การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยอาศัย
การวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่

นางสาว ทิวาวรรณ เนตรผง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-533-256

ULTRASONIC DISTANCE MEASUREMENT BASED ON TIME-FREQUENCY DISTRIBUTION TECHNIQUES

Miss Tiwawan Netpong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2003

ISBN 974-533-256-9

การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยอาศัยการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่

ULTRASONIC DISTANCE MEASUREMENT BASED ON TIME-FREQUENCY DISTRIBUTION TECHNIQUES

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล)
ประธานกรรมการ

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตจร)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)
กรรมการ

.....

(อาจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา)
กรรมการ

.....	.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์)	(รองศาสตราจารย์ น.อ.ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ	คณบดี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ทิวาวรรณ เนตรผง : การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยอาศัยการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่
(ULTRASONIC DISTANCE MEASUREMENT BASED ON TIME-FREQUENCY DISTRIBUTION TECHNIQUES) อ.ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตจร, 173 หน้า, ISBN 974-533-256-9

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้ดำเนินการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเหนือเสียง สำหรับวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ที่มีความแม่นยำ โดยอาศัยเทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ซึ่งได้นำเสนอวิธีวิเคราะห์สามวิธี กล่าวคือ วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุดโดยอาศัยจีนเนติกอัลกอริทึม วิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ต และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ เพื่อให้ผลการหาค่าเวลาในการเดินทางของคลื่นเหนือเสียง ซึ่งใช้ในการคำนวณหาระยะทางมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด วิธีการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่ได้นำเสนอเป็นการพัฒนาอัลกอริทึม โดยในการทดลองวัดระยะทางได้ใช้อัลทราโซนิกเซนเซอร์ที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 40 กิโลเฮริตซ์ เป็นเซนเซอร์ในการวัด สำหรับการตรวจสอบประสิทธิผลของอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอทำได้โดยเปรียบเทียบความแม่นยำของระยะทางที่วัดได้ทั้งสามวิธี จากผลการทดลอง พบว่า วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุดให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดและมากที่สุดจำกัดอยู่ที่ 0.149% และ 1.148% ตามลำดับ ส่วนค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดของวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ตโดยใช้มอร์เล็ตเวฟเล็ต แมกซิกันแฮทเวฟเล็ต และคอยเฟล็ตเวฟเล็ตเป็นเวฟเล็ตแม่จำกัดอยู่ที่ 0.072% 0.143% และ 0.098% ตามลำดับ และค่าความผิดพลาดมากที่สุดของวิธีการแปลงเวฟเล็ตด้วยเวฟเล็ตแม่ทั้งสาม คือ 0.222% 0.241% และ 0.243% สำหรับค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดและมากที่สุดของวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์จำกัดอยู่ที่ 0.095% และ 0.280% ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าวิธีที่มีความแม่นยำที่สุด คือ วิธีการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ตที่ใช้มอร์เล็ตเวฟเล็ตเป็นเวฟเล็ตแม่

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ปีการศึกษา 2546 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

TIWAWAN NETPONG : ULTRASONIC DISTANCE MEASUREMENT BASED ON TIME-FREQUENCY DISTRIBUTION TECHNIQUES THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. SARAWUT SUJITJORN, Ph.D. 173 PP. ISBN 974-533-256-9

ULTRASONIC DISTANCE MEASUREMENT/OPTIMUM THRESHOLD/WAVELET TRANSFORM/CHOI-WILLIAMS DISTRIBUTION

This thesis presents digital signal processing techniques for a high-accuracy ultrasonic distance measurement. Three methods are proposed including an optimum threshold method using genetic algorithm, time-frequency distribution methods using wavelet transform and Choi-Williams distribution, respectively. The objective of these techniques is to precisely capture the time-of-flight of the ultrasonic wave, which in turn leads to the calculated distance with minimum error attainment. The algorithms of the proposed methods have been developed and experimentally used with a 40-kHz ultrasonic sensor. The performance comparisons of the three methods are presented. From the experimental results, the optimum threshold approach gives the minimum and the maximum full-scale errors of 0.149% and 1.148%, respectively. The minimum full-scale errors of morlet, Mexican hat and coiflet wavelets of the time-frequency distribution method using wavelet transform are 0.072 %, 0.143% and 0.098%, respectively, and the maximum full-scale error of the corresponding mother wavelets are 0.222%, 0.241% and 0.243%, respectively. The time-frequency distribution method using Choi-Williams distribution gives the minimum and the maximum full-scale errors of 0.095% and 0.280%, respectively. By considering the full-scale errors, the results clearly demonstrate that the time-frequency distribution method using wavelet transform with morlet wavelet provides the best distance measurement.

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2546 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จสิ้นตามวัตถุประสงค์ลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ในทุกๆ ด้าน ซึ่งได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตจร หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งกำลังใจ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อีกทั้งยังเป็นแรงผลักดันที่สำคัญที่ทำให้ผู้วิจัยมุมานะศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อัตถกิตมงคล อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และอาจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา อาจารย์ประจำสาขาวิชาโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำด้านวิชาการ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

คุณชาตรี ชวนะนรเศรษฐ์ คุณประพล จาระตะคุ และคุณฉัตรชัย ถาจอหอ สำหรับคำแนะนำอันเป็นประโยชน์เกี่ยวข้องกับงานภาคปฏิบัติ

วิศวกรศูนย์เครื่องมือ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือ

พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำงานวิจัยชิ้นนี้

คุณธวัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ สำหรับการตรวจทานวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งครอบครัวเนตรผง จันทบุบผา ญาติปิยะกุล และมาลาพันธ์ทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ อบรมเลี้ยงดูและดูแลส่งเสริมทางด้านการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ทิวาวรรณ เนตรผง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 3

