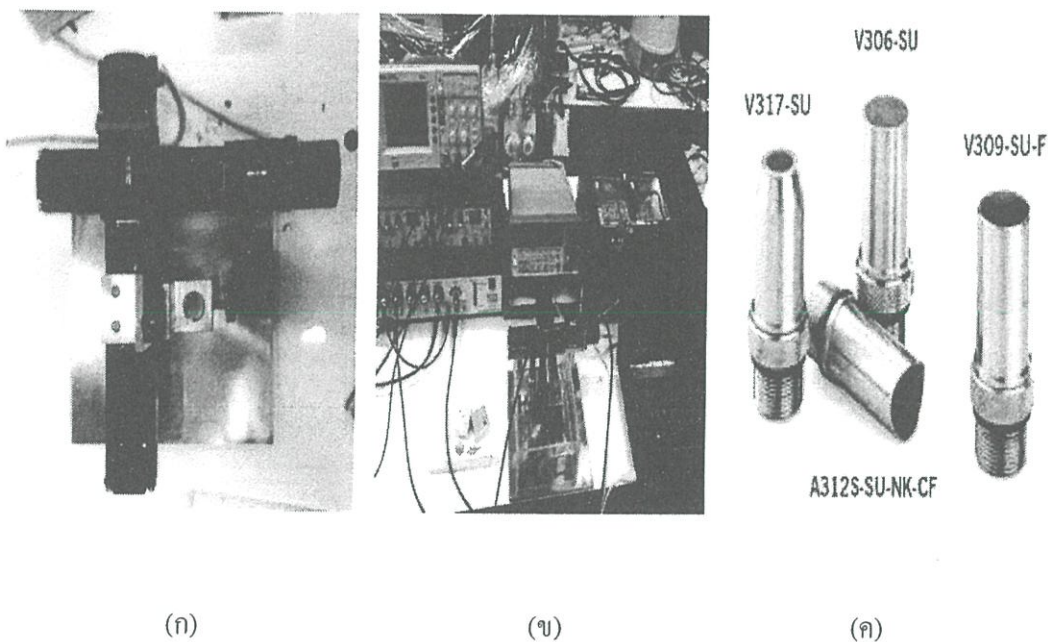
ระบบที่พัฒนาขึ้นอาศัยหลักการทางฟิสิกส์ของคลื่นเสียงที่ว่า เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางและกระทบกับวัสดุตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์ของเสียง (acoustic impedance) แตกต่างกัน พลังงานของคลื่นบางส่วนจะสะท้อนกลับ และมีบางส่วนเคลื่อนที่ทะลุผ่าน ดังกล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 โดยสัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นอัลตราโซนิกเป็น ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{และ} \quad T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

ความแรงหรือขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นที่สะท้อนกลับมายังคลื่นอัลตราโซนิกโพรบที่ตำแหน่งความลึก z หนึ่งๆ จะนำมาแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 8 บิตด้วยเครื่องตรวจจับฟิสิก โดยข้อมูลดิจิทัลที่ได้จะนำมาเก็บรวบรวมป็นแฟ้มข้อมูล จนกระทั่งระบบทำการสแกนหัวคลื่นอัลตราโซนิกโพรบตามแนว xy เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำเอาแฟ้มข้อมูลไปประมวลผล ด้วยโปรแกรมสร้างภาพที่พัฒนาขึ้นจาก MATLAB โดยใช้โทนสีหรือสเกลสีในแต่ละจุดของภาพแทนขนาดแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกที่ตำแหน่งนั้นๆ



รูปที่ 3.13 ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบจุ่มด้วยเทคนิคพัลส์-สะท้อนกลับ



รูปที่ 3.14 ระบบที่พัฒนาขึ้น (ก) ชุดสแกน xyz (ข) เครื่องมือที่นำมาติดตั้ง และ (ค) อัลตราโซนิก โพรบ

อุปกรณ์ที่จำเป็นและมีอยู่แล้ว ซึ่งกล่าวรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 3 ได้แก่

- หัวอัลตราโซนิก โพรบ 5 MHz ระยะโฟกัส 0.75 นิ้ว สำหรับใช้ทดสอบแบบจุ่ม (5 MHz immersion focusing ultrasonic transducer)
- พัลส์เซอร์และตัวรับ (pulser/receiver)
- เครื่องตรวจจับพีค (gated peak detectoc, GPD)
- ดิจิตอลออสซิลโลสโคปแบบบันทึกสัญญาณได้ (digital storage oscilloscope, DSO)
- คอมพิวเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไป

โดยในบทนี้จะกล่าวรายละเอียดของอุปกรณ์และชุดเครื่องมือที่ทำการพัฒนาขึ้นมาใช้เอง ได้แก่

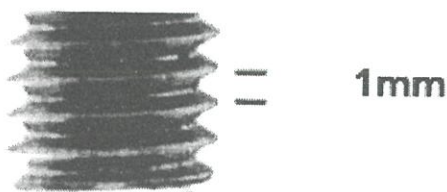
- ชุดสแกนทางกล xyz (XYZ mechanical scanner) พร้อมแท่งค้ำน้ำหรืออ่างน้ำ
- ชุดควบคุมเครื่องสแกนเชิงกลxyz (motion controller)
- ชุดอ่านและแปลงข้อมูลจากเครื่องตรวจจับพีค (GPD reader)
- โปรแกรมสำหรับแปลงข้อมูลที่ได้เป็นภาพ (imaging software)

3.8 การออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องมือ

3.8.1 ชุดสแกนทางกลและชุดควบคุมเครื่องสแกนในแนวxyz

เครื่องสแกนทางกล

ชุดสแกนทางกลที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.14 (ก) โดยพัฒนาและปรับปรุงจากระบบสแกนของโรงงานอุตสาหกรรมที่ยกเลิกการใช้งานเนื่องจากเปลี่ยนไลน์ผลิตใหม่ มีระยะการสแกนในแนวแกน xyz เท่ากัน ซึ่งเท่ากับ 310 มิลลิเมตร แกนเกลียวหมุนมีระยะห่างระหว่างเกลียว (ทั่วไปนิยมเรียกว่า ระยะพิท) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.15 ระยะห่างระหว่างเกลียวของแกนเกลียวหมุนนี้เป็นเฟกเตอร์ที่บอกถึงระยะทางในการเคลื่อนที่ไปของเครื่องสแกนในแนว x หรือ y หรือ z ต่อการหมุน 1 รอบของแกนเกลียว

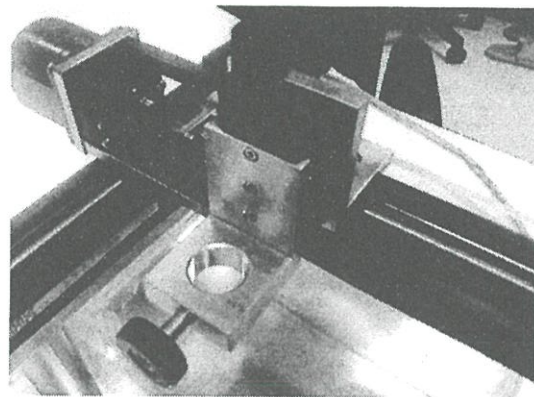
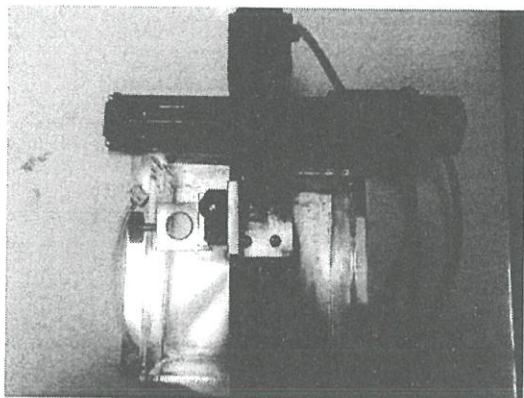


รูปที่ 3.15 ระยะห่างระหว่างเกลียวของเกลียวหมุนที่ใช้ในเครื่องสแกนทางกลที่พัฒนาขึ้น

การออกแบบชุดสแกนทางกลสามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกัน คือ (ก) การสแกนวัสดุที่ต้องการสร้างภาพ โดยให้หัวอัลตราโซนิกโพรบอยู่นิ่ง และ (ข) การสแกนหัวอัลตราโซนิกโพรบ โดยให้วัสดุที่ต้องการสร้างภาพอยู่นิ่ง ระบบที่พัฒนาขึ้นเลือกใช้วิธีการสแกนแบบ (ข) โดยการสแกนหัวอัลตราโซนิกโพรบในแนว xyz ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่ต้องการสร้างภาพต้องจุ่มไว้ในน้ำหรือของเหลวที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งถ่ายพลังงานคลื่นอัลตราโซนิก ดังนั้นเครื่องสแกนจะต้องรับน้ำหนักหรือโหลดค่อนข้างมาก ของอ่างน้ำ (ขนาด กว้างxยาวxลึก เท่ากับ 450มม.x550มม.x400มม.) ที่มีน้ำบรรจุอยู่ โดยบรรจุด้วยแผ่นฐานรองและวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบซึ่งมีน้ำหนักมากเช่นกันการสแกนหรือขับเคลื่อน โหลดที่มีน้ำหนักมาก ๆ นั้น จะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการสแกนได้ง่าย เช่น การเกิดปรากฏการณ์เล็ก (lag) ของแกนเกลียว หรือก็คือ แกนเกลียวไม่เคลื่อนที่ในขณะที่มอเตอร์หมุน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการอ่านสัญญาณซึ่งสัมพันธ์กับระยะทางที่อัลตราโซนิกโพรบเคลื่อนที่

ระบบสแกนที่พัฒนาขึ้นใช้ชุดการเคลื่อนที่ทางกล ที่เรียกว่า “Linear Motion System” แสดงดังรูปที่ 3.16 ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ช่วยลดภาระงานในการเคลื่อนที่ให้แก่แกนเกลียวหมุน เพื่อลดปัญหาที่จะส่งผลต่อความผิดพลาดในการสแกน และลดภาระงานหรือ โหลดของมอเตอร์ที่จะขับเคลื่อนชุดสแกน อย่างไรก็ตาม ระบบมีปัญหาในการเคลื่อนที่หรือสแกนหัวโพรบในแนวแกน z หรือแนวตั้งฉากกับพื้นผิวโลกซึ่งมี โหลดของอัลตราโซนิกโพรบและผ่านฐานยึดกับแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นใน

แนวแกน z จึงได้ออกแบบให้มีชุดระบบเบรกเพื่อยึดให้แกนเกลียวหมุนอยู่หนึ่งกับที่ แสดงดังรูปที่ 3.17 ใช้ปรับในโหมด manual เพื่อลดปัญหาเพื่อลดปัญหาที่จะส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดในการสแกน



รูปที่ 3.16 ชุด Linear Motion System ในแนว x และ ดังรูปที่ 3.17 แนวแกน z ใช้ปรับในโหมด manual

มอเตอร์ขับเคลื่อนทางกล

ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องสแกนทั่วไป ประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักด้วยกัน ส่วนต่างๆของระบบประกอบด้วย

- โหลด (load) สำหรับระบบที่สร้างขึ้นก็คือ ชุดเครื่องสแกนแนว xy และ z
- มอเตอร์ (moter)
- ชุดขับอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronics)
- ชุดควบคุมการเคลื่อนที่ (control)

สเตปป์มอเตอร์ (Stepping Motor)

สเตปป์มอเตอร์เป็นอุปกรณ์เอาต์พุตอย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถนำไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ มาทำการควบคุมได้สะดวก และเป็นมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานควบคุมการหมุน ที่ต้องการตำแหน่ง และทิศทางที่แน่นอน การทำงานของ สเตปป์มอเตอร์จะขับเคลื่อนทีละขั้นๆ ละ (Step) 0.72, 1.44, 2.16, 2.88,.....,359.28,360 องศา สเตปป์มอเตอร์จะแตกต่างจากมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป (DC

MOTOR) โดยการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงจะหมุนไปแบบต่อเนื่อง ไม่สามารถหมุนเป็นแบบ สติ็ปๆ ได้ ดังนั้นในการนำไปกำหนดตำแหน่งจึงควบคุมได้ยากกว่า แต่ในส่วนใหญ่เราจะใช้สติ็ป มอเตอร์มาทำการควบคุมโดยใช้วิธีในระบบดิจิทัล เช่น พรินเตอร์ (Printer) พล็อตเตอร์ (X-Y Plotter) ดิสก์ไดรฟ์ (Disk drive) ฯลฯ

หลักการการทำงานของมอเตอร์

สติ็ปมอเตอร์ เป็นมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยพัลส์ ลักษณะการขับเคลื่อน จะหมุนรอบแกนได้ 360 องศา มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง และเป็นมอเตอร์ 5 เฟส คือสติ็ปมอเตอร์ที่มีแรงบิดสูง การสิ้นเปลืองต่ำด้วยความละเอียด 500 สติ็ป/รอบ/0.72°/สติ็ป(แล้วแต่ละ โครงสร้างของมอเตอร์จะ นำมอเตอร์ไปใช้เป็นงานที่ต้องการตำแหน่งแม่นยำ

วิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนโดยการกระตุ้นเฟส

ในการควบคุมสติ็ปมอเตอร์เพื่อที่จะให้ทำการหมุน มีวิธีการควบคุมกระแสไฟที่จ่ายให้กับ ขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟสของสติ็ปมอเตอร์ อย่างเป็นลำดับที่แน่นอน โดยถ้าหากเราต้องการให้ กระแสไหลในเฟสใดๆ ก็จะทำให้สถานะของเฟสนั้นๆเป็นสถานะลอจิก "H" และในการกระตุ้นเฟส ของของสติ็ปมียู่ด้วยกัน 2 แบบคือ

- 1.) การกระตุ้นเฟส แบบฟูลสติ็ปมอเตอร์ (Full Step Motor) ดังรูปที่ 3.18

| Step | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| VOHGA | H | H | H | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | H | H |
| VOHGB | L | L | H | H | H | H | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L |
| VOHGC | L | L | L | L | L | L | H | H | H | H | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L |
| VOHGD | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | H | H | H | H | L | L | L | L | L | L |
| VOHGE | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | H | H | H | H | L | L |
| VOLA | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L |
| VOLE | H | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L |
| VOLE | H | H | H | H | H | H | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L |
| VOLE | L | L | L | L | H | H | H | H | H | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L |
| TM | H | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L |
| QW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| QOW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

รูปที่ 3.18 แบบฟูลสติ็ปมอเตอร์ (Full Step Motor)

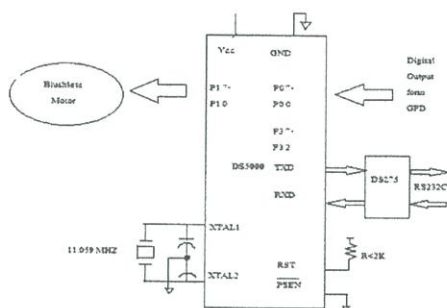
2.) การกระตุ้นเฟส แบบฮาล์ฟสเตป (Half Step Motor) ดังรูปที่ 3.19

| Step | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| VOHGA | H | H | L | L | L | L | L | L | L | H |
| VOHGB | L | H | H | H | L | L | L | L | L | L |
| VOHGC | L | L | L | H | H | H | L | L | L | L |
| VOHGD | L | L | L | L | L | H | H | H | L | L |
| VOHGE | L | L | L | L | L | L | L | H | H | H |
| VOLA | L | L | L | L | H | H | H | L | L | L |
| VOLB | L | L | L | L | L | L | H | H | H | L |
| VOLC | H | L | L | L | L | L | L | L | H | H |
| VOLD | H | H | H | L | L | L | L | L | L | L |
| VOLE | L | L | H | H | H | L | L | L | L | L |
| TIM | H | L | L | L | L | L | L | L | L | L |
| CW | → | | | | | | | | | |
| CCW | ← | | | | | | | | | |

รูปที่ 3.19 แบบฮาล์ฟสเตป (Half Step Motor)