1.4 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ 4

2 ธรรมชาติของคลื่นเหนือเสียงและการใช้งานอัลทราโซนิกเซนเซอร์ 6

2.1 บทนำ 6

2.2 ธรรมชาติและลักษณะของคลื่นเหนือเสียง 7

2.3 คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นเหนือเสียง 11

2.3.1 การเลี้ยวเบน 11

2.3.2 การแทรกสอด 11

2.3.3 การสะท้อน 12

2.3.4 การหักเหของคลื่นเหนือเสียง 12

2.3.5 การดูดกลืนคลื่นเหนือเสียง 13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 อัลทราโซนิกเซนเซอร์ 13
2.4.1 ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กตริก 14
2.4.2 เซนเซอร์แบบพิโซอิเล็กตริก 14
2.5 การใช้อัลทราโซนิกเซนเซอร์วัดระยะทาง 15
2.5.1 หลักการทั่วไปของการใช้งานอัลทราโซนิกเซนเซอร์วัดระยะทาง 15
2.5.2 การออกแบบวงจรภาคส่งสำหรับอัลทราโซนิกเซนเซอร์ 16
2.5.3 การออกแบบวงจรภาครับ 19
2.5.4 โปรแกรมควบคุมการกระตุ้นตัวส่งคลื่น 20
2.6 สรุป 23
3 วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด 24
3.1 บทนำ 24
3.2 หลักการของจีนเนติกอัลกอริทึม 24
3.2.1 กระบวนการของจีนเนติกอัลกอริทึม 25
3.2.2 ขั้นตอนการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึม 26
3.2.3 ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ 27
3.3 การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด 29
3.3.1 การทดสอบการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ 29
3.3.2 วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด 31
3.3.3 การหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่า ToF ด้วยจีนเนติกอัลกอริทึม 32
3.4 ผลการทดสอบค่าตัวแปรของจีนเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB 39
3.4.1 การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสม 39
3.4.2 การทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสม 42
3.4.3 การทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม 44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.4 การทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม....44
3.4.5 การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม....49
3.5 สรุป....53
4 วิธีการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ต....54
4.1 บทนำ....54
4.2 ความเป็นมาของการแปลงเวฟเล็ต....54
4.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต....58
4.3.1 ลักษณะของเวฟเล็ต....58
4.3.2 ทฤษฎีพื้นฐานในการสเกลและการเลื่อนตำแหน่ง....59
4.4 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง....63
4.4.1 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง....63
4.4.2 คุณสมบัติของการแปลงเวฟเล็ต....64
4.5 การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ต....65
4.5.1 หลักการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต....65
4.5.2 โปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยการแปลงเวฟเล็ต....67
4.5.3 ผลการทดสอบโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยการแปลงเวฟเล็ต....68
4.6 สรุป....85
5 วิธีการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่ด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์....86
5.1 บทนำ....86
5.2 การกระจายเชิงเวลา-ความถี่....86
5.3 การกระจายแบบวีกเนอร์-วิลล์....88
5.4 การกระจายกลุ่มโคเฮน....90

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5 การกระจายของชอย-วิลเลียมส์ 91
5.6 การคำนวณการกระจายเชิงเวลา-ความถี่ของชอย-วิลเลียมส์อย่างรวดเร็ว 92
5.6.1 ขั้นตอนการคำนวณการกระจายเชิงเวลา-ความถี่ของชอย-วิลเลียมส์อย่างรวดเร็ว 93
5.6.2 โปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์อย่างรวดเร็ว 95
5.6.3 ผลการทดสอบโปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์อย่างรวดเร็ว 96
5.7 สรุป 103
6 ผลและอภิปราย 104
6.1 บทนำ 104
6.2 ผลการทดสอบการวัดระยะทาง 104
6.2.1 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด 104
6.2.2 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต 105
6.2.3 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ 107
6.2.4 ผลการคัดเลือกวิธีการวัดระยะทางที่ดีที่สุด 108
6.3 การชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิ 111
6.4 การปรับเทียบ 114
6.5 สรุป 117
7 สรุปและข้อเสนอแนะ 118
7.1 บทนำ 118
7.2 สรุป 118
7.3 ข้อเสนอแนะ 119
เอกสารอ้างอิง 120

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การทำงานของวงจรกำเนิดความถี่ 123

ภาคผนวก ข. ผลการแก้ปัญหาการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับ 127

ภาคผนวก ค. โปรแกรม MATLAB ของวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด 143

ภาคผนวก ง. โปรแกรม MATLAB ของวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ต 148

ภาคผนวก จ. โปรแกรม MATLAB ของวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยกระจายของชอย-วิลเลียมส์ 152

ภาคผนวก ฉ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 158

ประวัติผู้เขียน 173

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขาไป....40

3.2 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขากลับ....41

3.3 ผลการทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขาไป....43

3.4 ผลการทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขากลับ....43

3.5 ผลการทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขาไป....45

3.6 ผลการทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขากลับ....46

3.7 ผลการทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขาไป....47

3.8 ผลการทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขากลับ....48

3.9 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขาไป....50

3.10 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขากลับ....51

3.11 ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ของจีนเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB....52

4.1 ผลการทดสอบการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์....75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.2 ผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยเวฟเล็ตแม่ตระกูลต่างๆ 85
6.1 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด 105
6.2 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตทั้งสามเวฟเล็ตแม่ 106
6.3 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ 108
6.4 ผลการวัดระยะทางทั้งสามวิธี 108
6.5 ผลการวัดระยะทางภายนอกสภาวะควบคุม 111
6.6 ผลการวัดระยะทางที่ได้รับการปรับแก้แล้ว 113
6.7 ระยะทางทั้งขาไปและขากลับจากวิธีการแปลงเวฟเล็ต 115
6.8 ผลการวัดระยะทางทั้งหกครั้ง 116
6.9 ความสามารถในการวัดซ้ำๆ ของการวัดระยะทางในแต่ละตำแหน่ง 116

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 รูปแบบของการอัดและการเบาบางของคลื่นเสียงที่อยู่รอบๆ แหล่งกำเนิดเสียง ระยะระหว่างการอัดที่สมบูรณ์และการเบาบางของคลื่นจะแสดงถึง ความยาวคลื่น 7

2.2 การเลี้ยวเบนของคลื่นเหนือเสียง 11

2.3 การเกิดบีตของคลื่นสองขบวน 11

2.4 การเดินทางของลำคลื่นตกกระทบ ลำคลื่นสะท้อน และลำคลื่นส่ง เมื่อคลื่นเหนือเสียงเดินทางกระทบกับผิวหน้าที่ตั้งฉาก 12