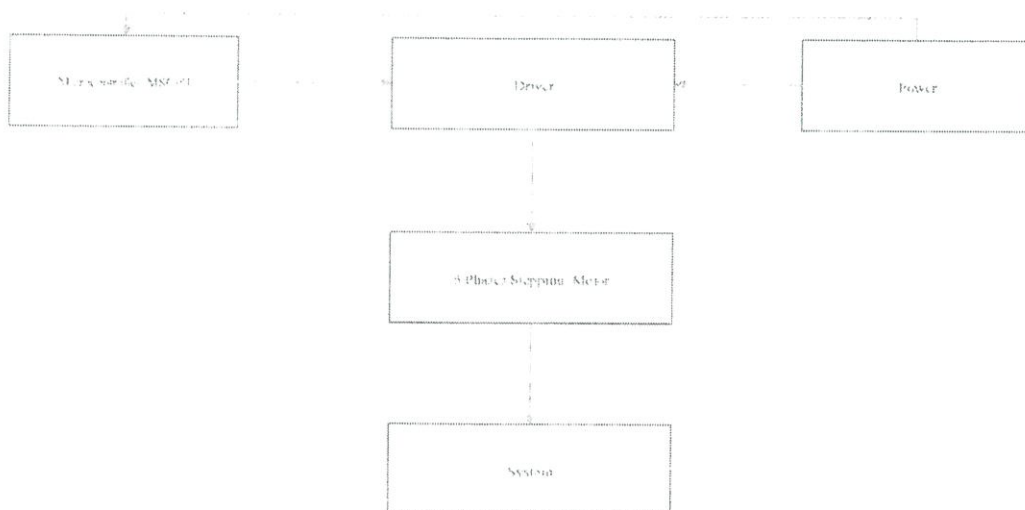
ชุดควบคุมเครื่องสแกน

ในการออกแบบชุดควบคุมมอเตอร์ เพื่อลดต้นทุนและประหยัดอุปกรณ์ จึงออกแบบใช้วิธีการขับมอเตอร์ด้วยชุดขับเพียงชุดเดียว โดยใช้รีเลย์เป็นสวิทซ์ในการเลือกชุดมอเตอร์สำหรับขับในแกน x y z วงจรที่พัฒนาขึ้นใช้ พีเอ็นพีทรานซิสเตอร์ PN2907A เป็นสวิทซ์ควบคุมรีเลย์ โดยในสภาวะปกติที่ทรานซิสเตอร์ไม่ทำงาน ขดลวดของมอเตอร์แต่ละชุดจะอยู่ในสภาวะเปิด ไม่ต่ออยู่กับวงจรใดเลย และเมื่อต้องการขับมอเตอร์ชุดไหน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ทรานซิสเตอร์ที่ควบคุมรีเลย์ทำงาน โดยการส่งสัญญาณดิจิตอลลอจิก "0" ขดลวดของมอเตอร์ก็จะต่อเข้ากับตำแหน่ง U V W ของวงจรสำหรับมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่แนวตั้ง z เนื่องจากมีชุดเบรกเพื่อล็อกให้แกนเกลียวหนึ่งอยู่กับที่รีเลย์ของชุดมอเตอร์ z จึงต้องมีหน้าที่ปลดชุดเบรกให้คายล็อกด้วย โดยการใส่แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ให้กับชุดเบรกส่วนอ่านค่าดิจิตอลเอาท์พุทจากเครื่องตรวจจับพิค ชุดควบคุมเครื่องสแกนสำหรับสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ได้ออกแบบให้มีส่วนอ่านข้อมูลดิจิตอลขนาด 8 บิต ที่ได้จากเครื่องตรวจจับพิค ซึ่งเป็นข้อมูลที่แปลงมาจากขนาดพิคแอมพลิฟูดของคลื่นอัลตราโซนิกสะท้อนกลับ ณ ตำแหน่งที่ต้องการพิจารณา เพื่อเป็นการป้องกันเครื่องมือและส่วนประสมมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงออกแบบให้มีวงจรบัฟเฟอร์เป็นตัวเชื่อมข้อมูลระหว่างเครื่องตรวจจับพิคและไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้ไอซี 74LS244 ทำหน้าที่เป็นวงจรบัฟเฟอร์ดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 3.20 โปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์และการเก็บข้อมูล



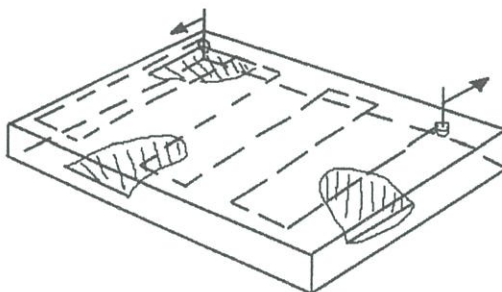
รูปที่ 3.20 ส่วนควบคุมและประมวลผลกลาง

การควบคุมการทำงานของชุดควบคุมเครื่องสแกนนั้น วงจรภาคเพาเวอร์และอิเล็กทรอนิกส์เปรียบเสมือนเป็นแขน - ขาของมนุษย์เรา ส่วนสมองหรือส่วนสั่งการให้วงจรต่างๆทำงานได้ดียิ่งขึ้นอยู่กับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยในวิทยานิพนธ์เลือกใช้ภาษาซีสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 (Micro-C Compiler) ในการพัฒนา ซึ่งเป็นภาษาขั้นสูงจึงสามารถโปรแกรมการทำงานที่สลับซับซ้อนได้ดี ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมแสดงโฟลว์ชาร์ทในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ไคอะแกรมการทำงานของชุดควบคุมเครื่องสแกน xyz

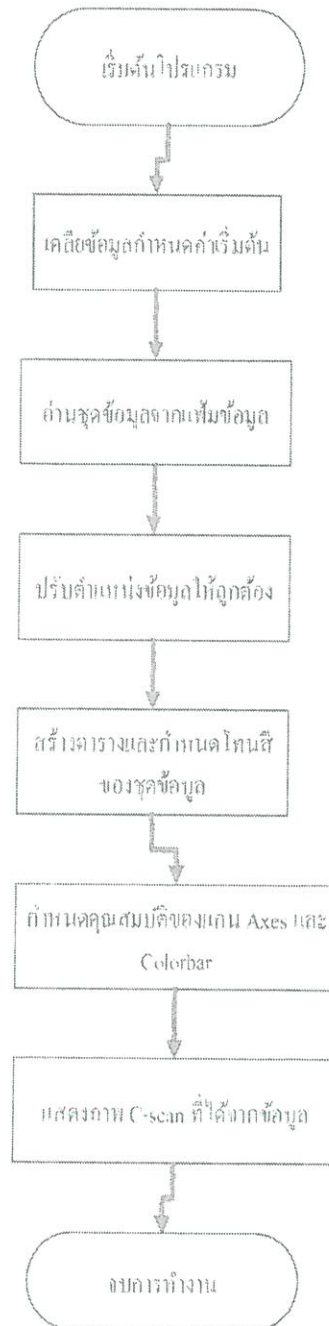
โหมคการทำงานของชุดควบคุมเครื่องสแกน xyz แบ่งออกได้เป็น 2 การทำงานหลักๆ (ก) การทำงานในโหมคแมนนวลเป็นการควบคุมมอเตอร์แต่ละตัวอิสระจากกัน โดยผู้ใช้เป็นผู้ควบคุมทิศทางและตำแหน่ง ใช้สำหรับการสแกนเพื่อตรวจสอบอย่างหยาบๆก่อนจะเริ่มเก็บข้อมูลจริง และ (ข) การทำงานในโหมคอัตโนมัติเป็นการควบคุมมอเตอร์ในแนว xy โดยการกำหนดจำนวนจุดที่ต้องการจะอ่านสัญญาณทั้งสองแนวแกน เมื่อกำหนดเรียบร้อยแล้วมอเตอร์จะเคลื่อนที่อัตโนมัติ ดังรูปที่ 3.22 และทำการเก็บสัญญาณดิจิทัลที่อ่านได้จากเครื่องตรวจจับที่ทุกๆตำแหน่งที่หัวอัลตราโซนิกโพรบเคลื่อนที่ไป ข้อมูลที่ได้จะถูกเก็บเข้าแฟ้มข้อมูลก่อนนำไปประมวลผลข้อมูลเพื่อสร้างเป็นภาพถ่ายอัลตราโซนิก



รูปที่ 3.22 ทิศทางการสแกนหัวอัลตราโซนิกโพรบในโหมคอัตโนมัติ

3.9 โปรแกรมสร้างภาพจากแฟ้มข้อมูล

การนำข้อมูลที่ได้มาประมวล ใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ของMATHWORKS ที่รู้จักกันว่า MATLAB โดยขั้นแรกจะทำการอ่านข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลที่เก็บมาได้จากชุดควบคุมเครื่องสแกน หลังจากนั้นจะนำข้อมูลมาแปลงและจัดการข้อมูลให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องเนื่องจากการเก็บข้อมูล จะเก็บข้อมูลจากซ้ายไปขวา และจากขวาไปซ้าย สลับกันไปมา เมื่อเรียงข้อมูลใหม่เสร็จเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะนำข้อมูลที่ได้อ่านไปสร้างภาพ ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 โฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมสร้างภาพซี-สแกน

บทที่ 4

การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการทดลอง ผลการทดลอง และบทวิเคราะห์ผล ในการศึกษาาระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน โดยพิจารณาการทดลองออกเป็นสองส่วนด้วยกัน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของระบบสร้างภาพที่พัฒนาขึ้นว่ามีประสิทธิภาพระดับใดและมีข้อจำกัดในด้านใดบ้าง และส่วนที่สองเป็นการศึกษาแนวทางการประยุกต์ระบบสร้างภาพที่พัฒนาขึ้นไปใช้ทดสอบและสร้างภาพโครงสร้างของความไม่ต่อเนื่องภายในวัสดุ

4.1 การทดสอบและศึกษาลักษณะสมบัติของระบบสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนที่พัฒนาขึ้น

ในการทดลองแรก ได้ทำการทดสอบและศึกษาสมบัติ รวมถึงข้อจำกัดในการสร้างภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น โดยเลือกศึกษาพารามิเตอร์และแฟกเตอร์ที่มีผลต่อการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้ชุดสแกน xyz ที่สร้างและพัฒนาขึ้นมาเอง โดยมีแฟกเตอร์ของชุดสแกนทางกลที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อระบบการวัดและสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ได้แก่ ความลาดเอียงของระบบสแกน นอกจะลักษณะสมบัติของชุดสแกนแล้วคุณสมบัติของระบบสร้างภาพแบบซี-สแกนที่สนใจ ได้แก่ ข้อจำกัดและลักษณะสมบัติของอัลตราโซนิกโพรบในเรื่องของความละเอียดในการตรวจวัดวัสดุ ระยะโฟกัส และโฟคัล โชน

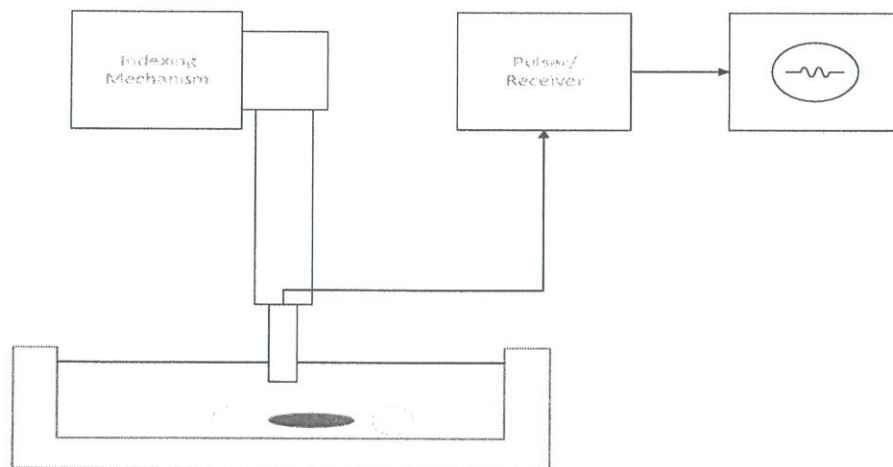
4.1.1 ความลาดเอียงของระบบสแกนตามแนวแกน z

เพื่อหาความคลาดเคลื่อนของระยะโฟกัสตามแนวแกน z จึงได้ออกแบบการทดลองวัดหาความลาดเอียงของระบบสแกน โดยเลือกใช้วิธีวัดหาระยะทางด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกจกฟิสิกส์ที่ได้กล่าวไว้แล้วในสมการที่ (3.1) ของบทที่ 3 ว่า $2d = vt \iff d = vt/2$ โดยความคลาดเคลื่อนของระยะทางลาดเอียงของระบบสแกนหาได้จากความแตกต่างของเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเคลื่อนที่เมื่อทราบความเร็วเสียงของตัวกลางที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่าน โดยทำการติดตั้งระบบการทดลอง

ดังรูปที่ 4.1 การทดลองหาความคลาดเคลื่อนของเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเคลื่อนที่เทียบกับตำแหน่งอ้างอิง ($t_{xy} - t_{ref}$) ซึ่งกำหนดไว้มุมขวาล่างของแผ่นฐานรอง กระทำโดยการเคลื่อนหัวอัลตราโซนิกโพรบไปในแนวแกน x ทั้งหมด 5 ตำแหน่งแต่ละตำแหน่งห่างกันเป็นระยะ 3 เซนติเมตร และเคลื่อนหัวโพรบไปตามแนวแกน y ทั้งหมด 6 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งเช่นกัน 3 เซนติเมตรเช่นกัน ในการทดลองสิ่งที่ต้องคำนึงคือ “ต้องทำการวัดในขณะที่อุณหภูมิของน้ำไม่เปลี่ยนแปลง” เนื่องจากความเร็วเสียงมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นดังสมการที่ (4.1)

$$V = 1410 + 4.21T - 0.037T^2 \quad (4.1)$$

โดย v คือความเร็วของเสียงในน้ำ หน่วยเป็น เมตรต่อวินาที และ T เป็นอุณหภูมิเซลเซียส



รูปที่ 4.1 การติดตั้งระบบเพื่อวัดความคลาดเคลื่อนในแนวแกน z

ผลจากการทดลอง

-จากการทดลองจะได้ค่า ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกโดยสัญญาณตรวจสอบได้บนจอออสซิลโลสโคป

-จากผลต่างเวลาในการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกเราสามารถคำนวณหาระยะทางที่คลาดเคลื่อนแต่ละตำแหน่งตามแนว x และ y ได้ โดยในการทดลองเราวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนและหลังการทดลองด้วยดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ จากนั้นก็จะรู้ระยะทางคลาดเคลื่อนของระบบสแกนตาม

แนว x และ y จากนั้นก็นำผลตำแหน่งความคลาดที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความคลาดเคลื่อน (mm) แกน y กับ ระยะทางตามแนวแกน $x - y$ (mm) อย่างละกราฟความชันของกราฟแสดง ระยะทางคลาดเคลื่อนของการโฟกัสในแนวแกน z ของระบบสแกนต่อระยะทาง

*ซึ่งจากการทดลองนี้กลุ่มของข้าพเจ้าทำไม่สำเร็จจึงต้องการการดำเนินงานต่อ

4.1.2 ขีดจำกัดในการตรวจสอบจุดบกพร่องภายในวัสดุ

เพื่อหาข้อจำกัดในการตรวจสอบชิ้นงานวัสดุด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกแบบพัลส์-สะท้อนกลับ อันเนื่องมาจากอุปกรณ์และชุดเครื่องมือที่นำมาใช้ จากบทที่ 2 เราทราบแล้วว่าพัลส์ของคลื่นอัลตราโซนิกที่ถูกกระตุ้นให้สั้นจะค่อยๆลดทอนลงตามเวลาและระยะทาง ในการตรวจสอบแบบพัลส์-สะท้อนกลับเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกวิ่งไปกระทบวัสดุจะเกิดการสะท้อนกลับ โดยแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับจะลดทอนลงอย่างช้าๆตามเวลา โดยช่วงเวลานี้จะสั้นหรือยาวขึ้นอยู่กับแอมป์แกกเตอร์ (damping factor) ของอัลตราโซนิกโพรบและเครื่องพัลส์เซอร์ที่นำมาใช้ซึ่งในช่วงเวลานี้จะไม่สามารถตรวจสอบพัลส์ของคลื่นสะท้อนกลับลูกอื่นๆได้ เรียกระยะทางช่วงนี้ว่า เดด โซน (dead zone) ดังนั้นเดดโซนจึงเป็นขีดจำกัดที่บอกถึงตำแหน่งตื้นที่สุดในการตรวจสอบจุดบกพร่องในเนื้อวัสดุ ได้ทำการทดลองวัดคราบเวลา เดดโซน (t_{dz}) กับชุดเครื่องมือที่นำมาใช้ในชุดเครื่องมือนี้ ประกอบด้วย เครื่องพัลส์เซอร์รุ่น 5072 PR และ 5073 PR อัลตราโซนิกโพรบ

- ทดลองเพื่อหาค่า เดดโซน ที่ดีที่สุดในการตรวจสอบวัสดุที่ตำแหน่งต่างๆ หาเดดโซนโดยการปรับค่า damping factor และค่า Gain (dB)

4.1.3 การเคลื่อนที่ของอัลตราโซนิกโพรบในแนวตั้งและระยะโฟกัส

การทดสอบและการสร้างภาพวัสดุด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกซี-สแกนแบบจุ่ม (immersion method) พารามิเตอร์และแฟกเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ข้อจำกัดของระยะห่างระหว่างอัลตราโซนิกโพรบกับชิ้นงาน ความละเอียดของสตีปในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนตั้ง ระยะ โฟกัสและ โฟลัด โซนของหัวอัลตราโซนิกโพรบที่นำมาใช้ ข้อจำกัดในการตรวจสอบแบบจุ่มนั้น อัลตราโซนิกโพรบและชิ้นงานจะต้องวางห่างกันเป็นระยะทางตามสมการที่ (4.2)

$$WP \geq n (v_w/v_M)MP \quad (4.2)$$

เมื่อ WP เป็นระยะทางระหว่างโพรบกับชิ้นงาน

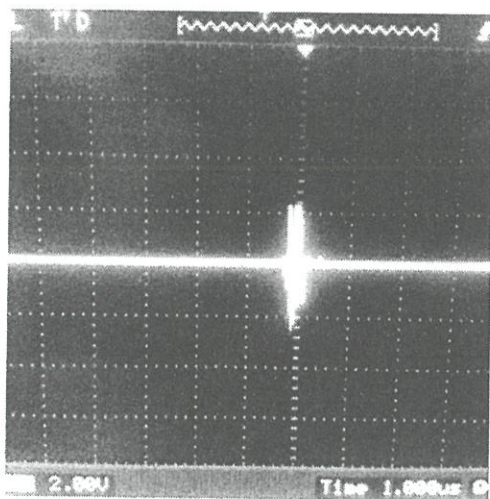
MP เป็นความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบ

V_w และ V_M เป็นความเร็วเสียงของน้ำและชิ้นงานตามลำดับ

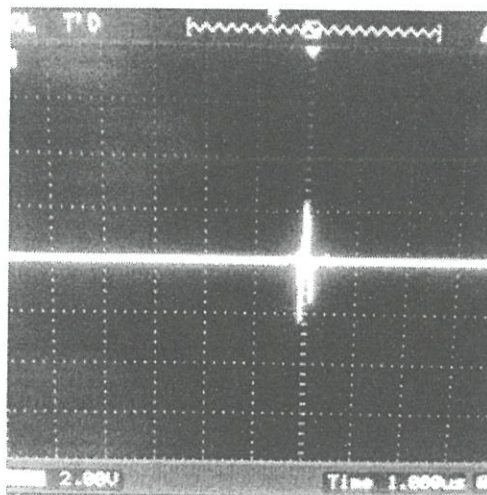
-จากสมการนี้จะทำการทดลองเพื่อวัดขีดจำกัดของระยะห่างของโพรบกับชิ้นงาน (หาระยะโฟกัส) โดยทดลองวัดที่ตำแหน่งต่างๆหลายๆตำแหน่งแล้วนำมาเฉลี่ยหาค่าที่เหมาะสม

4.1.4 ทดลองหาช่วงที่แอมพลิจูดคงที่และแอมพลิจูดสูงที่สุดเรียกว่า โฟกัสเชิงโซนโดยการวัดที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวแกน z

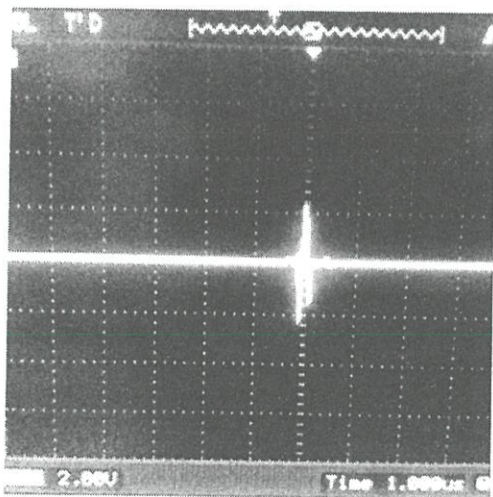
ในการทดลองข้างต้น เป็นการศึกษาขีดจำกัดในการวางตำแหน่งของอัลตราโซนิกโพรบของระบบสร้างภาพที่พัฒนาขึ้น ต่อไปจะศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญของอัลตราโซนิกโพรบที่ใช้ในระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน ได้แก่ ระยะโฟกัส โดยคลื่นสะท้อนกลับที่ตำแหน่งโฟกัสจะมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ เพื่อศึกษาคุณสมบัติการโฟกัสของอัลตราโซนิกโพรบ PANAMETRICS รุ่น V310-N-SU ได้ทำการทดลองปรับเลื่อนตำแหน่งของอัลตราโซนิกโพรบตามแนวแกน Z แล้ววัดขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับที่ความสูง Z ต่างๆ เพื่อสังเกตลักษณะของการโฟกัส (focusing profile) วิธีการวัดด้วยระยะห่างระหว่างอัลตราโซนิกโพรบกับระยะชิ้นงานใช้หลักการการหาระยะทางด้วยอัลตราโซนิกดังกล่าวมาข้างต้น ทำโดยการวัดคาบเวลาของคลื่นสะท้อนกลับที่ความสูงต่างๆ และควบคุมอุณหภูมิของน้ำคงที่ไว้ที่ 26 องศาเซลเซียส ดังนั้นความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำจะประมาณ 1495 เมตรต่อวินาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2



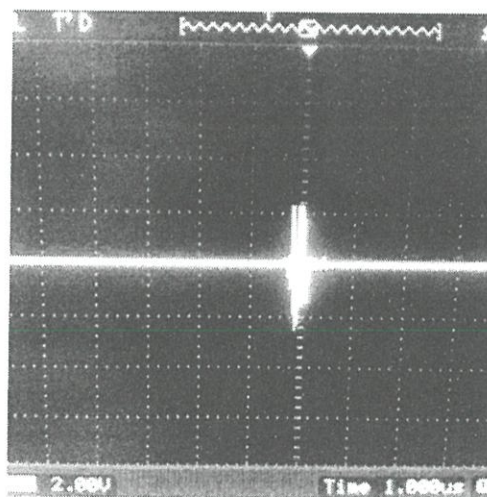
ระยะห่าง = 21.7 mm



ระยะห่าง = 22.6 mm

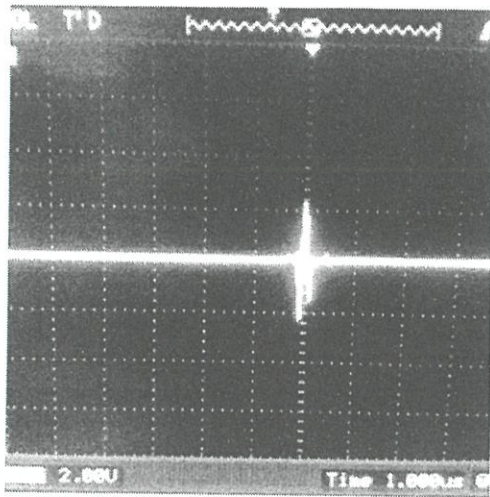


ระยะห่าง = 24.4 mm

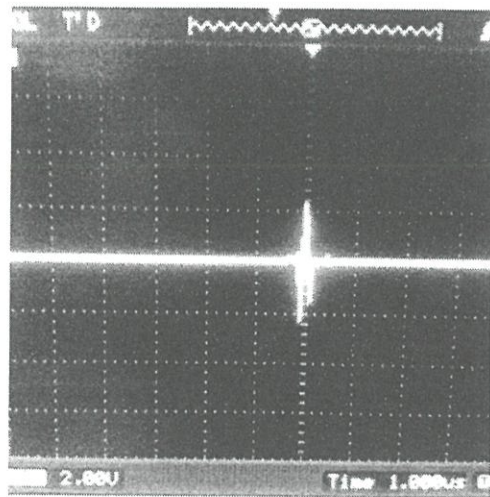


ระยะห่าง = 25.6 mm

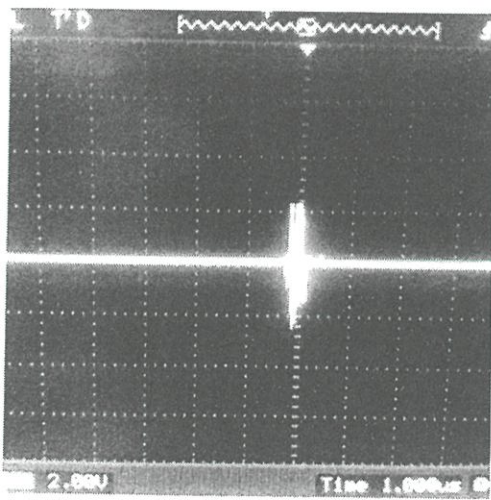
รูปที่ 4.2 สัญญาณคลื่นสะท้อนที่ระยะห่างต่างๆของโพรบกับชิ้นงาน



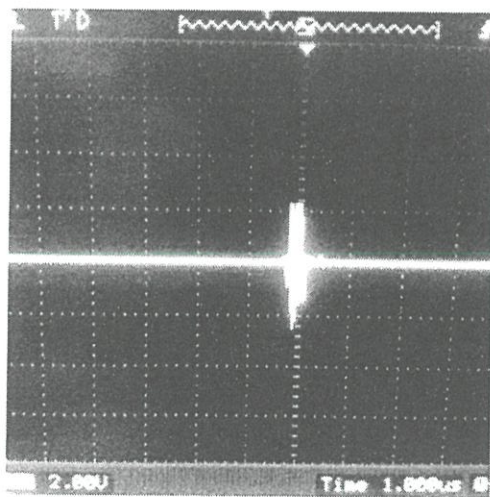
ระยะห่าง = 27.4 mm



ระยะห่าง = 31.6 mm



ระยะห่าง = 34.1 mm



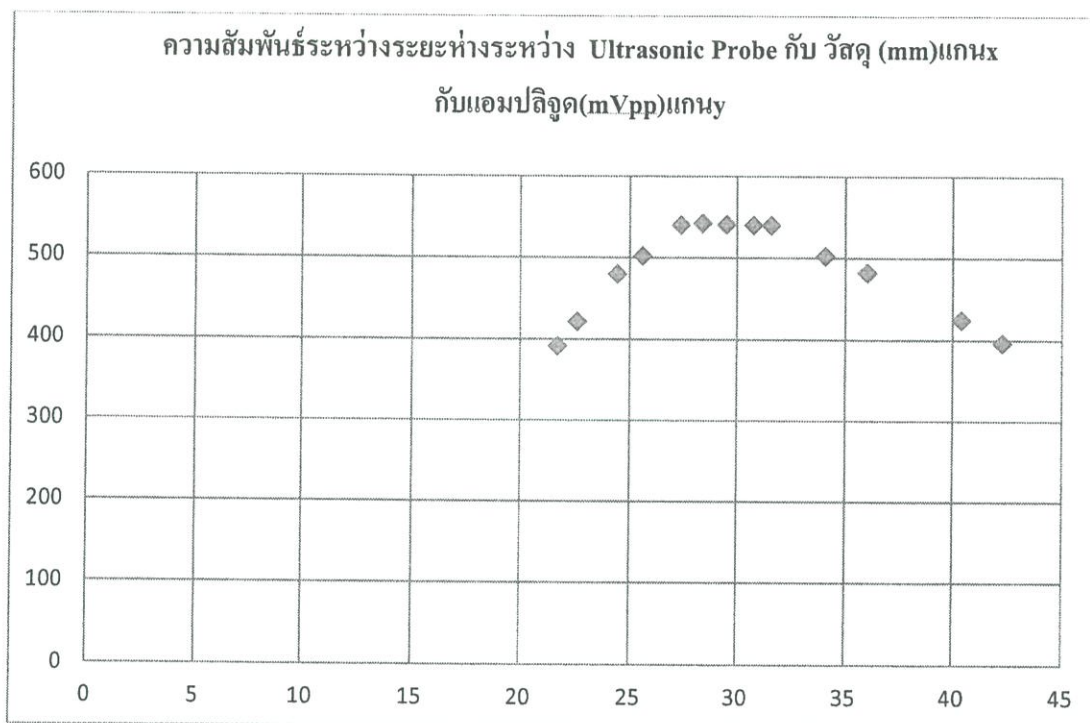
ระยะห่าง = 36.0 mm

รูปที่ 4.2 (ต่อ) สัญญาณคลื่นสะท้อนที่ระยะห่างต่างๆของโพรบกับชิ้นงาน

ตารางที่ 3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของระยะห่างของโพรบกับขนาดของคลื่น
สะท้อน

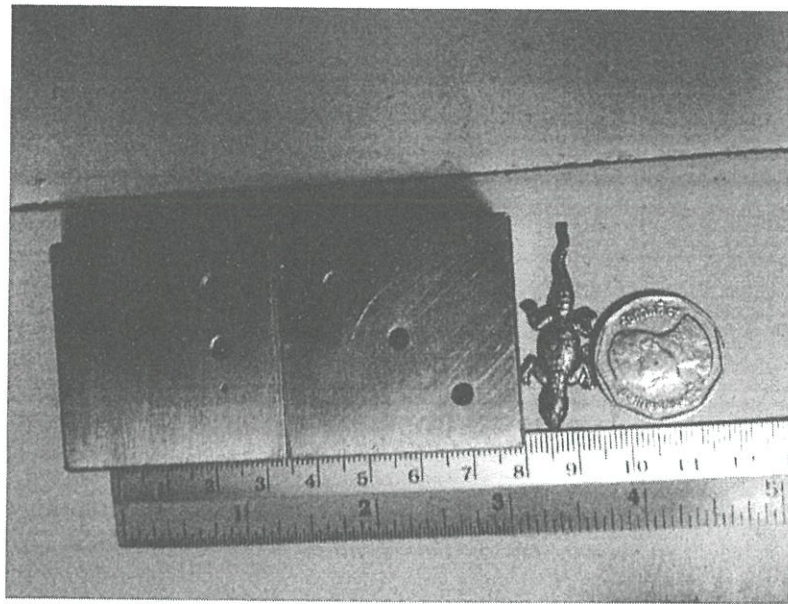
| ระยะของโพรบที่ความสูงต่างๆ (mm) | แอมพลิจูด (mVpp) |
|---------------------------------|------------------|
| 21.7 | 392 |
| 22.6 | 422 |
| 24.4 | 480 |
| 25.6 | 502 |
| 27.4 | 540 |
| 28.4 | 542 |
| 29.5 | 541 |
| 30.8 | 540 |
| 31.6 | 540 |
| 34.1 | 502 |
| 36.0 | 482 |
| 40.4 | 424 |
| 42.3 | 396 |

ตารางที่ 3 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัลตราโซนิคโพรบและ
 ใช้งานกับขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อน ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายอัลตราโซนิคซี-สแกนของเหรียญจากเครื่องที่พัฒนา

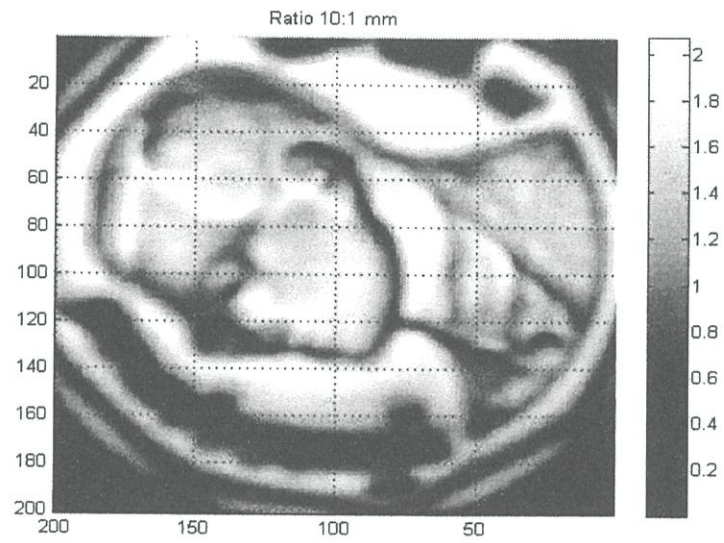
เพื่อทดสอบความสามารถในการแยกแยะ รวมถึงความละเอียดของภาพถ่ายซี-สแกนที่ถ่ายจาก
 ชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นทดสอบระบบด้วยการสร้างภาพของวัสดุที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนขึ้น จึงได้ทดลอง
 สร้างภาพของเหรียญ สแตนเลสที่มีรูกับไม่มีรู และจิ้งจก(เครื่องราง) ดังรูปที่ 4.4 โดยภาพถ่ายเหรียญ
 สแตนเลส และจิ้งจก (เครื่องราง) ดังรูปที่ 4.5 ภาพถ่ายก่อนที่จะสแกนด้วยคลื่นอัลตราโซนิคแบบ
 ซี-สแกน (ภาพจริง) ในรูปที่ 4.6 สังเกตเห็นว่าภาพถ่ายมีความสามารถแยกแยะได้ชัดเจนแต่ภาพที่ได้
 ยังไม่คมชัดส่วนตัวอักษรขนาดเล็กไม่สามารถแยกแยะได้ชัดเจนของภาพภาพถ่ายด้วยคลื่นอัลตรา
 โซนิคแบบซี-สแกนของเหรียญ 5 บาทด้วยความละเอียด = 0.1 mm.



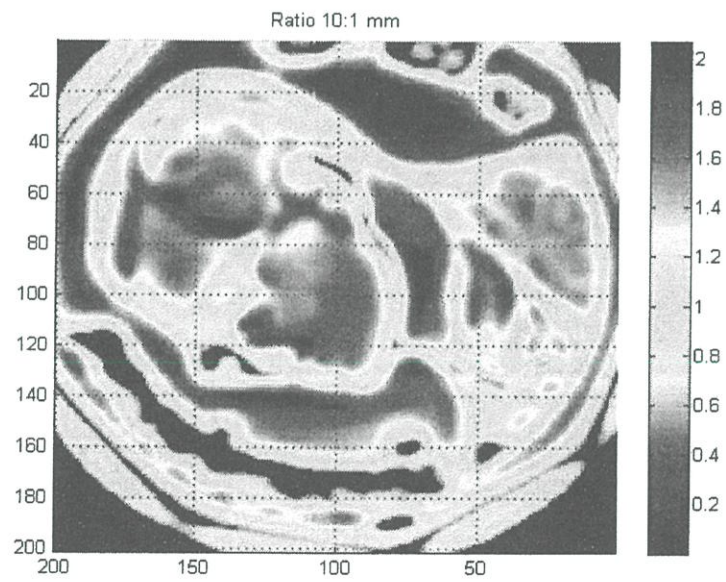
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายเหรียญ สแตนเลส และจิ้งจก (เครื่องราง)



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายก่อนที่จะสแกนด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-แกน (ภาพจริง)

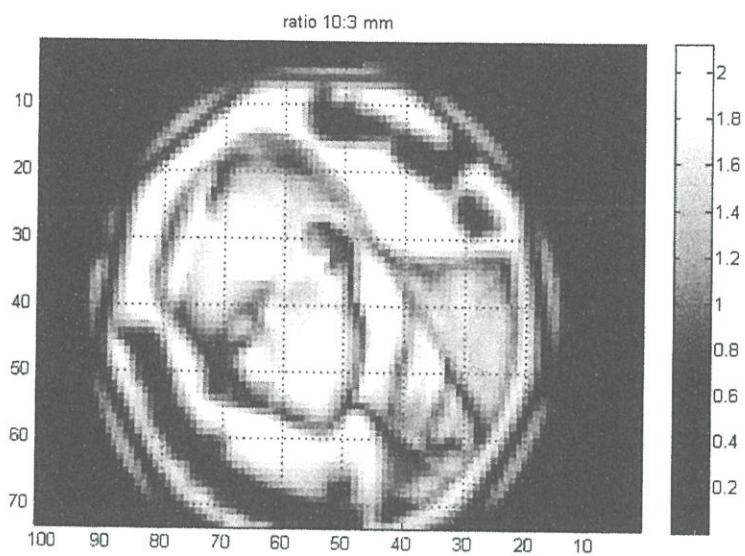


ความละเอียด = 0.1 mm.