2.5 การหักเหของคลื่นเหนือเสียง 13

2.6 ก) แบบจำลองของชิ้นสารเซรามิกภายในอัลทราโซนิกเซนเซอร์แบบพิโซอิเล็กตริก 15
ข) เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่ชิ้นสารเซรามิกจะทำให้ชิ้นสารโก่งงอไปมาทำให้เกิดคลื่นเหนือเสียงกระจายไปในอากาศ 15

2.7 แผนภาพบล็อกแทนระบบวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ 16

2.8 แผนภาพบล็อกแทนของวงจรภาคส่ง 17

2.9 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์โดยใช้ TLC 556 17

2.10 วงจรภาคส่งคลื่นเหนือเสียง 18

2.11 สัญญาณของอัลทราโซนิกเซนเซอร์ 20

2.12 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมสร้างสัญญาณเบิรสต์ 21

2.13 โปรแกรมภาษาแอสแซมบลี้ของ 8051 สำหรับสร้างสัญญาณเบริสต์ 22

3.1 วัฏจักรของจีนเนติกอัลกอริทึม 25

3.2 ขั้นตอนการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึม 26

3.3 การครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว 28

3.4 การครอสโอเวอร์แบบหลายจุด 28

3.5 การทำมิวเทชัน 28

3.6 ระบบวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ 29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.7 สัญญาณของอัลทราโซนิกเซนเซอร์เมื่อวัดระยะทาง 6 เซนติเมตร 30
3.8 สัญญาณของอัลทราโซนิกเซนเซอร์เมื่อวัดระยะทาง 18 เซนติเมตร 30
3.9 สัญญาณของอัลทราโซนิกเซนเซอร์เมื่อวัดระยะทาง 30 เซนติเมตร 31
3.10 ความยาวของโครโมโซม 1 โครโมโซม 33
3.11 แผนภูมิการทำงานของฟังก์ชัน objective_ultrasonic 36
3.12 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ 37
3.13 ฟังก์ชันหน้าต่างที่นำมาคูณกับสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ 37
4.1 ระนาบเวลาและความถี่แบบคงที่ 57
4.2 ระนาบเวลาและความถี่ของการแปลงเวฟเล็ต 57
4.3 ลักษณะของเวฟเล็ต 58
4.4 ลักษณะของเวฟเล็ตแม่ที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไป 59
4.5 ตระกูลต่างๆ ของเวฟเล็ตแม่ 62
4.6 มอร์เล็ตเวฟเล็ต 66
4.7 แมกซิกันแฮทเวฟเล็ต 66
4.8 คอยเฟล็ตเวฟเล็ต 66
4.9 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต 67
4.10 สัญญาณไซน์ความถี่ 20 Hz 68
4.11 สัญญาณไซน์ความถี่ 1 kHz 68
4.12 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 20 Hz ด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=128) 69
4.13 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 1 kHz ด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=128) 69
4.14 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 20 Hz ด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=256) 70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.15 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 1 kHz ด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=256) 70

4.16 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 20 Hz ด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต (a_{max}=128) 71

4.17 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 1 kHz ด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต (a_{max}=128) 71

4.18 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 20 Hz ด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต (a_{max}=256) 72

4.19 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 1 kHz ด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต (a_{max}=256) 72

4.20 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 20 Hz ด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=128) 73

4.21 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 1 kHz ด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=128) 73

4.22 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 20 Hz ด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=256) 74

4.23 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 1 kHz ด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=256) 74

4.24 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 6 เซนติเมตร 76

4.25 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 6 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 5 76

4.26 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 18 เซนติเมตร 77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.27 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 18 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 5 77

4.28 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 30 เซนติเมตร 78

4.29 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 30 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 5 78

4.30 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตของระยะทาง 6 เซนติเมตร 79

4.31 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตของระยะทาง 6 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 2 79

4.32 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตของระยะทาง 18 เซนติเมตร 80

4.33 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตของระยะทาง 18 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 2 80

4.34 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตของระยะทาง 30 เซนติเมตร 81

4.35 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตของระยะทาง 30 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 2 81

4.36 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 6 เซนติเมตร 82

4.37 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 6 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 5 82

4.38 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 18 เซนติเมตร 83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.39 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 18 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 5 83

4.40 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 30 เซนติเมตร 84

4.41 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 30 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 5 84

5.1 เมตริกซ์ผลคูณจากด้านนอก 94

5.2 ขั้นตอนการคำนวณการกระจายของชอย-วิลเลียมส์แบบรวดเร็ว 94

5.3 แผนภูมิการทำงานของการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ 97

5.4 CWD ของสัญญาณไซน์ 50 Hz 98

5.5 CWD ของสัญญาณไซน์ 200 Hz 98

5.6 CWD ของสัญญาณไซน์ 290 Hz 99

5.7 CWD ของสัญญาณไซน์ 50 Hz + 200 Hz 99

5.8 แผนภาพคอนทัวร์ของ CWD ของระยะทาง 6 เซนติเมตร 100

5.9 ระนาบของ CWD ของระยะทาง 6 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดอยู่ที่ความถี่ 39.8 kHz 100

5.10 แผนภาพคอนทัวร์ของ CWD ของระยะทาง 18 เซนติเมตร 101

5.11 ระนาบของ CWD ของระยะทาง 18 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดอยู่ที่ความถี่ 39.8 kHz 101

5.12 แผนภาพคอนทัวร์ของ CWD ของระยะทาง 30 เซนติเมตร 102

5.13 ระนาบของ CWD ของระยะทาง 30 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดอยู่ที่ความถี่ 39.8 kHz 102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.1 แผนภูมิแสดงค่าความผิดพลาดของการวัดระยะทางด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต ทั้งสามเวฟเล็ตแม่ 107

6.2 แผนภูมิแสดงค่าความผิดพลาดของการวัดระยะทางทั้งสามวิธี 110

6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะทางและ ToF ทั้งภายในและภายนอก สภาวะควบคุม 113

6.4 ฮิสเทอร์รีซีส (ไม่ปรากฏ) 115

ก.1 การเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุต 124

ข.1 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับเมื่อวัดระยะทาง 6 เซนติเมตร 128

ข.2 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับเมื่อวัดระยะทาง 9 เซนติเมตร 128

ข.3 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับเมื่อวัดระยะทาง 12 เซนติเมตร 129

ข.4 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับเมื่อวัดระยะทาง 15 เซนติเมตร 129