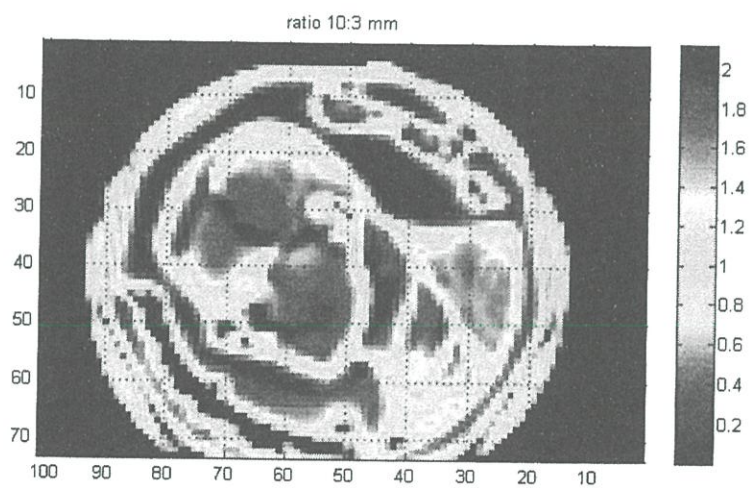


ความละเอียด = 0.1 mm.

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนของหริยญ 5 บาทด้วยความละเอียด = 0.1 mm.



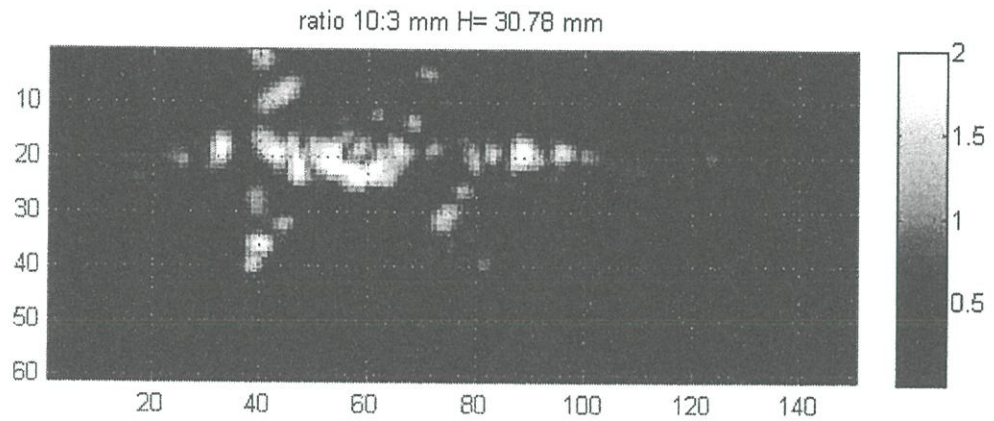
ความละเอียด = 0.3 mm.



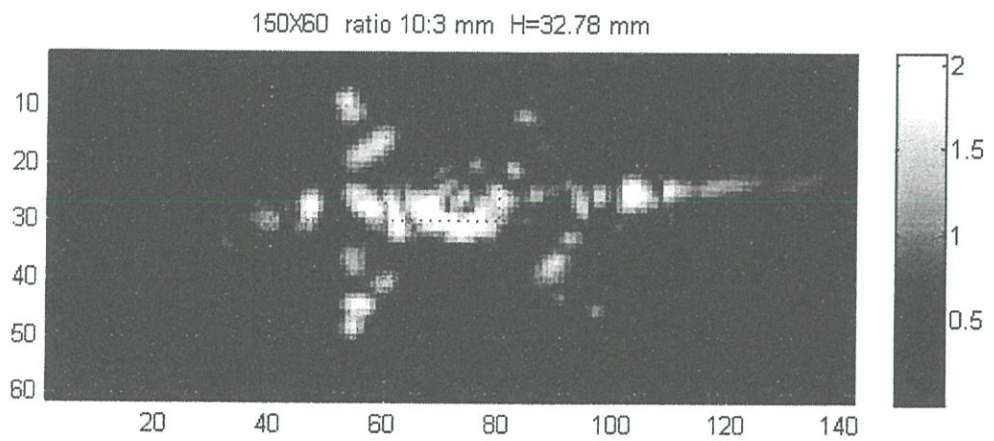
ความละเอียด = 0.3 mm.

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนของเหรียญ 5 บาทด้วยความละเอียด = 0.3 mm.

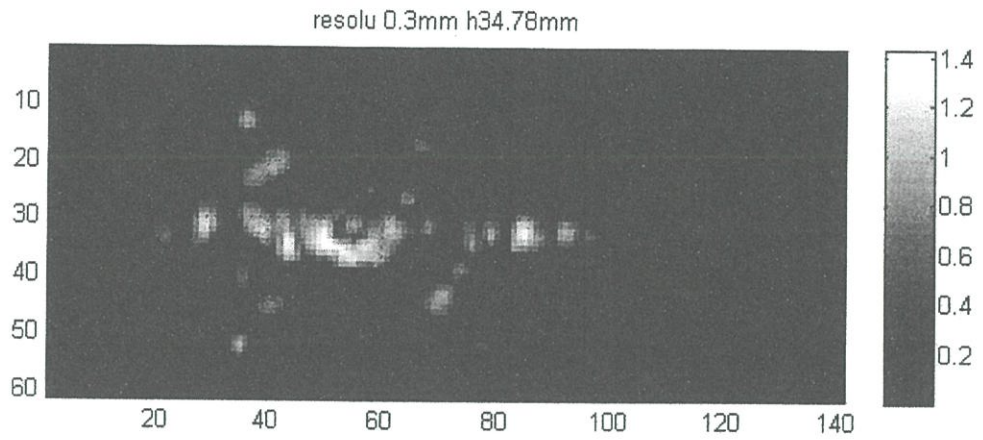
เพื่อศึกษาและทดลองหาข้อสนับสนุนขีดความสามารถในด้านความละเอียดในการสแกนของระบบสร้างภาพที่พัฒนาขึ้น ได้ทำการทดลองสร้างภาพของจิ้งจก (เครื่องราง) ที่ทำจากเงินด้วยหัวอัลตราโซนิกโพรบที่ความถี่ 5 MHz แสดงดังรูปที่ 4.8



ความละเอียด = 0.3 mm. สูง = 30.78 mm.



ความละเอียด = 0.3 mm. สูง = 32.78 mm.

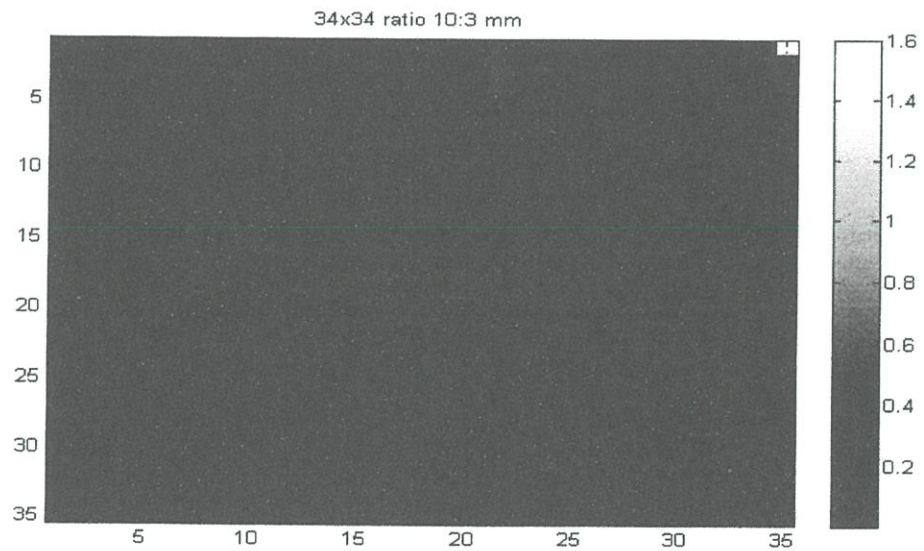


ความละเอียด = 0.3 mm. สูง = 34.78 mm.

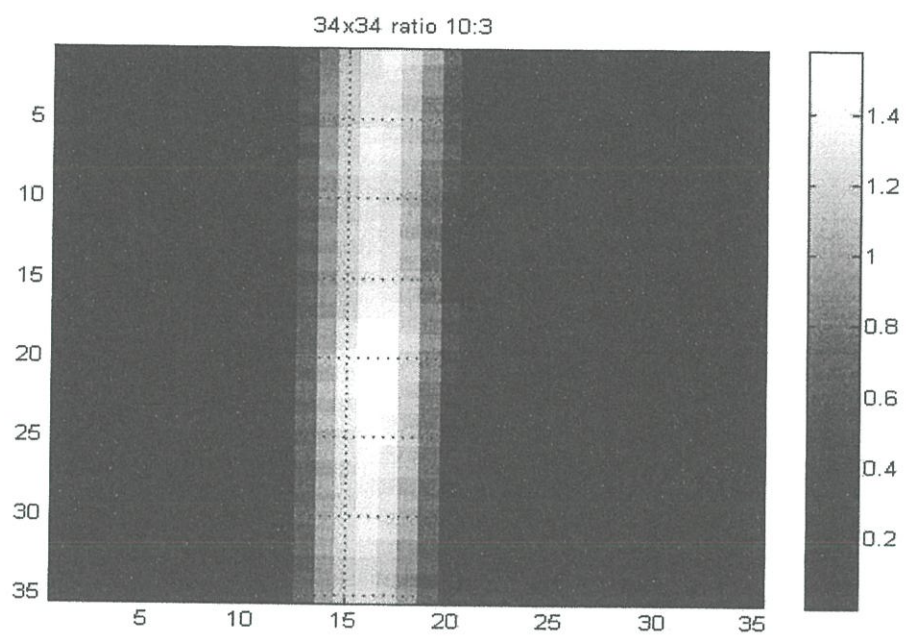
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนของจิ้งจก(เครื่องราง)

การสแกนอัลตราโซนิกโพรบของสแตนเลสที่มีรูในช่วงระยะที่ตรวจสอบ 6 mm. ถึง 10 mm.

แสงดังรูปที่ 4.9 ภาพถ่ายด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนของสแตนเลสที่ไม่มีรูและมีรู



ความละเอียด = 0.3 mm. ตำแหน่งที่ไม่มีรู



ความละเอียด = 0.3 mm. ตำแหน่งที่มีรู

รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนของสแตนเลสที่ไม่มีรูและมีรู

บทที่ 5

บทสรุป แนวทางในการพัฒนาและประยุกต์

ในบทนี้เป็นส่วนสรุปผลการดำเนินงานของการออกแบบและพัฒนาาระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน ตลอดจนปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินงาน รวมถึงผลการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นและการทดลองศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบสร้างภาพวัสดุชนิดต่าง ๆ ในส่วนท้ายของบทนี้ได้เสนอข้อเสนอแนะ แนวทางการพัฒนาและปรับปรุง และการประยุกต์ใช้งาน เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยในอนาคตต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัยพัฒนาระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการทดสอบ

1. ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนที่ได้พัฒนาขึ้นมา อาศัยหลักการสะท้อนกลับและทะลุผ่านเมื่อลำคลื่นอัลตราโซนิกกระทบกับบริเวณรอยต่อระหว่างสองวัสดุที่อิมพีแดนซ์ของเสียงแตกต่างกัน โดยนำขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับมาใช้สร้างเป็นภาพของวัสดุในแต่ละตำแหน่ง เนื่องจากสัญญาณแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ สัมประสิทธิ์การคูดคลื่น สัมประสิทธิ์การสะท้อน และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน เป็นต้น ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำเอาข้อมูลขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนมาวิเคราะห์หาความแข็งแรงหรือความยืดหยุ่นของวัสดุ ภาพถ่ายซี-สแกนที่ได้จึงเหมาะต่อการใช้เพียงเพื่อบอกถึงความไม่ต่อเนื่องในเนื้อวัสดุ เช่น ความเป็นรูพรุน จุดบกพร่องหรือรอยแตกรอยร้าว เป็นต้น
2. อุปกรณ์และชุดเครื่องมือของระบบสร้างภาพที่ได้พัฒนาขึ้น ประกอบไปด้วย (1) หัวอัลตราโซนิกโพรบ ทำหน้าที่สร้างคลื่นอัลตราโซนิกจากสัญญาณไฟฟ้าและรับ/แปลงคลื่นอัลตราโซนิกเป็นสัญญาณไฟฟ้า มีความถี่กลางอยู่ที่ 5.6 MHz มีระยะโฟกัสที่ 0.75 นิ้ว หรือประมาณ 19 mm ลำคลื่นมีความกว้างประมาณ 0.902 mm (2) พัลส์เซอร์และตัวรับ เป็นเครื่องมือสำหรับสร้างพัลส์กระตุ้นอัลตราโซนิกโพรบ มีพลังงานสูงสุดเท่ากับ 310 ไมโครจูล และมีอัตราขยายภาครับสูงสุดที่ +59 dB หรือมีอัตราขยายประมาณ 1,000 เท่า (3) เครื่องตรวจจับสัญญาณพีค ใช้ทำหน้าที่แปลงพีคแอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้รับเป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต โดยมีความละเอียด เท่ากับ 3.92 mV (4) ชุดสแกนทางกลในแนว xyz และ

อ่างน้ำ มีระยะสแกนทั้งแนวแกน x y และ z เท่ากัน เท่ากับ 310 mm (5) ชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของชุดสแกนทำหน้าที่ควบคุมตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ในแนวแกน x y และ z (6) ออสซิลโลสโคป ใช้มอเนอริ์สัญญาณในขั้นตอนการติดตั้งและก่อนเริ่มทดลองสร้างภาพของวัสดุ และ(7) เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมสำหรับสร้างภาพ พัฒนาด้วย MATLAB Relesae 11 ทำหน้าที่อ่านและแปลงเพิ่มข้อมูลที่เก็บไว้เป็นภาพถ่ายซี-สแกน

3. ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบความคลาดเคลื่อนของระบบสแกนตามแนวแกนตั้ง z ด้วยเทคนิคการวัดหาระยะทางด้วยคลื่นอัลตราโซนิคแบบพัลส์สะท้อนกลับ เมื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่คลาดเคลื่อนไปกับระยะทางตามแนวระนาบ xy พบว่าระยะห่างระหว่างอัลตราโซนิคโพรบกับชิ้นงานมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวแกน x เท่ากับ 3.43 ± 0.32 ไมโครเมตรต่อเซนติเมตร ละมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวแกน y เท่ากับ 59.6 ± 0.3 ไมโครเมตรต่อเซนติเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเป็นบวกหมายความว่าระยะทางระหว่างอัลตราโซนิคโพรบกับชิ้นงานมีระยะทางมากขึ้นเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง และจากข้อมูลที่ได้ ในการทดลองสร้างภาพเมื่อไม่ให้เกิดผลรบกวนต่อระยะโฟกัสในระหว่างการตรวจสอบและสร้างภาพ จึงวางชิ้นงานวัสดุด้านยาวตามแนวแกน x เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าและวางชิ้นงานวัสดุด้านกว้างตามแนวแกน y
4. ได้ทำการทดลองหาความละเอียดในการเคลื่อนที่ของชุดสแกนในแนวแกน x y และ z เนื่องจากชุดสแกนในแนว x y และ z มีระยะพิทของแกนเกลียวเท่ากัน คือเท่ากับ 5 mm และใช้ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ชุดเดียวกัน ดังนั้นระยะในการเคลื่อนที่ที่สเต็ปของมอเตอร์ทั้งสามแกนจึงมีระยะทางเท่ากัน จึงทดลองวัดความละเอียดในการเคลื่อนที่ของชุดสแกนเฉพาะแนวแกน z เนื่องจากสามารถวัดระยะทางได้ง่ายด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคดังกล่าวมาแล้วในข้อ 3

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

ได้เท่ากับ 143.6 ไมโครเมตร นำมาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (standard deviation of mean value) จากสมการ

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}} \text{ และ } s_{\bar{X}} = \frac{s}{\sqrt{N - 1}}$$

ตามลำดับ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความละเอียดในการสแกนเท่ากับ 32.8 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความละเอียดในการสแกนเฉลี่ยเท่ากับ 9.1 ดังนั้นระยะความละเอียดในการเคลื่อนอัลตราโซนิคโพรบของระบบสร้างภาพอัลตราโซนิคที่พัฒนาขึ้นเท่ากับ 143.6 ± 9.1 ไมโครเมตร ที่ความน่าเชื่อถือ 68%

5. จากข้อ 2 เราทราบระยะโฟกัสของอัลตราโซนิคโพรบว่าประมาณ 19 mm ซึ่งเป็นระยะโฟกัสที่ผู้ผลิตวัดจากการทดลองกับวัตถุสะท้อนที่มีลักษณะเป็นจุดทรงกลม เพื่อศึกษาระยะโฟกัสของอัลตราโซนิคโพรบที่นำมาใช้กับชิ้นงานวัสดุที่ต้องการทดสอบ (มีรูปทรงลักษณะเป็นระนาบเรียบ) จึงได้ทดลองวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับและระยะห่างระหว่างโพรบกับชิ้นงาน ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.3 โดยตำแหน่งที่มีขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนสูงที่สุดอยู่ในช่วงระยะระหว่าง 27.4 ถึง 31.6 mm จากข้อมูลดังกล่าวสังเกตเห็นว่าขนาดแอมพลิจูดจะมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงระยะประมาณ 4.2 mm ซึ่งเป็นช่วงระยะทางที่อัลตราโซนิคโพรบสามารถคลาดเคลื่อนได้โดยไม่ทำให้ผลของข้อมูลเสียหาย และจากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.3 ยังบอกข้อมูลเพิ่มเติมว่า เมื่ออัลตราโซนิคโพรบมีระยะห่างจากชิ้นงานเกินระยะโฟกัสออกไป แอมพลิจูดของสัญญาณลดลงเป็นลักษณะเชิงเส้น เมื่อนำมาพิต (fit) กับสมการเชิงเส้นได้ $y = -13.234x + 956.9$ โดยมี R^2 เท่ากับ 0.9983 (ค่า R^2 เป็นพารามิเตอร์ที่บอกเราถึงความถูกต้องของสมการที่นำมาพิตกับข้อมูล ค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1.00 จะมีความถูกต้องมาก) โดย x คือระยะทางหน่วยเป็นมิลลิเมตร และ y เป็นขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนหน่วยเป็นมิลลิโวลต์พีคทูพีค ส่วนกรณีที่อัลตราโซนิคโพรบกับชิ้นงานมีระยะห่างใกล้กันมากขึ้นแอมพลิจูดของสัญญาณมีลักษณะลดลงอย่างรวดเร็วและไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังสมการ $y = 637.58 \ln(x) - 1565$ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9914
6. จากผลการทดลองสร้างภาพถ่ายซี-สแกนของสเกลบนไม้บรรทัดเหล็กด้วยอัลตราโซนิคโพรบขนาดความถี่ 5 MHz และขนาดความถี่ 15 MHz เพื่อทดสอบความละเอียดในการตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องหรือจุดบกพร่องของชิ้นงาน จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 พบว่า ภาพถ่ายซี-สแกนที่สร้างขึ้นจากหัวอัลตราโซนิคโพรบความถี่สูงสามารถสร้างภาพที่มีความคมชัดและความสามารถในการแยกแยะได้ดีกว่าหัวอัลตราโซนิคโพรบความถี่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของลำคลื่นอัลตราโซนิคจากโพรบความถี่สูง 15MHz เล็กกว่า (จากการคำนวณเท่ากับ 0.3 mm) ในขณะที่โพรบความถี่ต่ำ 5 MHz มีลำคลื่นกว้าง 0.9 mm

7. จากผลการทดลองในรูปที่ 5.5 และ 5.6 เมื่อเพิ่มเส้นแบ่งช่องลงไปในภาพถ่ายเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของระยะทางที่หาได้จากภาพถ่ายซี-สแกนกับระยะทางจริงของวัสดุ พบว่าภาพถ่ายที่ได้มีความถูกต้องของระยะทาง โดยคิดเป็นการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไป 36 สเต็ป จะเท่ากับระยะทางที่หัวโพรบเคลื่อนไป 5 mm
8. จากผลการทดลองทดสอบการสร้างภาพของชิ้นงานที่รู้ตำแหน่งและขนาดของจุดบกพร่องด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นร่วมกับหัวโพรบความถี่ 5 MHz พบว่าภาพถ่ายที่ได้สามารถแยกแยะและให้รายละเอียดของตำแหน่งและขนาดของจุดบกพร่องได้ดีในขนาดความละเอียดของจุดบกพร่องมากกว่า 1 mm ส่วนขนาดของจุดบกพร่องที่มีขนาดเล็กกว่า 1 mm พอจะสังเกตเห็นได้แต่ไม่ได้ความคมชัดและขนาดที่ถูกต้องเมื่อเทียบกับกรณีของความไม่ต่อเนื่องที่มีขนาดใหญ่

5.2 ปัญหาที่พบ

1. เนื่องจากในการทำไคร์เวอร์ของมอเตอร์เกิดปัญหาเนื่องจากการทำงานของไอซีร้อนมากเกินไปทำให้ไอซีเกิดระเบิดได้ เพราะพัลส์ที่ส่งมากเกินไปจนทำให้ไอซีระเบิด วิธีแก้ปัญหาคือควรถอดสายที่เชื่อมต่อระหว่างไคร์เวอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์ออกซะก่อน
2. ในการส่งชื่อไอซี ต้องใช้เวลารอนานถึง 1 สัปดาห์หรือบางครั้งอาจเป็นเดือนๆ ทำให้งานที่ทดลองล่าช้า วิธีแก้ปัญหาคือส่งไอซีเผื่อไว้สักหลายๆตัวเพื่อได้มีความไวในการทำงานมากขึ้น
3. บางครั้งในการทดสอบการสแกนมอเตอร์ บอร์ด ET-BASE51 มีปัญหาในการอัปเดตโปรแกรมลงบอร์ดไม่ได้ หรือเชื่อมต่อกับตัว RS 232 ไม่ได้ จึงทำให้มีความล่าช้า วิธีแก้ปัญหาคือลองลงโปรแกรมใหม่ ใหม่นั้นถ้าลองเปลี่ยนบอร์ดดู
4. ในการเชื่อมต่อการส่งเก็บข้อมูลในการสแกนนั้นไม่สามารถสื่อสารระหว่างตัวบอร์ด ET-BASE51 กับตัวโปรแกรม Visual Basic ที่ใช้เก็บข้อมูลได้ เนื่องจากศึกษามาได้ไม่พอและยังขาดผู้เชี่ยวชาญในด้านการเชื่อมต่อ Visual Basic ทำให้ไม่สามารถทำให้โปรแกรมสื่อสารกันและเก็บข้อมูลไม่ได้ วิธีแก้ปัญหาคือศึกษาและสอบถามผู้เชี่ยวชาญในการใช้ Visual Basic

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การทำงานควรตั้งใจศึกษาโปรแกรมที่ใช้งานในการทำงานให้มาก
2. การทำงานต้องใส่ใจการทำงานให้มากขึ้นเพื่อให้งานจะได้เสร็จตามเป้าหมายและมีเวลาแก้ปัญหามากขึ้น
3. ได้นำชุดสแกนมอเตอร์จากกลุ่มอื่นมาใช้งานเพื่อเก็บข้อมูล เพื่อที่จะนำไปสร้างภาพที่ได้จากการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] D.W. Van Krevelen. Properties of Polymers. 3rd Ed. New York : Elsevier. 1990.
- [2] Paul McIntire (editor). Nondestructive Testing Handbook ; Volume 7 – Ultrasonic Testing. 2nd Ed. New York : American Society for Nondestructive Testing. 1991.
- [3] Alan R. Selfridge. “Approximate Material Properties in Isotropic Materials”, IEEE Trans. On Sonics and Ultrasonics, vol. SU-32, no. 3, May 1985. pp. 381-394.
- [4] Heinrich Kuttruff. Ultrasonics ; Fundamentals and Applications. London: Elsevier 1991.
- [5] Gilmore R.S. and Howard P.J. “Method of Dynamic Thresholding for Flaw Detection in Ultrasonic C-scan Images.” U.S. Patent no. 5608814. 1997.
- [6] Josef Krautkramer and Herbert Krautkramer. Ultrasonic Testing of Materials. 4th Ed. New York: Springer-Verlag. 1990
- [7] Jack Blitz and Geoff Simpson. Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing. London : Chapman & Hall. 1996.
- [8] Richard P. Feynman et. al., The Feynman Lectures on Physics ; Commemorative Issue volume 2. Canada : California Institute of Technology. 1989.
- [9] Lawrence E. Kinsler et. al., Fundamentals of Acoustics. 3rd Ed. Singapore : John Wiley & Sons. 1982.
- [10] Alan R. Selfridge, “Approximate Material Properties in Isotropic Materials,” IEEE Trans. On Sonics and Ultrasonics, vol. su-32, no.3, May 1985.

- [11] Lawrence E. Kinsler et. al., Fundamentals of Acoustics. 3rd Ed. Singapore : John Wiley & Sons. 1982.
- [12] ดุสิต เครื่องงาม. โพลีคสเตทฟิสิกส์. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2521
- [13] Wichit Sirichote, "Investigation of the Orientation of Glass Fiber in Glass Fiber Reinforced plastic through Shear Modulus Ultrasonic Measurements," TDO Quarterly, vol. 4, no. 1, 1995. Pp. 36-41.
- [14] Wichit Sirichote et.al., "Poisson's Ratio of Sintered Al Measured by Ultrasonic Method," Report of Tohoku National Industrial Research Institute, no. 28, 1995. Pp.15-22.
- [15] S.H. Ong et. al., "Acoustic Microscopy Reveals IC Packaging Hidden Defects," IEEE Electronic Packaging Technology Conference, 1997. pp. 297-303.
- [16] Eurico J. D'Sa et. al., "Defect Detection in Ultrasonic Images," TENCON'89 Fourth IEEE Region 10 International Conference, 1989. pp. 577-580.
- [17] T. Wang and J. Saniie, "Evaluation of Ultrasonic C-scan Attenuation Image," IEEE Ultrasonic Symposium, 1991. pp. 791-794.
- [18] N.Nishiwaki et. al., " Measurement of Injection Molding and Machining Process Using Ultrasonic Technique," IEEE Ultrasonics Symposium, 1998. pp. 775-758
- [19] Bill G.W. Yee and James C. Couchman, "Application of Ultrasound to NDE of Materials," IEEE Trans. On Sonics and Ultrasonics, vol. SU-23, no. 5, Sep 1976, pp.299-305.

ภาคผนวก

```
#include<reg51.h>
```

```
#include<intrins.h>
```

```
#include<stdio.h>
```

```
#define tx_pin P3_1
```

```
void rwx_step(unsigned int step,unsigned int dl);
```

```
void fwx_step(unsigned int step,unsigned int dl);
```

```
void rwy_step(unsigned int step,unsigned int dl);
```

```
void fwy_step(unsigned int step,unsigned int dl);
```

```
void delay(unsigned int ms);
```

```
char command;
```

```
char getchar(void);
```

```
void getcommand();
```

```
void escape_command();
```

```
/* x-axis */
```

```
sbit Aiu = P1^1;
```

```
sbit Biu = P1^2;
```

```
sbit Ciu = P1^3;
```

```
sbit Diu = P1^4;
```

```
sbit Eiu = P1^5;
```

```
sbit Ail = P3^2;
```

```
sbit Bil = P3^3;
```

```
sbit Cil = P3^4;
```

```
sbit Dil = P3^6;
```

```
sbit Eil = P3^7;
```

```
/** on-off motor ***/
```

```
sbit on_off_driver = P1^6;
```

```
**** y-axis ****/
```

```
sbit Aiu1 = P0^1;
```

```
sbit Biu1 = P0^2;
```

```
sbit Ciu1 = P0^3;
```

```
sbit Diu1 = P0^4;
```

```
sbit Eiu1 = P0^5;
```

```
sbit Ail1 = P2^2;
```

```
sbit Bil1 = P2^3;
```

```
sbit Cil1 = P2^4;
```

```
sbit Dil1 = P2^6;
```

```
sbit Eil1 = P2^7;
```

```
/** on-off motor ***/
```

```
sbit on_off_driver1 = P0^6;
```

```
/** main program **/
```

```
/*fwx command = 1
```

```
  rwx command = 2
```

```
  fwy command = 3
```

```
  rwx command = 4 */
```

```
void main(void)
```

```
/** 50 step per 1 millimeter **/
```

```
{
```

```
    int i = 0;
```

```
    int j=0;
```

```
    delay(1000);
```

```
    delay(1000);
```

```
    on_off_driver = 1;
```

```
    on_off_driver = 1;
```

```
    while(j<=30)
```

```
    {
```

```
        while(i<=60)
```

```
        {
```

```
            rwx_step(25,1);
```

```
            delay(1000);
```



```
        delay(1000);  
        delay(1000);  
        delay(1000);  
        delay(1000);  
while(i>=0)  
{  
    fwx_step(25,1);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    delay(1000);  
    i=i-1;  
}  
    rwy_step(25,1);  
    delay(1000);
```

```
        delay(1000);
        delay(1000);
        delay(1000);
        delay(1000);
        delay(1000);
        delay(1000);
        delay(1000);
        delay(1000);
        delay(1000);
        delay(1000);
        delay(1000);
        delay(1000);
        delay(1000);
        j=j+1;
    }
    fwy_step(1500,1);
    delay(1000);

    on_off_driver = 0;
    on_off_driver1 = 0;
}
```

```
char getchar(void)
```

```
{
    char c;
    while(!RI);
```

```

    RI = 0;

    c = SBUF;
    putchar(c); // echo to terminal
    return SBUF;
}

void getcommand()
{
    if (RI) command = getchar();

    else command = -1; /* no command has entered */

}

void escape_command()
{
    /*if(command== 0x31)*/

    if(command=="1")
    {
        on_off_driver = 1;

        fwx_step(3500,1);

        delay(1000);

        rwx_step(3500,1);

        delay(1000);

        /* step motor */

    }
}

```

```
/** Delay Millisecond **/
```

```
void delay(unsigned int ms)
```

```
{
```

```
    ms = ms * 62;
```

```
    while (ms--)
```

```
    {
```

```
        _nop_();
```

```
        _nop_();
```

```
        _nop_();
```

```
        _nop_();
```

```
    }
```

```
}
```

```
/** Reward Stepper Motor x **/
```

```
void rwx_step(unsigned int step,unsigned int dl)
```

```
/** 50 step per 1 millimeter
```

```
**/
```

```
{
```

```
    while(step--)
```

```
    {
```

```
//////////step 9
```

```
        Aiu = 1;
```

```
        Biu = 0;
```

```
        Ciu = 0;
```

Diu = 0;

Eiu = 1;

Ail = 0;

Bil = 0;

Cil = 1;

Dil = 0;

Eil = 0;

delay(dl);

////////////////////step 8

Aiu = 0;

Biu = 0;

Ciu = 0;

Diu = 0;

Eiu = 1;

Ail = 0;

Bil = 1;

Cil = 1;

Dil = 0;

Eil = 0;

delay(dl);

////////////////////step 7

Aiu = 0;

Biu = 0;

Ciu = 0;

Diu = 1;

Eiu = 1;

Ail = 0;

Bil = 1;

Cil = 0;

Dil = 0;

Eil = 0;

delay(dl);

////////////////////step 6

Aiu = 0;

Biu = 0;

Ciu = 0;

Diu = 1;

Eiu = 0;

Ail = 1;

Bil = 1;

Cil = 0;

Dil = 0;

Eil = 0;

delay(dl);

////////////////////step 5

Aiu = 0;

Biu = 0;

Ciu = 1;

Diu = 1;

Eiu = 0;

Ail = 1;

Bil = 0;

Cil = 0;

Dil = 0;

Eil = 0;

delay(dl);

////////////////////////////////step 4

Aiu = 0;

Biu = 0;

Ciu = 1;

Diu = 0;

Eiu = 0;

Ail = 1;

Bil = 0;

Cil = 0;

Dil = 0;

Eil = 1;

delay(dl);

////////////////////////////////step 3

Aiu = 0;

Biu = 1;

Ciu = 1;

Diu = 0;

Eiu = 0;

Ail = 0;

Bil = 0;

Cil = 0;

Dil = 0;

Eil = 1;

delay(dl);

////////////////////step 2

Aiu = 0;

Biu = 1;

Ciu = 0;

Diu = 0;

Eiu = 0;

Ail = 0;

Bil = 0;

Cil = 0;

Dil = 1;

Eil = 1;

delay(dl);

////////////////////////////////step 1

Aiu = 1;

Biu = 1;

Ciu = 0;

Diu = 0;

Eiu = 0;

Ail = 0;

Bil = 0;

Cil = 0;

Dil = 1;

Eil = 0;

delay(dl);

////////////////////////////////step 0

Aiu = 1;

Biu = 0;

Ciu = 0;

Diu = 0;

Eiu = 0;

Ail = 0;

Bil = 0;

Cil = 1;

Dil = 1;

Aiu = 1;

Biu = 1;

Ciu = 0;

Diu = 0;

Eiu = 0;

Ail = 0;

Bil = 0;

Cil = 0;

Dil = 1;

Eil = 0;

delay(dl);

////////////////////step 2

Aiu = 0;

Biu = 1;

Ciu = 0;

Diu = 0;

Eiu = 0;

Ail = 0;

Bil = 0;

Cil = 0;

Dil = 1;

Eil = 1;

delay(dl);

////////////////////step 3

Aiu = 0;

Biu = 1;

Ciu = 1;

Diu = 0;

Eiu = 0;

Ail = 0;

Bil = 0;

Cil = 0;

Dil = 0;

Eil = 1;

delay(dl);

////////////////////step 4

Aiu = 0;

Biu = 0;

Ciu = 1;

Diu = 0;

Eiu = 0;

Ail = 1;

Bil = 0;

Cil = 0;

Dil = 0;

```
Eil = 1;

delay(dl);

////////////////////step 5

Aiu = 0;

Biu = 0;

Ciu = 1;

Diu = 1;

Eiu = 0;

Ail = 1;

Bil = 0;

Cil = 0;

Dil = 0;

Eil = 0;

delay(dl);

////////////////////step 6

Aiu = 0;

Biu = 0;

Ciu = 0;

Diu = 1;

Eiu = 0;

Ail = 1;

Bil = 1;

Cil = 0;
```

```
Dil = 0;  
Eil = 0;  
delay(dl);  
////////////////////step 7
```

```
Aiu = 0;  
Biu = 0;  
Ciu = 0;  
Diu = 1;  
Eiu = 1;  
Ail = 0;  
Bil = 1;  
Cil = 0;  
Dil = 0;  
Eil = 0;
```

```
delay(dl);  
////////////////////step 8
```

```
Aiu = 0;  
Biu = 0;  
Ciu = 0;  
Diu = 0;  
Eiu = 1;  
Ail = 0;  
Bil = 1;
```

```
Cil = 1;

Dil = 0;

Eil = 0;

delay(dl);

////////////////////////////////step 9

Aiu = 1;

Biu = 0;

Ciu = 0;

Diu = 0;

Eiu = 1;

Ail = 0;

Bil = 0;

Cil = 1;

Dil = 0;

Eil = 0;

delay(dl);

}
```

```
}
```

```
/** Reward Stepper Motor y */
```

```
void rwy_step(unsigned int step,unsigned int dl)
```

```
/** 50 step per 1 millimeter
```

```
*/
```

```
{
```

```
while(step--)
```

```
{
```

```
//////////step 9
```

```
Aiu1 = 1;
```

```
Biu1 = 0;
```

```
Ciu1 = 0;
```

```
Diu1 = 0;
```

```
Eiu1 = 1;
```

```
Ail1 = 0;
```

```
Bil1 = 0;
```

```
Cil1 = 1;
```

```
Dil1 = 0;
```

```
Eil1 = 0;
```

```
delay(dl);
```

```
//////////step 8
```

```
Aiu1 = 0;
```

```
Biu1 = 0;
```

```
Ciu1 = 0;
```

```
Diu1 = 0;
```

```
Eiu1 = 1;
```

```
Ail1 = 0;
```

```
Bil1 = 1;
```

```
Cil1 = 1;
```

```
Dil1 = 0;
```

Eil1 = 0;

delay(dl);