ข.5 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับเมื่อวัดระยะทาง 18 เซนติเมตร 130

ข.6 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับเมื่อวัดระยะทาง 21 เซนติเมตร 130

ข.7 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับเมื่อวัดระยะทาง 24 เซนติเมตร 131

ข.8 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับเมื่อวัดระยะทาง 27 เซนติเมตร 131

ข.9 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับเมื่อวัดระยะทาง 30 เซนติเมตร 132

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ข.10 การติดตั้งตัวส่งและตัวรับตามแนวตั้ง....133
ข.11 การติดตั้งตัวส่งและตัวรับตามแนวนอน....133
ข.12 รูปสัญญาณเมื่อวัดระยะทาง 6 เซนติเมตร โดยตัวส่งและตัวรับอยู่ห่างกัน 10 เซนติเมตร ตามแนวตั้ง....134
ข.13 รูปสัญญาณเมื่อวัดระยะทาง 6 เซนติเมตร โดยตัวส่งและตัวรับอยู่ห่างกัน 10 เซนติเมตร ตามแนวนอน....134
ข.14 การติดตั้งตัวส่งและตัวรับพร้อมทั้งวัสดุกั้น....136
ข.15 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นอลูมิเนียมขนาด 7x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ....136
ข.16 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นอลูมิเนียมขนาด 7.5x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ....137
ข.17 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นอลูมิเนียมขนาด 8x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ....137
ข.18 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นสังกะสีขนาด 7x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ....138
ข.19 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นสังกะสีขนาด 7.5x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ....138
ข.20 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นสังกะสีขนาด 8x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ....139
ข.21 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 7x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ....139
ข.22 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 7.5x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ....140
ข.23 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 8x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ....140

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ข.24 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้วัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากพลาสติกแข็งสูง 3.7 เซนติเมตร ครอบตัวส่งและตัวรับ....141
ข.25 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้ฉนวนใยแก้วยาว 4 เซนติเมตร ครอบตัวส่งและตัวรับ....141
ข.26 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้ฉนวนใยแก้วยาว 5 เซนติเมตร ครอบตัวส่งและตัวรับ....142

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คลื่นเหนือเสียง หมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz ซึ่งเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน ในปัจจุบันได้มีการนำคลื่นเหนือเสียงมาประยุกต์ใช้กับงานแขนงต่างๆ เช่น ในทางการแพทย์ใช้ตรวจจับก้อนเนื้องอก นิ่วในถุงน้ำดี การไหลของเลือดที่ไหลภายในเส้นเลือดที่หล่อเลี้ยงหัวใจ เป็นต้น ในงานด้านอุตสาหกรรมได้นำเอาคลื่นเหนือเสียงไปใช้ตรวจสอบรอยร้าวในชิ้นงานโลหะ ใช้ในการทดสอบแบบไม่ทำลาย นำไปใช้เป็นระบบตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์ (Youngjoon and Hernsoo, 1999) การระบุการวางตัวและรูปร่างของชิ้นงานในโรงงานอุตสาหกรรม นำไปประยุกต์ใช้ในการหาความบกพร่องของชิ้นงานหล่อ (Arce, Llata, Sarabia and Oria, 1998) เป็นต้น

การนำคลื่นเหนือเสียงไปใช้งานดังที่ได้กล่าวมานี้ พึ่งพาหลักการทั่วไปของอัลทราโซนิกเซนเซอร์ กล่าวคือ คลื่นเหนือเสียงจะถูกส่งออกไปจากตัวส่ง คลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง เช่น อากาศ หรือของไหลอื่นๆ (Andria, Attivissimo and Lanzolla, 1998) เมื่อคลื่นที่ถูกส่งออกไปนั้นกระทบผิวสัมผัสหรือวัตถุใดๆ ก็จะสะท้อนกลับมายังตัวรับ ตามปกติตัวส่งและตัวรับคลื่นเหนือเสียงได้รับการติดตั้งให้ประชิดกัน ระยะทางระหว่างจุดส่งและรับคลื่นกับผิวสัมผัสหรือวัตถุใดๆ ที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น (S) จะสามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ทางฟิสิกส์ กล่าวคือ

$$S = \frac{v \times ToF}{2} \qquad (1\text{-}1)$$

เมื่อ

v คือ ความเร็วเสียงในอากาศ มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที

ToF คือ เวลาทั้งหมดที่คลื่นเดินทางจากตัวส่งไปยังตัวรับ มีหน่วยเป็น วินาที

ความแม่นยำของการวัดระยะห่างระหว่างชุดส่งและรับคลื่นกับผิวสัมผัสหรือวัตถุใดๆ จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์สองตัว กล่าวคือ ความเร็วเสียงในอากาศ และ ToF ความเร็วเสียงที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางนั้นเป็นที่ทราบกันดีว่าจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของแก๊สที่เป็นตัวกลางด้วย (Donald and Mass Products Crop., 1999) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความชื้น คุณสมบัติทางฟิสิกส์และ

ทางเคมีของแก๊สหรือของไหลที่เป็นตัวกลาง (Andria, Attivissimo and Giaquinto, 1999) ความเร็วเสียงในอากาศจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิซึ่งสามารถที่จะปรับชดเชยให้แม่นยำได้ไม่ยากนัก (Parrilla, Anaya and Fritsch, 1991) ส่วน ToF นั้นจะมีผลต่อความแม่นยำในการวัดระยะทางเป็นอย่างมาก การได้มาซึ่ง ToF นั้นสามารถทำได้สองวิธีใหญ่ๆ กล่าวคือ วิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม วิธีการหาค่า ToF โดยตรง คือ ใช้การจับเวลาคลื่นเดินทางและสะท้อนกลับโดยมีการตั้งระดับจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ของคลื่นสะท้อนกลับ ด้วยเทคโนโลยีไมโครโพรเซสเซอร์ในปัจจุบัน เรานิยมที่จะใช้การตรวจจับเวลา ToF นี้ด้วยไมโครโพรเซสเซอร์และอุปกรณ์ประกอบ ส่วนวิธีการหาค่า ToF โดยอ้อมนั้น ใช้เทคนิควิเคราะห์สัญญาณกระทำกับรูปคลื่นสัญญาณที่บันทึกไว้ได้ (Andria, Attivissimo and Giaquinto, 1999) เพื่อสกัดเอาข้อมูล ToF จากสัญญาณ

ในงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีวิเคราะห์สัญญาณคลื่นที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเพื่อหาค่า ToF สามวิธีด้วยกัน กล่าวคือ วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด (optimum threshold technique) วิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ต (Wavelet transform) หรือ WT (Michalodimitrakis and Laopoulos, 2001) และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ (Choi-Williams distribution) หรือ CWD (Cohen, 1989) วิธีที่นิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่ในการหาค่า ToF คือ วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold method) ซึ่งจะวิเคราะห์สัญญาณสะท้อนที่ได้จากตัวรับ โดยจะทำการตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนของแอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับไว้ เมื่อสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับมีแอมพลิจูดมากกว่าค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้ ค่าToF จะเป็นค่าเวลา ณ จุดที่แอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมีค่ามากกว่าค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้นั่นเอง ในความเป็นจริงแล้วสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับจะเกิดขึ้นก่อนระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งค่าไว้จึงทำให้ ToF ที่คำนวณได้ไม่แม่นยำ ซึ่งส่งผลให้การวัดระยะทางไม่แม่นยำตามไปด้วย (Parrilla, Anaya and Fritsch, 1991) ความแม่นยำของวิธีนี้ยังขึ้นอยู่กับเวลาไต่ระดับของสัญญาณ สัญญาณรบกวนซึ่งมีผลทำให้สัญญาณที่สะท้อนกลับมาผิดเพี้ยนไปทำให้การคำนวณค่าToFผิดพลาดได้ (Andria, Attivissimo and Lanzolla, 1998) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด โดยนำเอาจีนเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm) มาช่วยค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้การคำนวณค่า ToF แม่นยำขึ้น

สำหรับวิธีการวิเคราะห์แบบ WT จะช่วยให้ได้ความละเอียด (resolution) ของการวัดดีขึ้น และวิธีนี้สามารถที่จะกำจัดสัญญาณรบกวนได้ดีซึ่งมีผลทำให้การคำนวณค่า ToF แม่นยำขึ้น (Andria, Attivissimo and Lanzolla, 1998) หลักการสำคัญของวิธีนี้ คือ การสหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับกับฟังก์ชันแม่ (mother function) ในการเลือกฟังก์ชันแม่นั้นจะเลือกใช้ฟังก์ชันแม่ที่มีรูปร่างเหมือนหรือใกล้เคียงกับสัญญาณที่สะท้อนกลับ

มายังตัวรับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ด้วย WT โดยใช้ฟังก์ชันแม่ที่แตกต่างกันสามชนิดเพื่อเปรียบเทียบผลว่าแบบใดจะให้ผลดีที่สุด ฟังก์ชันแม่ที่จะใช้ คือ มอร์เล็ต (morlet) แมกซิกันแฮท (Mexican hat) และคอยเฟล็ต (coiflet) สำหรับวิธี CWD เป็นวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ที่เหมาะกับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลา (Cohen,1989) จึงนำมาวิเคราะห์คลื่นที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเพื่อประมาณค่า ToF และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งสามวิธีว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีใดจะให้ผลที่ดีที่สุด

อีกสิ่งหนึ่งที่ขาดไม่ได้สำหรับการวัดทางวิศวกรรม คือ การปรับเทียบ (calibration) เพื่อตรวจสอบถึงความเที่ยงตรงและแม่นยำในการวัด อันได้แก่ ฮิสเทอร์รีซีส (hysteresis) ความเป็นเชิงเส้น (linearity) ความแม่นยำ (accuracy) และความสามารถในการวัดซ้ำๆ (repeatability) โดยจะดำเนินการปรับเทียบให้กับวิธีที่ให้ผลดีที่สุดจากการทดลองดำเนินการสามวิธีข้างต้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอัลกอริทึมหรือวิธีการคำนวณ ToF อย่างแม่นยำโดยอาศัยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด วิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ต และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์
2. เพื่อพัฒนาระบบวัดระยะทางระยะใกล้ด้วยอัลทราโซนิกส์เซนเซอร์แบบออฟไลน์

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ชุดอัลทราโซนิกเซนเซอร์จะต้องตั้งฉากกับวัตถุเป้าหมายซึ่งทำจากพลาสติกขนาด 20 x 30 เซนติเมตร
2. การทดสอบชุดอัลทราโซนิกเซนเซอร์ทดสอบที่สภาวะควบคุม คือ ในห้องปฏิบัติการที่มีอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียสและเป็นห้องปรับอากาศ และทดสอบนอกสภาวะควบคุมให้กับวิธีการที่ให้ผลการวัดดีที่สุดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการทดสอบนอกห้องปฏิบัติการในช่วงเวลา 13.00 - 15.00 น. เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มีอุณหภูมิสูง และทำการทดลองในที่ร่ม
3. ระยะห่างระหว่างอัลทราโซนิกเซนเซอร์และวัตถุที่จะวัดระยะทางที่ทำการทดลองที่ใกล้ที่สุด คือ 6 เซนติเมตร และระยะไกลที่สุด คือ 30 เซนติเมตร

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. เปรียบเทียบอัลกอริทึมในการวัดระยะทางอย่างแม่นยำ ในแนวตั้งฉากโดยใช้วิธีในการวิเคราะห์สัญญาณสามวิธีข้างต้น เพื่อเปรียบเทียบผล

2. หาวิธีที่เหมาะสมต่อการแก้ปัญหาการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับคลื่น

3. ดำเนินการปรับเทียบให้กับแนวทางการวัดที่ให้ผลดีที่สุดจากทั้งสามวิธีที่ทดสอบ

4. ในการทดสอบพิจารณาเพียงผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการวัดระยะทางเท่านั้น

5. ทำการชดเชยผลกระทบของอุณหภูมิให้กับวิธีการที่คัดเลือกไว้ว่าให้ผลดีที่สุด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาระบบการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ได้อย่างแม่นยำ

2. สามารถพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณ ToF และวัดระยะทางได้อย่างแม่นยำ

3. สามารถนำผลงานที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นอุปกรณ์วัดระยะทางในระยะใกล้ที่ต้องการความละเอียดสูง

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท และ 6 ภาคผนวก

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งกล่าวถึงเนื้อหาพอสังเขปของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงธรรมชาติของคลื่นเหนือเสียงและการใช้งานอัลทราโซนิกเซนเซอร์ โดยจะกล่าวถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของคลื่นเหนือเสียง อัลทราโซนิกเซนเซอร์ ความรู้พื้นฐานของการใช้งานอัลทราโซนิกเซนเซอร์ หลักการใช้อัลทราโซนิกเซนเซอร์ในการวัดระยะทาง รวมถึงการออกแบบวงจรที่จำเป็นสำหรับอัลทราโซนิกเซนเซอร์ในการวัดระยะทาง

บทที่ 3 กล่าวถึงการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด ซึ่งได้นำเสนอหลักการของจีนเนติกอัลกอริทึม การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด และวิธีการในการนำจีนเนติกอัลกอริทึมมาช่วยค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด อีกทั้งยังได้นำเสนอผลทดสอบการหาค่าพารามิเตอร์ของจีนเนติกอัลกอริทึมที่เหมาะสม สำหรับการค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด

บทที่ 4 กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการแปลงเวฟเล็ต ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาของการแปลงเวฟเล็ต ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง พร้อมด้วย

การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

บทที่ 5 กล่าวถึงรายละเอียดของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ ซึ่งประกอบด้วย การกระจายทางเวลา-ความถี่ การกระจายของวีกเนอร์-วิลล์ การกระจายกลุ่มโคเฮน และการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ พร้อมด้วยการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์

บทที่ 6 กล่าวถึงผลของการวัดระยะทางทั้ง 3 วิธีข้างต้น พร้อมทั้งเสนอการชดเชยผลกระทบของอุณหภูมิของการวัดระยะทาง และกล่าวถึงการปรับเทียบในหัวข้อสุดท้าย

บทที่ 7 เป็นการสรุปและให้ข้อเสนอแนะ

ภาคผนวกมีทั้งหมด 6 ส่วน กล่าวคือ ภาคผนวก ก. แสดงการทำงานของวงจรกำเนิดความถี่ ภาคผนวก ข. แสดงผลการแก้ปัญหาการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับคลื่น ภาคผนวก ค. ง. และ จ. แสดงรายละเอียดโปรแกรม MATLAB ของวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด วิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ต และวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้รวบรวมบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ไว้ในภาคผนวก ฉ.

บทที่ 2
ธรรมชาติของคลื่นเหนือเสียงและการใช้งานอัลทราโซนิกเซนเซอร์

2.1 บทนำ

คลื่นเหนือเสียง (ultrasonic wave) คือ คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่หูมนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปคลื่นเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินหรือรับรู้ได้ มีความถี่อยู่ระหว่าง 20 – 20,000 Hz ซึ่งที่ความถี่ 20 kHz นั้น คนอาจได้ยินหรือไม่ได้ยินก็ได้ขึ้นอยู่กับอายุและความสามารถทางการได้ยินของแต่ละบุคคล ดังนั้น คลื่นเหนือเสียงจะหมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz ขึ้นไป

คลื่นเหนือเสียงได้รับการนำมาใช้ประโยชน์ในหลายๆ ด้าน เนื่องจากเป็นคลื่นที่มีทิศทาง ทำให้สามารถเล็งคลื่นไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้อย่างเจาะจง ซึ่งเป็นคุณสมบัติเด่นประการหนึ่งของคลื่นเหนือเสียง ที่ทำให้คลื่นเหนือเสียงได้รับการประยุกต์ใช้กับงานแขนงต่างๆ เช่น ในทางการแพทย์ใช้ตรวจจับก้อนเนื้องอก นิ่วในถุงน้ำดี การเคลื่อนที่ของเลือดที่ไหลภายในเส้นเลือดของหัวใจ เป็นต้น ในงานด้านอุตสาหกรรมได้นำเอาคลื่นเหนือเสียงไปใช้ในงานต่างๆ ได้แก่ การตรวจสอบรอยร้าวในชิ้นงานโลหะ การทดสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งกล่าวใน Angrisani, Daponte and D'Apuzzo, 1996 นำไปใช้เป็นระบบตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์ (Youngjoon and Hernsoo, 1999) การระบุการวางตัวและรูปร่างของชิ้นงานในโรงงานอุตสาหกรรม นำไปประยุกต์ใช้ในการหาความบกพร่องของชิ้นงานหล่อ (Arce, Llata, Sarabia and Oria, 1998) เครื่องวัดระยะทาง เครื่องล้างทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง เครื่องควบคุมระยะไกล เครื่องค้นหาตำแหน่งปลา เป็นต้น

งานวิจัยนี้สนใจประโยชน์ของคลื่นเหนือเสียงในการวัดระยะทาง โดยจะส่งคลื่นเหนือเสียงจากตัวส่งคลื่นตรงออกไปกระทบวัตถุเป้าหมาย จากนั้นอาศัยการสะท้อนของคลื่นที่กลับมายังตัวรับคลื่น และคำนวณระยะทางที่วัดได้จากความเร็วเสียงในอากาศและเวลาที่คลื่นเหนือเสียงใช้เดินทางทั้งหมดหรือที่เรียกว่า time of flight (ToF) ดังนั้นในบทนี้จะได้กล่าวถึง คุณสมบัติเบื้องต้นของคลื่นเหนือเสียง อัลทราโซนิกเซนเซอร์ ความรู้พื้นฐานของการใช้อัลทราโซนิกเซนเซอร์หลักการใช้อัลทราโซนิกเซนเซอร์ในการวัดระยะทาง รวมถึงการออกแบบวงจรที่จำเป็นสำหรับอัลทราโซนิกเซนเซอร์ ในการวัดระยะทาง