////////////////////////////////step 7

Aiu1 = 0;

Biu1 = 0;

Ciu1 = 0;

Diu1 = 1;

Eiu1 = 1;

Ail1 = 0;

Bil1 = 1;

Cil1 = 0;

Dil1 = 0;

Eil1 = 0;

delay(dl);

////////////////////////////////step 6

Aiu1 = 0;

Biu1 = 0;

Ciu1 = 0;

Diu1 = 1;

Eiu1 = 0;

Ail1 = 1;

Bil1 = 1;

Cil1 = 0;

Dil1 = 0;

Eil1 = 0;

delay(dl);

////////////////////step 5

Aiu1 = 0;

Biu1 = 0;

Ciu1 = 1;

Diu1 = 1;

Eiu1 = 0;

Ail1 = 1;

Bil1 = 0;

Cil1 = 0;

Dil1 = 0;

Eil1 = 0;

delay(dl);

////////////////////step 4

Aiu1 = 0;

Biu1 = 0;

Ciu1 = 1;

Diu1 = 0;

Eiu1 = 0;

Ail1 = 1;

Bil1 = 0;

Cil1 = 0;

Dil1 = 0;

Eil1 = 1;

delay(dl);

////////////////////step 3

Aiu1 = 0;

Biu1 = 1;

Ciu1 = 1;

Diu1 = 0;

Eiu1 = 0;

Ail1 = 0;

Bil1 = 0;

Cil1 = 0;

Dil1 = 0;

Eil1 = 1;

delay(dl);

////////////////////step 2

Aiu1 = 0;

Biu1 = 1;

Ciu1 = 0;

Diu1 = 0;

Eiu1 = 0;

Ail1 = 0;

```
Bil1 = 0;
```

```
Cil1 = 0;
```

```
Dil1 = 1;
```

```
Eil1 = 1;
```

```
delay(dl);
```

```
////////////////////step 1
```

```
Aiu1 = 1;
```

```
Biu1 = 1;
```

```
Ciu1 = 0;
```

```
Diu1 = 0;
```

```
Eiu1 = 0;
```

```
Ail1 = 0;
```

```
Bil1 = 0;
```

```
Cil1 = 0;
```

```
Dil1 = 1;
```

```
Eil1 = 0;
```

```
delay(dl);
```

```
////////////////////step 0
```

```
Aiu1 = 1;
```

```
Biu1 = 0;
```

```
Ciu1 = 0;
```

```
Diu1 = 0;
```

```
Eiu1 = 0;
```

```

        Ail1 = 0;

        Bil1 = 0;

        Cil1 = 1;

        Dil1 = 1;

        Eil1 = 0;

        delay(dl);

    }

}

/** forward Stepper Motor y */

void fwy_step(unsigned int step,unsigned int dl)                /** 50 step per 1 millimeter
**/
{
    while(step--)
    {
        ////////////////////////////////////step 0

        Aiu1 = 1;

        Biu1 = 0;

        Ciu1 = 0;

        Diu1 = 0;

        Eiu1 = 0;

        Ail1 = 0;

        Bil1 = 0;

        Cil1 = 1;

```

Dil1 = 1;

Eil1 = 0;

delay(dl);

////////////////////step 1

Aiu1 = 1;

Biu1 = 1;

Ciu1 = 0;

Diu1 = 0;

Eiu1 = 0;

Ail1 = 0;

Bil1 = 0;

Cil1 = 0;

Dil1 = 1;

Eil1 = 0;

delay(dl);

////////////////////step 2

Aiu1 = 0;

Biu1 = 1;

Ciu1 = 0;

Diu1 = 0;

Eiu1 = 0;

Ail1 = 0;

Bil1 = 0;

Cil1 = 0;

Dil1 = 1;

Eil1 = 1;

delay(dl);

////////////////////////////////step 3

Aiu1 = 0;

Biu1 = 1;

Ciu1 = 1;

Diu1 = 0;

Eiu1 = 0;

Ail1 = 0;

Bil1 = 0;

Cil1 = 0;

Dil1 = 0;

Eil1 = 1;

delay(dl);

////////////////////////////////step 4

Aiu1 = 0;

Biu1 = 0;

Ciu1 = 1;

Diu1 = 0;

Eiu1 = 0;

Ail1 = 1;

Bil1 = 0;

Cil1 = 0;

Dil1 = 0;

Eil1 = 1;

delay(dl);

////////////////////step 5

Aiu1 = 0;

Biu1 = 0;

Ciu1 = 1;

Diu1 = 1;

Eiu1 = 0;

Ail1 = 1;

Bil1 = 0;

Cil1 = 0;

Dil1 = 0;

Eil1 = 0;

delay(dl);

////////////////////step 6

Aiu1 = 0;

Biu1 = 0;

Ciu1 = 0;

Diu1 = 1;

Eiu1 = 0;

Ail1 = 1;

Bil1 = 1;

Cil1 = 0;

Dil1 = 0;

Eil1 = 0;

delay(dl);

////////////////////step 7

Aiu1 = 0;

Biu1 = 0;

Ciu1 = 0;

Diu1 = 1;

Eiu1 = 1;

Ail1 = 0;

Bil1 = 1;

Cil1 = 0;

Dil1 = 0;

Eil1 = 0;

delay(dl);

////////////////////step 8

Aiu1 = 0;

Biu1 = 0;

Ciu1 = 0;

Diu1 = 0;

```
Eiu1 = 1;
```

```
Ail1 = 0;
```

```
Bil1 = 1;
```

```
Cil1 = 1;
```

```
Dil1 = 0;
```

```
Eil1 = 0;
```

```
delay(dl);
```

```
////////////////////step 9
```

```
Aiu1 = 1;
```

```
Biu1 = 0;
```

```
Ciu1 = 0;
```

```
Diu1 = 0;
```

```
Eiu1 = 1;
```

```
Ail1 = 0;
```

```
Bil1 = 0;
```

```
Cil1 = 1;
```

```
Dil1 = 0;
```

```
Eil1 = 0;
```

```
delay(dl);
```

```
}
```

```
}
```

โค้ด เก็บข้อมูล

```
Public Class Form1
```

```
    Public iommc As Ivi.Visa.Interop.IFormattedIO488
```

```
    Public mmc As Ivi.Visa.Interop.IFormattedIO488
```

```
    Public Shared_continue As Boolean
```

```
    Public Shared_serialPort As serialPort1
```

```
    Dim read As Boolean = True
```

```
    Dim stop1 As Boolean = False
```

```
    Dim data(,) As Object
```

```
    Dim axisy As Double
```

```
    Dim axisx As Double
```

```
    Private Sub ButtonSerialPort_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As  
System.EventArgs) Handles ButtonMMC_2.Click
```

```
        Dim ioAddress3 As String
```

```
        Dim mgr As Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
```

```
        ioAddress3 = "GPIB::" + NumericUpDownMMC_2.Value.ToString()
```

```
        mgr = New Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
```

```
mmc = New Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
```

```
mmc.IO() = mgr.Open(ioAddress3)
```

```
mmc.IO.Timeout = 7000
```

```
ButtonMMC_2.Enabled = False
```

```
Delay(2)
```

```
NumericUpDownMMC_2.Enabled = False
```

```
ButtonMMC_2.BackColor = Color.Gold
```

```
ButtonMMC_2.Text = "Connected !"
```

```
Delay(2)
```

```
ButtonMMC_2.Enabled = True
```

```
ButtonMMC_2.BackColor = Color.Green
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
```

```
Handles ButtonSaveExcell.Click
```

```
Try
```

```
Dim oExcel As Object
```

```
Dim oBook As Object
```

```
Dim oSheet As Object
```

```
'Start a new workbook in Excel
```

```
oExcel = CreateObject("Excel.Application")
```

```
oBook = oExcel.Workbooks.Add
```

```
'Add data to cells of the first worksheet in the new workbook
```

```
oSheet = oBook.Worksheets(1)
```

```
'----- sheet 1-----
```

```
oSheet = oBook.Worksheets(1)
```

```
oSheet.Range("A1").Value = "Y / X"
```

```
oSheet.Range("B1").Value = "X0"
```

```
oSheet.Range("C1").Value = "X1"
```

```
oSheet.Range("D1").Value = "X2"
```

```
oSheet.Range("E1").Value = "X3"
```

```
oSheet.Range("F1").Value = "X4"
```

```
oSheet.Range("G1").Value = "X5"
```

```
oSheet.Range("H1").Value = "X6"
```

```
oSheet.Range("I1").Value = "X7"
```

```
oSheet.Range("J1").Value = "X8"
```

```
oSheet.Range("K1").Value = "X9"
```

```
oSheet.Range("L1").Value = "X10"
```

```
oSheet.Range("M1").Value = "X11"
```

```
oSheet.Range("N1").Value = "X12"
```

```
oSheet.Range("O1").Value = "X13"
```

oSheet.Range("P1").Value = "X14"

oSheet.Range("Q1").Value = "X15"

oSheet.Range("R1").Value = "X16"

oSheet.Range("S1").Value = "X17"

oSheet.Range("T1").Value = "X18"

oSheet.Range("U1").Value = "X19"

oSheet.Range("V1").Value = "X20"

oSheet.Range("W1").Value = "X21"

oSheet.Range("X1").Value = "X22"

oSheet.Range("Y1").Value = "X23"

oSheet.Range("Z1").Value = "X24"

oSheet.Range("AA1").Value = "X25"

oSheet.Range("AB1").Value = "X26"

oSheet.Range("AC1").Value = "X27"

oSheet.Range("AD1").Value = "X28"

oSheet.Range("AE1").Value = "X29"

oSheet.Range("AF1").Value = "X30"

oSheet.Range("AG1").Value = "X31"

oSheet.Range("AH1").Value = "X32"

oSheet.Range("AI1").Value = "X33"

oSheet.Range("AJ1").Value = "X34"

oSheet.Range("AK1").Value = "X35"

oSheet.Range("AL1").Value = "X36"
oSheet.Range("AM1").Value = "X37"
oSheet.Range("AN1").Value = "X38"
oSheet.Range("AO1").Value = "X39"
oSheet.Range("AP1").Value = "X40"
oSheet.Range("AQ1").Value = "X41"
oSheet.Range("AR1").Value = "X42"
oSheet.Range("AS1").Value = "X43"
oSheet.Range("AT1").Value = "X44"
oSheet.Range("AU1").Value = "X45"
oSheet.Range("AV1").Value = "X46"
oSheet.Range("AW1").Value = "X47"
oSheet.Range("AX1").Value = "X48"
oSheet.Range("AY1").Value = "X49"
oSheet.Range("AZ1").Value = "X50"

oSheet.Range("A2").Value = "Y0"
oSheet.Range("A3").Value = "Y1"
oSheet.Range("A4").Value = "Y2"
oSheet.Range("A5").Value = "Y3"
oSheet.Range("A6").Value = "Y4"
oSheet.Range("A7").Value = "Y5"

oSheet.Range("A8").Value = "Y6"

oSheet.Range("A9").Value = "Y7"

oSheet.Range("A10").Value = "Y8"

oSheet.Range("A11").Value = "Y9"

oSheet.Range("A12").Value = "Y10"

oSheet.Range("A13").Value = "Y11"

oSheet.Range("A14").Value = "Y12"

oSheet.Range("A15").Value = "Y13"

oSheet.Range("A16").Value = "Y14"

oSheet.Range("A17").Value = "Y15"

oSheet.Range("A18").Value = "Y16"

oSheet.Range("A19").Value = "Y17"

oSheet.Range("A20").Value = "Y18"

oSheet.Range("A21").Value = "Y19"

oSheet.Range("A22").Value = "Y20"

oSheet.Range("A23").Value = "Y21"

oSheet.Range("A24").Value = "Y22"

oSheet.Range("A25").Value = "Y23"

oSheet.Range("A26").Value = "Y24"

oSheet.Range("A27").Value = "Y25"

oSheet.Range("A28").Value = "Y26"

oSheet.Range("A29").Value = "Y27"

oSheet.Range("A30").Value = "Y28"

oSheet.Range("A31").Value = "Y29"

oSheet.Range("A32").Value = "Y30"

oSheet.Range("A33").Value = "Y31"

oSheet.Range("A34").Value = "Y32"

oSheet.Range("A35").Value = "Y33"

oSheet.Range("A36").Value = "Y34"

oSheet.Range("A37").Value = "Y35"

oSheet.Range("A38").Value = "Y36"

oSheet.Range("A39").Value = "Y37"

oSheet.Range("A40").Value = "Y38"

oSheet.Range("A41").Value = "Y39"

oSheet.Range("A42").Value = "Y40"

oSheet.Range("A43").Value = "Y41"

oSheet.Range("A44").Value = "Y42"

oSheet.Range("A45").Value = "Y43"

oSheet.Range("A46").Value = "Y44"

oSheet.Range("A47").Value = "Y45"

oSheet.Range("A48").Value = "Y46"

oSheet.Range("A49").Value = "Y47"

oSheet.Range("A50").Value = "Y48"

oSheet.Range("A51").Value = "Y49"

oSheet.Range("A52").Value = "Y50"

Dim colum() As String = {"B", "C", "D", "E", "F", "G", "H", "I", "J", "K", "L", "M", "N", "O", "P", "Q", "R", "S", "T", "U", "V", "W", "X", "Y", "Z", "AA", "AB", "AC", "AD", "AE", "AF", "AG", "AH", "AI", "AJ", "AK", "AL", "AM", "AN", "AO", "AP", "AQ", "AR", "AS", "AT", "AU", "AV", "AW", "AX", "AY", "AZ", "BA", "BB", "BC", "BD", "BE", "BF", "BG", "BH", "BI", "BJ", "BK", "BL", "BM", "BN", "BO", "BP", "BQ", "BR", "BS", "BT", "BU", "BV", "BW", "BX", "BY", "BZ", "CA", "CB", "CC", "CD", "CE", "CF", "CG", "CH", "CI", "CJ", "CK", "CL", "CM", "CN", "CO", "CP", "CQ", "CR", "CS", "CT", "CU", "CV", "CW", "CX", "CY", "CZ", "DA", "DB", "DC", "DD", "DE", "DF", "DG", "DH", "DI", "DJ", "DK", "DL", "DM", "DN", "DO", "DP", "DQ", "DR", "DS", "DT", "DU", "DV", "DW", "DX", "DY", "DZ", "EA", "EB", "EC", "ED", "EE", "EF", "EG", "EH", "EI", "EJ", "EK", "EL", "EM", "EN", "EO", "EP", "EQ", "ER", "ES", "ET", "EU", "EV", "EW", "EX", "EY", "EZ", "FA", "FB", "FC", "FD", "FE", "FF", "FG", "FH", "FI", "FJ", "FK", "FL", "FM", "FN", "FO", "FP", "FQ", "FR", "FS", "FT", "FU", "FV", "FW", "FX", "FY", "FZ", "GA", "GB", "GC", "GD", "GE", "GF", "GG", "GH", "GI", "GJ", "GK", "GL", "GM", "GN", "GO", "GP", "GQ", "GR", "GS", "GT", "GU", "GV", "GW", "GX", "GY", "GZ", "HA", "HB", "HC", "HD", "HE", "HF", "HG", "HH", "HI", "HJ", "HK", "HL", "HM", "HN", "HO", "HP", "HQ", "HR", "HS", "HT", "HU", "HV", "HW", "HX", "HY", "HZ", "IA", "IB", "IC", "ID", "IE", "IF", "IG", "IH", "II", "IJ", "IK", "IL", "IM", "IN", "IO", "IP", "IQ", "IR", "IS", "IT", "IU", "IV", "IW", "IX", "IY", "IZ", "JA", "JB", "JC", "JD", "JE", "JF", "JG", "JH", "JI", "JJ", "JK", "JL", "JM", "JN", "JO", "JP", "JQ", "JR", "JS", "JT", "JU", "JV", "JW", "JX", "JY", "JZ", "KA", "KB", "KC", "KD", "KE", "KF", "KG", "KH", "KI", "KJ", "KK", "KL", "KM", "KN", "KO", "KP", "KQ", "KR", "KS", "KT", "KU", "KV", "KW", "KX", "KY", "KZ", "LA", "LB", "LC", "LD", "LE", "LF", "LG", "LH", "LI", "LJ", "LK", "LL", "LM", "LN", "LO", "LP", "LQ", "LR", "LS", "LT", "LU", "LV", "LW", "LX", "LY", "LZ", "MA", "MB", "MC", "MD", "ME", "MF", "MG", "MH", "MI", "MJ", "MK", "ML", "MM", "MN", "MO", "MP", "MQ", "MR", "MS", "MT", "MU", "MV", "MW", "MX", "MY", "MZ", "NA", "NB", "NC", "ND", "NE", "NF", "NG", "NH", "NI", "NJ", "NK", "NL", "NM", "NN", "NO", "NP", "NQ", "NR", "NS", "NT", "NU", "NV", "NW", "NX", "NY", "NZ", "OA", "OB", "OC", "OD", "OE", "OF", "OG", "OH", "OI", "OJ", "OK", "OL", "OM", "ON", "OO", "OP", "OQ", "OR", "OS", "OT", "OU", "OV", "OW", "OX", "OY", "OZ", "PA", "PB", "PC", "PD", "PE", "PF", "PG", "PH", "PI", "PJ", "PK", "PL", "PM", "PN", "PO", "PP", "PQ", "PR", "PS", "PT", "PU", "PV", "PW", "PX", "PY", "PZ", "QA", "QB", "QC", "QD", "QE", "QF", "QG", "QH", "QI", "QJ", "QK", "QL", "QM", "QN", "QO", "QP", "QQ", "QR", "QS", "QT", "QU", "QV", "QW", "QX", "QY", "QZ", "RA", "RB", "RC", "RD", "RE", "RF", "RG", "RH", "RI", "RJ", "RK", "RL", "RM", "RN", "RO", "RP", "RQ", "RR", "RS", "RT", "RU", "RV", "RW", "RX", "RY", "RZ", "SA", "SB", "SC", "SD", "SE", "SF", "SG", "SH", "SI", "SJ", "SK", "SL", "SM", "SN", "SO", "SP", "SQ", "SR", "SS", "ST", "SU", "SV", "SW", "SX", "SY", "SZ", "TA", "TB", "TC", "TD", "TE", "TF", "TG", "TH", "TI", "TJ", "TK", "TL", "TM", "TN", "TO", "TP", "TQ", "TR", "TS", "TT", "TU", "TV", "TW", "TX", "TY", "TZ", "UA", "UB", "UC", "UD", "UE", "UF", "UG", "UH", "UI", "UJ", "UK", "UL", "UM", "UN", "UO", "UP", "UQ", "UR", "US", "UT", "UU", "UV", "UW", "UX", "UY", "UZ", "VA", "VB", "VC", "VD", "VE", "VF", "VG", "VH", "VI", "VJ", "VK", "VL", "VM", "VN", "VO", "VP", "VQ", "VR", "VS", "VT", "VU", "VV", "VW", "VX", "VY", "VZ", "WA", "WB", "WC", "WD", "WE", "WF", "WG", "WH", "WI", "WJ", "WK", "WL", "WM", "WN", "WO", "WP", "WQ", "WR", "WS", "WT", "WU", "WV", "WW", "WX", "WY", "WZ", "XA", "XB", "XC", "XD", "XE", "XF", "XG", "XH", "XI", "XJ", "XK", "XL", "XM", "XN", "XO", "XP", "XQ", "XR", "XS", "XT", "XU", "XV", "XW", "XX", "XY", "XZ", "YA", "YB", "YC", "YD", "YE", "YF",

```
"YG", "YH", "YI", "YJ", "YK", "YL", "YM", "YN", "YO", "YP", "YQ", "YR", "YS", "YT", "YU", "YV",  
"YW", "YX", "YY", "YZ", "ZA", "ZB", "ZC", "ZD", "ZE", "ZF", "ZG", "ZH", "ZI", "ZJ", "ZK", "ZL", "ZM",  
"ZN", "ZO", "ZP", "ZQ", "ZR", "ZS", "ZT", "ZU", "ZV", "ZW", "ZX", "ZY", "ZZ"}
```

```
Dim ncolum As Object
```

```
Dim xcel As String
```

```
For x As Integer = 0 To axisx
```

```
    ncolum = 2
```

```
    For y As Integer = 0 To axisy
```

```
        xcel = colum(x) + ncolum.ToString
```

```
        oSheet.Range(xcel).value = data(x, y)
```

```
        ncolum = ncolum + 1
```

```
    Next
```

```
Next
```

```
'----- Link to excel -----
```

```
Dim Ex = "E:\$Ò'È'èÁ\scan motor4\" + TextBoxSaveExcell.Text + ".xls"
```

```
'Save the Workbook and Quit Excel
```

```
oBook.SaveAs(Ex)
```

```
oExcel.Quit()
```

```
MessageBox.Show("Link to excel complete ")
```

```

        Catch ex As Exception
            MsgBox("Can not link", MsgBoxStyle.Exclamation)
        End Try
    End Sub

    Private Sub stp_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
stp.Click
        stop1 = True
    End Sub

    Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles MyBase.Load

    End Sub

    Private Sub ButtonDMM_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles ButtonDMM.Click
        Dim ioaddress As String
        Dim mgr As Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
        Dim dmm As Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
        ioaddress = "GPIB::" + NumericUpDowngpiB.Value.ToString()
        mgr = New Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
        dmm = New Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
        dmm.IO() = mgr.Open(ioaddress)
        dmm.IO.Timeout = 7000

        ButtonDMM.Enabled = False
        NumericUpDowngpiB.Enabled = False
        ButtonDMM.BackColor = Color.Gold
        ButtonDMM.Text = "Connected !"
    End Sub