2.2 ธรรมชาติและลักษณะของคลื่นเหนือเสียง

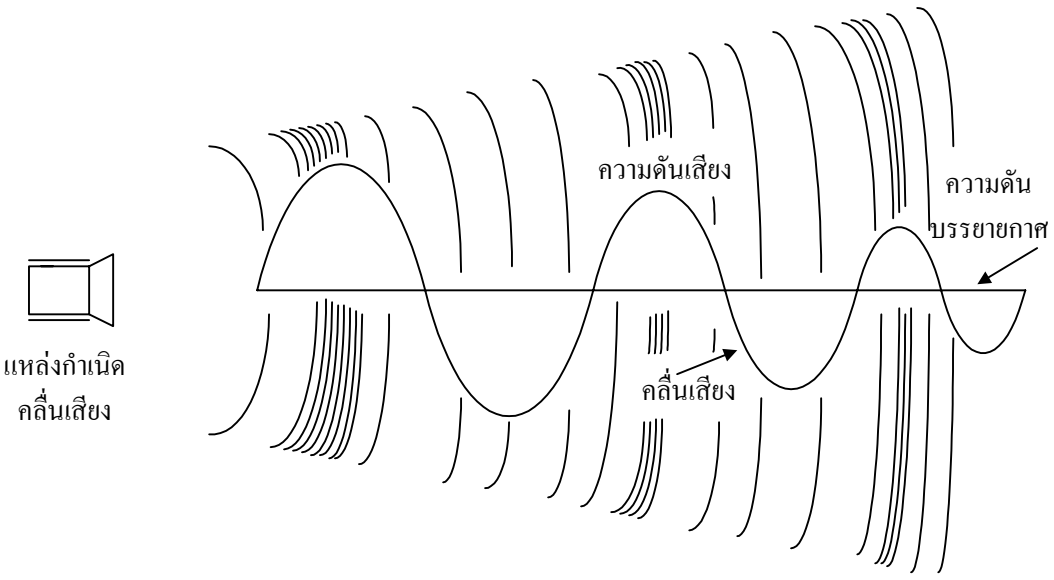
คลื่นเสียงเป็นคลื่นตามยาวที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลวและแก๊ส ช่วงความถี่ของคลื่นเสียงอาจแบ่งออกเป็นสามย่านใหญ่ๆ (Halliday and Resnick, 1978) กล่าวคือ

ย่านต่ำกว่าเสียง (infrasonic range) เป็นย่านความถี่ของคลื่นเสียงต่ำกว่าความถี่ของคลื่นเสียงที่หูมนุษย์ได้ยิน โดยมีความถี่ต่ำกว่า 20 Hz ซึ่งได้แก่ คลื่นในแม่น้ำและมหาสมุทร

ย่านความถี่เสียง (audible range) เป็นย่านความถี่ของคลื่นเสียงที่หูมนุษย์สามารถได้ยินโดยมีความถี่ในย่าน 20 – 20,000 Hz

ย่านเหนือเสียง (ultrasonic range) เป็นย่านความถี่ของคลื่นเสียงที่หูมนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้ โดยมีความถี่สูงกว่า 20 kHz

การกำเนิดคลื่นเหนือเสียงในทางเทคโนโลยีปัจจุบันอาศัยผลึกวัสดุ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าแก่ผลึกดังกล่าว จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของผลึกส่งแรงอัดไปในอากาศ ทำให้เกิดเป็นคลื่นเหนือเสียงที่มีการอัดและการเบาบาง (rarefaction) สลับกันแพร่กระจายไป การอัด คือ การที่บริเวณนั้นมีความหนาแน่นของโมเลกุลและแรงดันมากกว่าบริเวณรอบๆ ส่วนการเบาบางเป็นบริเวณเฉพาะที่เกิดการลดความหนาแน่นของโมเลกุลและความดันสัมพันธ์กับความดันบรรยากาศปกติ ดังรูปที่ 2.1 การสั่นสะเทือนของผลึกวัสดุมีลักษณะคงที่ ทำให้ได้คลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่คงที่ด้วย



รูปที่ 2.1 รูปแบบของการอัดและการเบาบางของคลื่นเสียงที่อยู่รอบๆ แหล่งกำเนิดเสียง ระยะระหว่างการอัดที่สมบูรณ์และการเบาบางของคลื่นจะแสดงถึง ความยาวคลื่น

ความเร็วเสียงที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของแก๊สที่เป็นตัวกลาง (Donald and Mass Products Crop., 1999) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความชื้น คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของแก๊สหรือของไหลที่เป็นตัวกลาง (Andria, Attivissimo and Giaquinto, 1999) คลื่นเสียงที่เดินทางในตัวกลางที่แตกต่างกันจะมีความเร็วในการเดินทางผ่านตัวกลางนั้นๆ แตกต่างกัน ซึ่งความสัมพันธ์ของความเร็วเสียงกับอุณหภูมิ เมื่อคลื่นเสียงเดินทางในตัวกลางที่เป็นแก๊สอุดมคติ (ideal gas) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \tag{2-1}$$

เมื่อ

v คือ ความเร็วที่คลื่นเหนือเสียงสามารถเดินทางได้ในตัวกลางที่เป็นแก๊ส (เมตร/วินาที)

γ คือ ค่าอัตราส่วนของความร้อนของแก๊สที่แรงดันคงที่ต่อความร้อนที่ปริมาตรคงที่ (adiabatic bulk modulus : อากาศจะมี $\gamma = 1.4$)

P คือ ความดันของแก๊สในหน่วยพาสคัล (pascal) โดยความดันของอากาศที่ระดับน้ำทะเลมีค่า 1.01325×10^6 พาสคัล

ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3) : อากาศมี $\rho = 1.29\ kg/m^3$

ถ้าโมเลกุลของอากาศมีมวลโมเลกุลเป็น M และปริมาตรเป็น V จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของอากาศเป็นดังนี้

$$\rho = \frac{M}{V} \tag{2-2}$$

แทนค่า ρ ในสมการที่ (2-2) ลงในสมการที่ (2-1) จะได้

$$v = \sqrt{\frac{\gamma PV}{M}} \tag{2-3}$$

สำหรับแก๊สในอุดมคติ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร อุณหภูมิและแรงดัน จะเป็นดังนี้

$$PV = RT \tag{2-4}$$

แทนค่าความสัมพันธ์ของสมการที่ (2-2) ลงในสมการที่ (2-4) จะได้

$$P = \frac{\rho RT}{M} \tag{2-5}$$

เมื่อ

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant) : (newton – m/ Kelvin)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Kelvin : K)

V คือ ปริมาตรของแก๊ส (m^3)

P คือ ความดันของแก๊ส (newton/m^2)

แทนความสัมพันธ์ของสมการที่ (2-5) ลงในสมการที่ (2-1) จะได้ความเร็วของคลื่นเหนือเสียงในอากาศ ดังนี้