```

Delay(698)

ButtonDMM.Enabled = True

ButtonDMM.BackColor = Color.Green

'.....measurement DMM.....'

Dim goy, gox As String

Dim value() As String

Dim backy As String

Dim backx As String

Dim mmr As Object

Try

ButtonSaveExcell.Enabled = False

ButtonDMM.Enabled = False

stx.Enabled = False

sty.Enabled = False

mm.Enabled = False

timey.Enabled = False

timex.Enabled = False

modebox.Enabled = False

Reset.Enabled = False

If (scanx.Checked = False And scany.Checked = False) Then '--Scan not select

MsgBox("Please select scan mode", MsgBoxStyle.Exclamation)

ButtonSaveExcell.Enabled = True

```
ButtonDMM.Enabled = True
stx.Enabled = True
sty.Enabled = True
mm.Enabled = True
timey.Enabled = True
timex.Enabled = True
ButtonSaveExcell.Enabled = True
modebox.Enabled = True
Reset.Enabled = True
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
mmr = 500 * mm.Text
```

```
axisy = sty.Text
```

```
axisx = stx.Text
```

```
goy = "A:WP0P" + mmr.ToString
```

```
backy = "A:WP0P" + (-1 * mmr).ToString
```

```
backx = "A:WP" + (-1 * mmr).ToString + "P0"
```

```
gox = "A:WP" + mmr.ToString + "P0"
```

```
'forward x Êè$ SerialPort1.Write("1")
```

```
'reward x Êè$ SerialPort1.Write("2")
```

```
'forward y Êè$ SerialPort1.Write("3")
```

```

'reward y ÈÈ$ SerialPort1.Write("4")

ReDim data(0 To axisx, 0 To axisy)

If scany.Checked Then                                     '--Scan y axis

    For i As Integer = 0 To axisx

        If (i Mod 2 = 0) Then

            For j As Integer = 0 To axisy

                ReDim Preserve value(0 To j)

                dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00001")

                value(j) = dmm.ReadNumber

                data(i, j) = value(j)

            If (j <> axisy) Then

                ' SerialPort1.Open()

                'SerialPort1.Write(1)

                'SerialPort1.Close()

                mmc.WriteString("P:14P0")

                mmc.WriteString("P:15P0")

                mmc.WriteString(goy)                       'forward y

                Delay(timey.Text)

            End If

```

```
If (stop1 = True) Then                                '--stop scan

    stx.Enabled = True
    sty.Enabled = True
    ButtonDMM.Enabled = True
    mm.Enabled = True
    timey.Enabled = True
    timex.Enabled = True
    ButtonSaveExcell.Enabled = True
    modebox.Enabled = True

    Reset.Enabled = True

    stop1 = False

    Exit Sub
End If
Next
Else
For j As Integer = axisy To 0 Step -1

    ReDim Preserve value(0 To j)

    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00001")

    value(j) = dmm.ReadNumber
    data(i, j) = value(j)

    If (j <> 0) Then

        ' SerialPort1.Open()
```

```
'SerialPort1.Write("4")
```

```
'SerialPort1.Close()
```

```
mmc.WriteString("P:14P0")
```

```
mmc.WriteString("P:15P0")
```

```
mmc.WriteString(backy) 'reward y
```

```
Delay(timey.Text)
```

```
End If
```

```
If (stop1 = True) Then
```

```
stx.Enabled = True
```

```
sty.Enabled = True
```

```
ButtonDMM.Enabled = True
```

```
mm.Enabled = True
```

```
timey.Enabled = True
```

```
timex.Enabled = True
```

```
ButtonSaveExcell.Enabled = True
```

```
modebox.Enabled = True
```

```
Reset.Enabled = True
```

```
stop1 = False
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
    Next
End If

If (i <> axisx) Then

    Delay(timex.Text)

    ' SerialPort1.Open()
    ' SerialPort1.Write("1")
    'SerialPort1.Close()

    mmc.WriteString("P:14P0")

    mmc.WriteString("P:15P0")

    mmc.WriteString(gox) 'forward x
    Delay(timex.Text)

End If

If (stop1 = True) Then

    stx.Enabled = True
    sty.Enabled = True
    ButtonDMM.Enabled = True
    mm.Enabled = True
    timey.Enabled = True
    timex.Enabled = True
    ButtonSaveExcell.Enabled = True
```

```
modebox.Enabled = True

Reset.Enabled = True

stop1 = False

Exit Sub
End If

Next

End If

If scanx.Checked Then          '--Scan x axis

    For i As Integer = 0 To axisy

        If (i Mod 2 = 0) Then

            For j As Integer = 0 To axisx

                ReDim Preserve value(0 To j)

                dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00001")

                value(j) = dmm.ReadNumber

                data(j, i) = value(j)

            If (j <> axisx) Then

                ' SerialPort1.Open()
```

```
' SerialPort1.Write("1")  
  
' SerialPort1.Close()  
  
mmc.WriteString("P:14P0")  
  
mmc.WriteString("P:15P0")  
  
mmc.WriteString(gox) ' forward x  
Delay(timex.Text)
```

End If

If (stop1 = True) Then

```
stx.Enabled = True  
sty.Enabled = True  
ButtonDMM.Enabled = True  
mm.Enabled = True  
timey.Enabled = True  
timex.Enabled = True  
ButtonSaveExcell.Enabled = True  
modebox.Enabled = True
```

```
Reset.Enabled = True
```

```
stop1 = False
```

```
Exit Sub
```

End If

Next

Else

```
For j As Integer = axisx To 0 Step -1
```

```
    ReDim Preserve value(0 To j)
```

```
    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00001")
```

```
    value(j) = dmm.ReadNumber
```

```
    data(j, i) = value(j)
```

```
    If (j <> 0) Then
```

```
        ' SerialPort1.Open()
```

```
        ' SerialPort1.Write("2")
```

```
        ' SerialPort1.Close()
```

```
        mmc.WriteString("P:14P0")
```

```
        mmc.WriteString("P:15P0")
```

```
        mmc.WriteString(backx) ' reward x
```

```
        Delay(timex.Text)
```

```
    End If
```

```
    If (stop1 = True) Then
```

```
        stx.Enabled = True
```

```
        sty.Enabled = True
```

```
        ButtonDMM.Enabled = True
```

```
        mm.Enabled = True
```

```
        timey.Enabled = True
```

```
        timex.Enabled = True
```

```
ButtonSaveExcell.Enabled = True
```

```
modebox.Enabled = True
```

```
Reset.Enabled = True
```

```
stop1 = False
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
Next
```

```
End If
```

```
If (i <> axisy) Then
```

```
Delay(timey.Text)
```

```
'SerialPort1.Open()
```

```
'SerialPort1.Write("3")
```

```
'SerialPort1.Close()
```

```
mmc.WriteString("P:14P0")
```

```
mmc.WriteString("P:15P0")
```

```
mmc.WriteString(goy) 'forward y
```

```
Delay(timey.Text)
```

```
End If
```

```
If (stop1 = True) Then  
  
    stx.Enabled = True  
    sty.Enabled = True  
    ButtonDMM.Enabled = True  
    mm.Enabled = True  
    timey.Enabled = True  
    timex.Enabled = True  
    ButtonSaveExcell.Enabled = True  
    modebox.Enabled = True  
  
    Reset.Enabled = True  
  
    stop1 = False  
    Exit Sub  
End If
```

```
Next  
End If
```

```
MessageBox.Show("Finish scan ! ")  
ButtonSaveExcell.Enabled = True  
ButtonDMM.Enabled = True  
stx.Enabled = True  
sty.Enabled = True  
mm.Enabled = True  
timey.Enabled = True
```

```
timex.Enabled = True
modebox.Enabled = True

Reset.Enabled = True
```

```
Catch ex As Exception
```

```
MsgBox("Can not Scan", MsgBoxStyle.Exclamation)
ButtonSaveExcell.Enabled = True
ButtonDMM.Enabled = True
stx.Enabled = True
sty.Enabled = True
mm.Enabled = True
timey.Enabled = True
timex.Enabled = True
modebox.Enabled = True
```

```
Reset.Enabled = True
```

```
End Try
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Buttonscan_Click_1(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles Buttonscan.Click
```

```
mmc.WriteString("P:14P0")
```

```
mmc.WriteString("P:15P0")
```

```
mmc.WriteString("A:WP450P450")
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Buttonread_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
```

```
    read = False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Reset_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles  
Reset.Click
```

```
    Dim tx As Double
```

```
    Dim mmm As Double
```

```
    Dim tty As Double
```

```
    Dim ty As Double
```

```
    Dim ttx As Double
```

```
    tx = stx.Text
```

```
    ty = sty.Text
```

```
    mmm = mm.Text
```

```
    tty = ty * mmm
```

```
    ttx = tx * mmm
```

```
    mmc.WriteString("P:14P0")
```

```
    mmc.WriteString("P:15P0")
```

```
    mmc.WriteString("A:WP" + (-1 * 450 * ttx).ToString + "P" + (-1 * 450 * tty).ToString)
```

```
End Sub
```

```
End Class
```

5-Phase Stepper Motor Driver ICs

Absolute Maximum Ratings

(T_a=25°C)

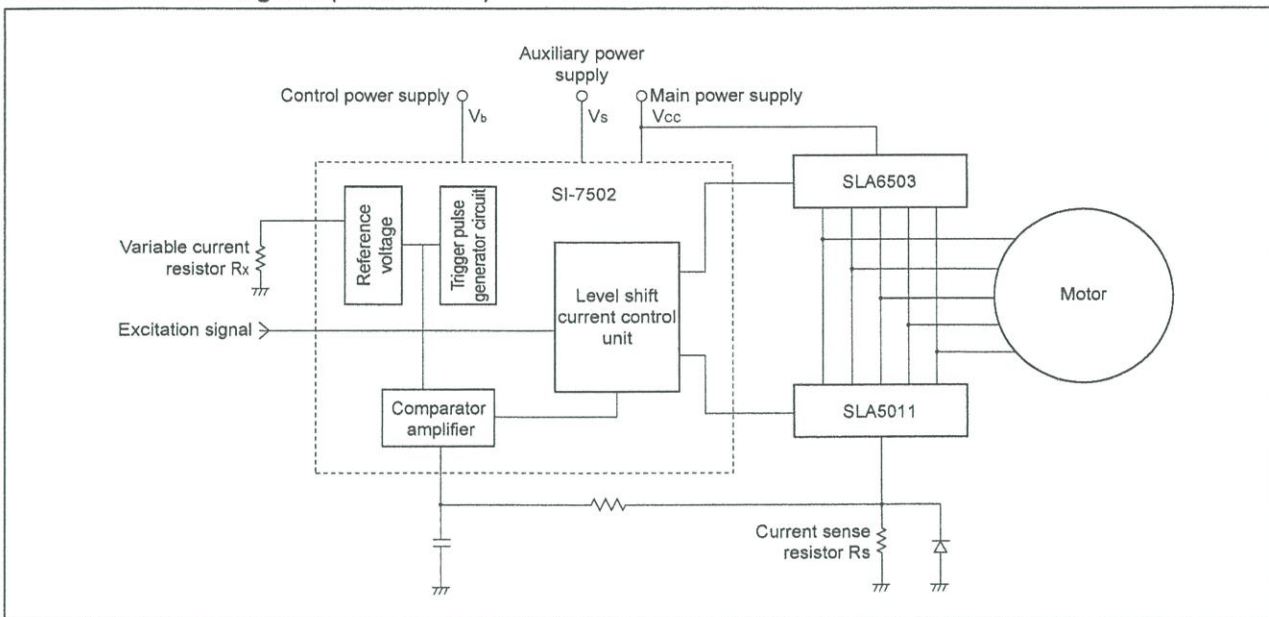
| Part No. | Parameter | Symbol | Ratings | Units |
|----------|--|------------------------|-------------|-------|
| SI-7502 | Motor supply voltage | V _{CC} | 44 | V |
| | Auxiliary supply voltage | V _S | 15 | V |
| | Control voltage | V _b | 7 | V |
| | Reference voltage | V _{ref} | 1.5 | V |
| | Detection voltage | V _{RS} | 5 | V |
| | Power dissipation | P _D | 1 | W |
| | Ambient operating temperature | T _{OP} | 0 to +65 | °C |
| SLA5011 | Drain -Source voltage | V _{DSS} | 60 | V |
| | Drain current | I _D | ±5 | A |
| | Avalanche energy capability (Single pulse) | E _{AS} | 2 | mJ |
| | Power dissipation | P _T | 35 | W |
| | Channel temperature | T _{ch} | 150 | °C |
| | Storage temperature | T _{stg} | -40 to +150 | °C |
| SLA6503 | Collector-Base voltage | V _{CB0} | -60 | V |
| | Collector-Emitter voltage | V _{CE0} | -60 | V |
| | Emitter-Base voltage | V _{EB0} | -6 | V |
| | Collector current | I _C | -3 | A |
| | Collector current (Pulse) | I _{C (pulse)} | -6 | A |
| | Base current | I _B | -1 | A |
| | Power dissipation | P _T | 35 | W |
| | Junction temperature | T _J | 150 | °C |
| | Storage temperature | T _{stg} | -40 to +150 | °C |

Electrical Characteristics

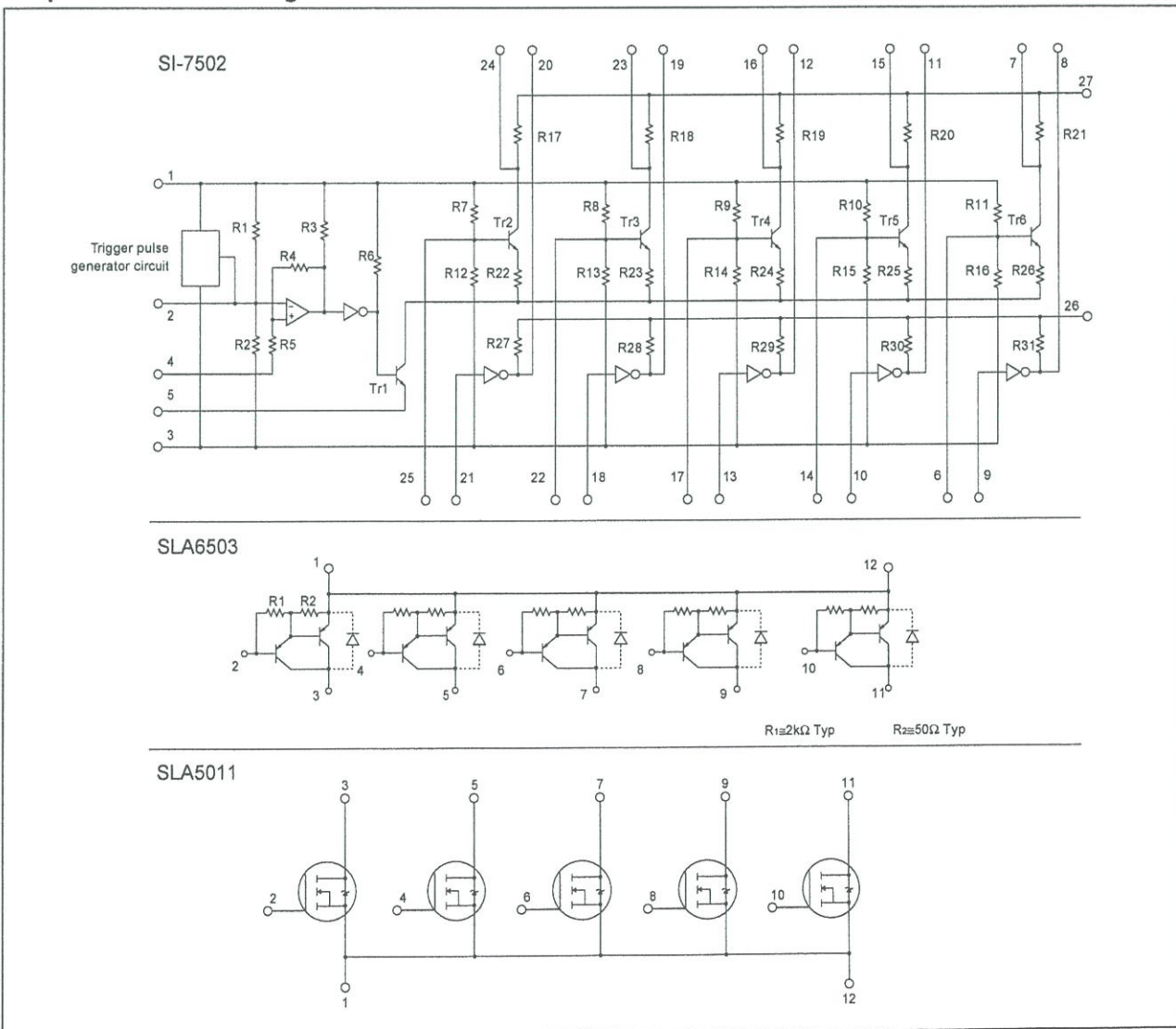
(T_a=25°C)

| Part No. | Parameter | Symbol | Limits | | | Units | Conditions |
|---|---|---------------------------------------|---------------------|------|------|---|---|
| | | | min | typ | max | | |
| SI-7502 | Supply current | I _{CC} | | | 40 | mA | V _{CC} =42V, V _b =5.5V |
| | | I _S | | | 12.5 | mA | V _S =12.5V |
| | | I _b | | | 50 | mA | V _b =5.5V |
| | Input current | I _{IU-L} , I _{IL-L} | | | 1.6 | mA | V _{IU} =V _{IL} =0.4V |
| | Upper drive circuit drive current | I _{OU-ON} | 8 | | 11 | mA | V _b =5V, AIU to EIU pin open |
| | | I _{OU-OFF} | | | 10 | μA | V _b =5V |
| | Lower drive circuit voltage | V _{OL-ON} | V _S -1.5 | | | V | V _b =5V, AIL to EIL pin open |
| | | V _{OL-OFF} | | | 1.5 | V | V _b =5V |
| Oscillation frequency | F | 20 | | 30 | kHz | V _b =5V | |
| Detection voltage | V _{RS} | 0.8 | | 1.05 | V | V _b =5V, V _{REF} pin open | |
| SLA5011 | Gate threshold voltage | V _{TH} | 2.0 | | 4.0 | V | V _{DS} =10V, I _D =250μA |
| | Forward Transconductance | R _{e (yfs)} | 2.2 | 3.3 | | S | V _{DS} =10V, I _D =5A |
| | DC ON-resistance | R _{DS (ON)} | | 0.17 | 0.22 | Ω | V _{GS} =10V, I _D =5A |
| | Input capacitance | C _{ISS} | | 300 | | pF | V _{DS} =25V, f=1.0MHz, V _{GS} =0V |
| | Output capacitance | C _{OSS} | | 160 | | pF | |
| | Di forward voltage between source and drain | V _{SD} | | 1.1 | 1.5 | V | I _{SD} =5A |
| Di reverse recovery time between source and drain | t _{rr} | | 150 | | ns | I _{SD} =±100mA | |
| SLA6503 | Collector cut-off current | I _{CB0} | | | -10 | μA | V _{CB} =-60V |
| | Collector-emitter voltage | V _{CE0} | -60 | | | V | I _C =-10mA |
| | DC current gain | h _{FE} | 2000 | | | | V _{CE} =-4V, I _C =-3A |
| | Collector emitter saturation voltage | V _{CE (sat)} | | | 1.5 | V | I _C =-3A, I _B =-6mA |

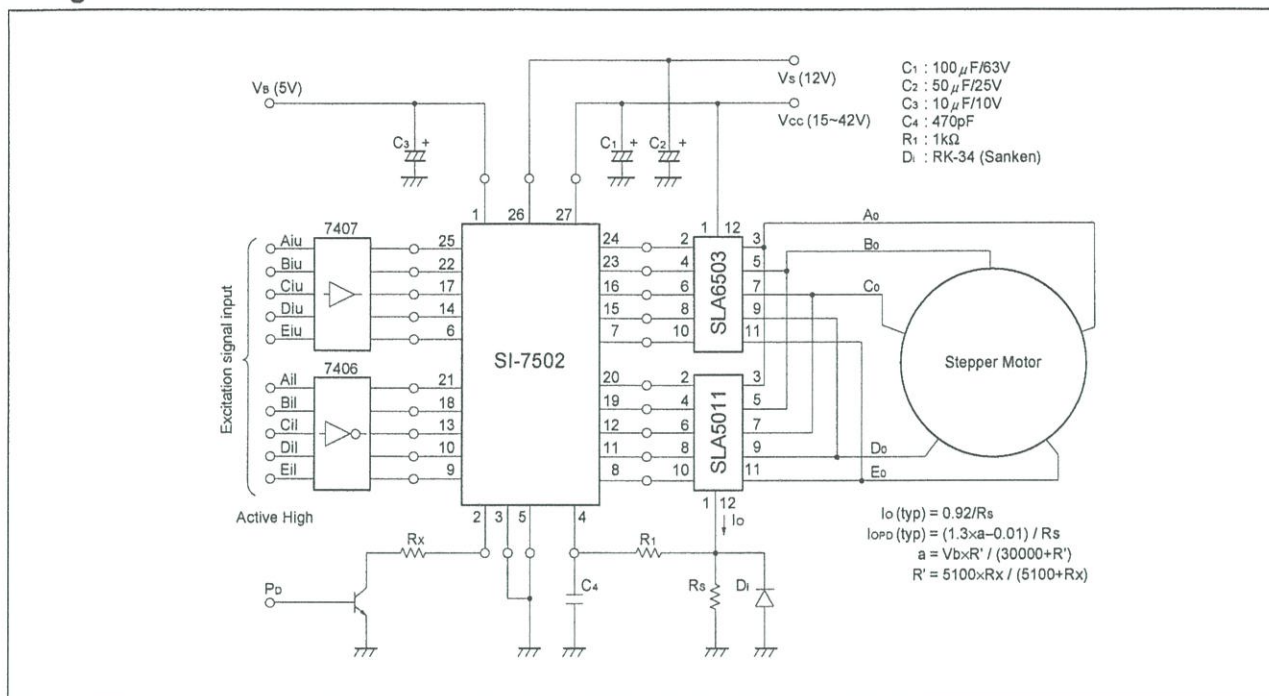
Internal Block Diagram (Dotted Line)



Equivalent Circuit Diagram

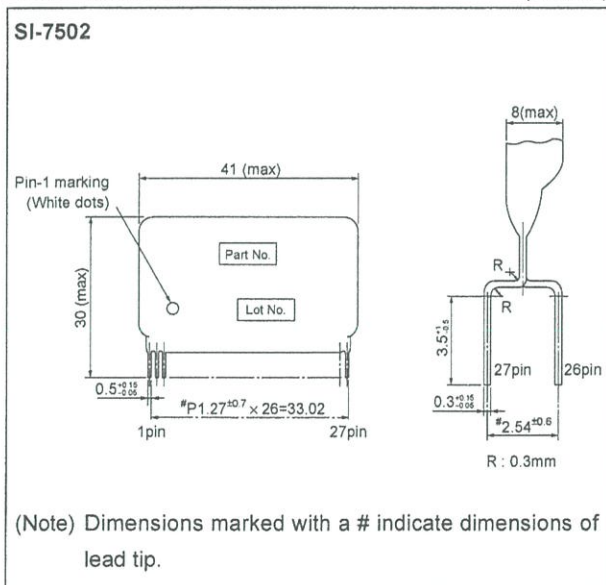


■Diagram of Standard External Circuit



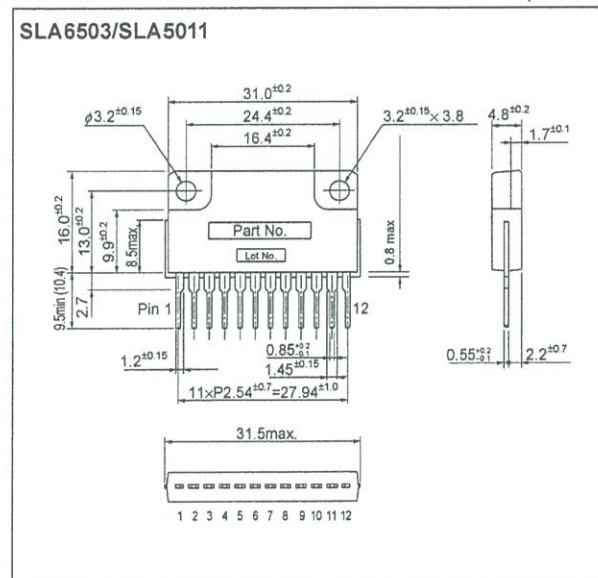
■External Dimensions

(Unit: mm)



■External Dimensions

(Unit: mm)



Application Notes

■Determining the Output Current I_o (Control Current)

The main factors that determine the output current are current sense resistor R_s , supply voltage V_b , and variable current resistor R_x .

(1) Normal mode

To operate a motor at the maximum current level, set R_x to infinity (open).

From Fig. A, when the maximum current ripple is designated as I_{OH} , its value will be,

$$I_{OH} = \frac{V_{RSH}}{R_s} \dots\dots\dots (1)$$

V_{RSH} can be calculated as follows:

$$V_{RSH} = 0.19 \times V_b - 0.03 \text{ (center value)} \dots\dots\dots (2)$$

From equations (1) and (2), the output current I_{OH} can be calculated as follows:

$$I_{OH} = \frac{1}{R_s} (0.19 \times V_b - 0.03)$$

The relationship between I_{OH} and R_s is shown in Fig. B.

(2) Power down mode

When an external resistor R_x is connected, V_{RSH} changes as shown in Fig. C even when R_s is retained. Obtain a power down output current I_{OHPD} from Fig. C and equation (1).

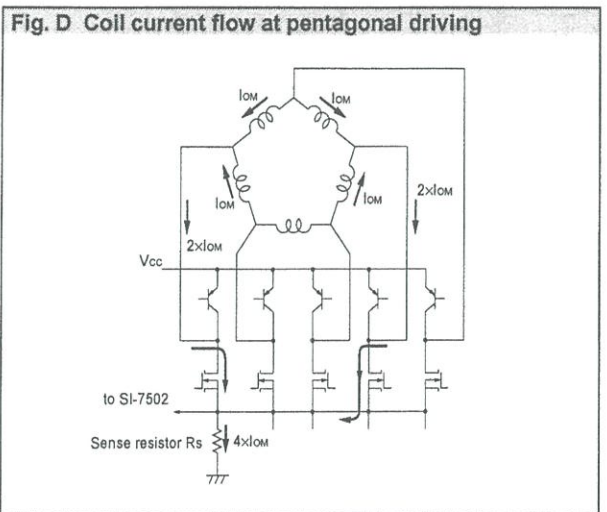
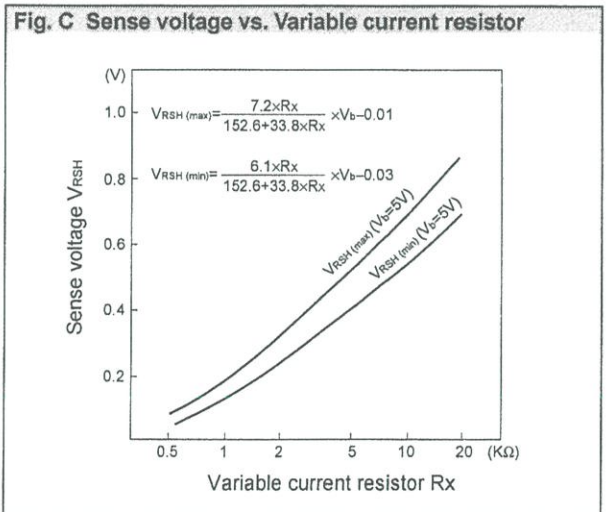
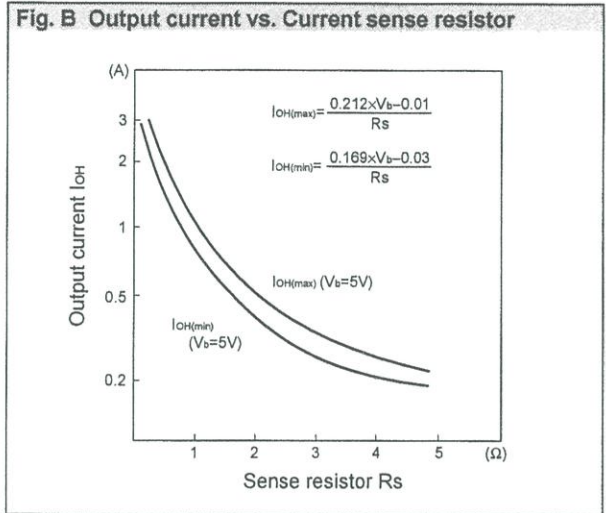
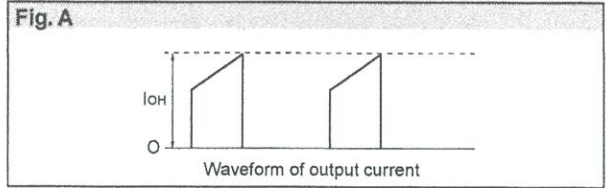
■Relation between Output Current I_o (Control Current) and Motor Winding Current I_{OM}

The SI-7502 uses the total current control system; therefore, the output current I_o is different from the motor winding current. In a general pentagonal driving system, the current flows as shown in Figure D. The relation between I_o and I_{OM} is as follows:

$$I_o = 4 \times I_{OM}$$

With some driving systems, the relation can also be as follows:

$$I_o = 2 \times I_{OM}$$



■ Motor Connection

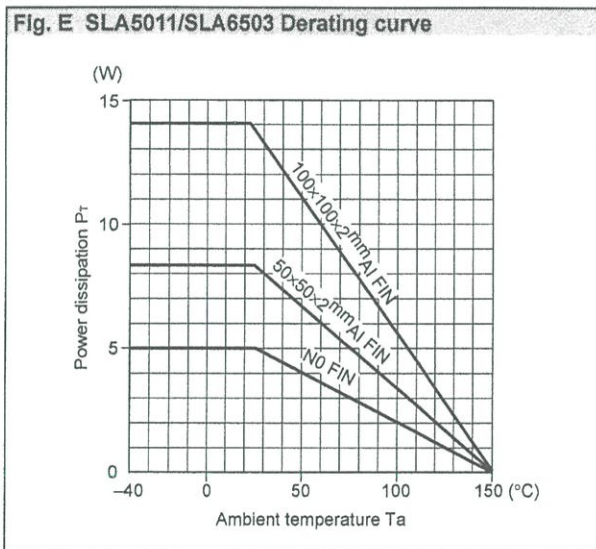
The 5-phase stepper motor supports various driving systems and the motor connection varies depending on the driving system used.

Use of the motor with some driving systems may be restricted by patents. Therefore, be sure to ask the motor manufacturer about the motor connection and driving system to be used.

■ Thermal design

The driver (SLA5011/SLA6503) dissipation varies depending on a driving system used even if the output currents (control current) are the same. Therefore, measure the temperature rise of the driver under the actual operating conditions to determine the size of the heatsink.

Figure E shows an SLA5011/SLA6503 derating curve. This derating curve indicates $T_j=150^{\circ}\text{C}$; however, when using this device, allow sufficient margin when selecting a heatsink so that $T_c \leq 100^{\circ}\text{C}$ (Al FIN temperature on the back of the SLA) is obtained.



SI-7502

■ Handling Precautions

Refer to the product specifications.

Solvents- Do not use the following solvents:

| | |
|--|--|
| Substances that can dissolve the package | Chlorine-based solvents: Trichloroethylene, Trichloroethane, etc. Aromatic hydrogen compounds: Benzene, Toluene, Xylene, etc. Keton and Acetone group solvents |
| Substances that can weaken the package | Gasoline, Benzene, Kerosene, etc. |

ประวัติผู้เขียน

นายณฤเบศร์ แก้วเขียว เกิดวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตจากสาขาวิชา Instrument ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.) ปีการศึกษา 2556

นายณัฐพล กองกุล เกิดวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดชัยภูมิ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตจากสาขาวิชา Instrument ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.) ปีการศึกษา 2556

นายธีรวัฒน์ ทูเบีย เกิดวันที่ 13 กันยายน พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดน่าน สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตจากสาขาวิชา Instrument ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.) ปีการศึกษา 2556