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \tag{2-6}$$

จากสมการที่ (2-6) จะเห็นว่า ความเร็วของคลื่นเสียงในแก๊สอุดมคติจะขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สและอุณหภูมิไม่ขึ้นอยู่กับความดัน แต่ในทางปฏิบัตินั้นจะเป็นจริงสำหรับความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-1) โดยความดันของแก๊สและความหนาแน่นของแก๊สจะลดลงเมื่อความสูงเหนือจากระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้น และผลของความกดดันทางบรรยากาศจะมีผลต่อความเร็วของคลื่นเพียงเล็กน้อย

จากสมการที่ (2-6) γ, M และ R เป็นค่าคงที่ของแก๊ส ดังนั้นความเร็วของคลื่นเหนือเสียงที่เดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นแก๊สที่อุณหภูมิต่างๆ จะหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \tag{2-7}$$

เมื่อ

v_1 คือ ความเร็วเสียงที่อุณหภูมิ T_1 (m/s)

v_2 คือ ความเร็วเสียงที่อุณหภูมิ T_2 (m/s)

T_1 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

T_2 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ในกรณีที่อุณหภูมิ T_C มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส และ F มีหน่วยเป็นฟาเรนไฮต์ v_0 เป็นความเร็วที่ 0 องศาเซลเซียส (273 K) ซึ่งมีค่า 331.45 m/s ดังนั้นจะสามารถหาความเร็วที่อุณหภูมิใดๆ ได้ดังสมการ

$$V = 331.45\sqrt{1+\frac{T_c}{273}} \quad \text{(m/s)} \qquad (2\text{-}8)$$

หรือ $$V = 331.45 + 0.607\,T_c \quad \text{(m/s)} \qquad (2\text{-}9)$$

$$V = 1{,}052.03 + 1.106\,F \quad \text{(ft/s)} \qquad (2\text{-}10)$$

เมื่อ

T_C คือ อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส

F คือ อุณหภูมิในหน่วยองศาฟาเรนไฮต์

คลื่นเหนือเสียงเป็นคลื่นที่มีทิศทาง ทำให้สามารถส่งคลื่นไปยังจุดเป้าหมายได้อย่างเจาะจง เมื่อคลื่นมีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นก็จะสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นมากกว่าช่องเปิดของแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง* เช่น คลื่นเสียงความถี่ 300 Hz ในอากาศจะมีค่าความยาวคลื่นประมาณ 1 เมตร ซึ่งยาวกว่าช่องเปิดของแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง ทำให้คลื่นเสียงที่ออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นนี้เกิดการหักเหและเลี้ยวเบนที่ขอบด้านนอกของแหล่งกำเนิดเสียง โดยจะเกิดการกระจายของคลื่นเสียงมีทิศทางไม่แน่นอน แต่ถ้าใช้คลื่นที่มีความถี่สูงขึ้น เช่น คลื่นที่มีความถี่ 40 kHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียง 8 mm เท่านั้น ซึ่งเล็กกว่าช่องเปิดของแหล่งกำเนิดคลื่นมาก คลื่นดังกล่าวจะไม่เกิดการเลี้ยวเบนที่ขอบ จึงพุ่งเป็นลำแคบๆ (beam) อย่างมีทิศทางที่แน่นอน คลื่นเหนือเสียงที่ใช้งานในอากาศมักจะถูกจำกัดความถี่อยู่ที่ไม่เกิน 50 kHz เพราะอากาศจะดูดกลืนคลื่นที่ความถี่สูงได้มาก ทำให้ระดับความแรงของคลื่นเหนือเสียงที่ระยะห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการใช้งานในด้านทางการแพทย์นั้นจะใช้ในระยะสั้นๆ จึงใช้ความถี่ช่วง 1–10 MHz ส่วนในย่านความถี่ที่สูงกว่านี้มักจะใช้งานในตัวกลางที่ไม่ใช่อากาศ เช่น น้ำ เป็นต้น

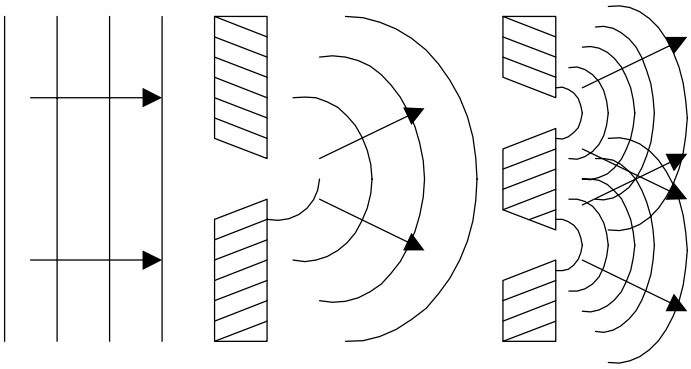
---

* แหล่งกำเนิดจะมีชิ้นสารเซรามิก (ceramic) อยู่ภายในตัวถังโดยมักจะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงประมาณ 1-2.5เซนติเมตร ด้านหน้าทำเป็นช่องเปิด มีตะแกรงติดอยู่ เพื่อให้คลื่นเหนือเสียงเข้ามาหรือออกจากช่องเปิดได้โดยสะดวก

2.3 คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นเหนือเสียง

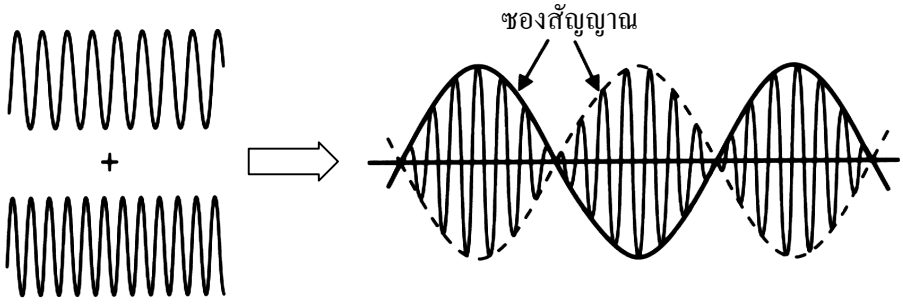
เนื่องจากคลื่นเหนือเสียงจัดเป็นประเภทหนึ่งของคลื่นเสียง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติเหมือนคลื่นเสียง โดยคุณสมบัติที่สำคัญ (Asher, 1997) มีดังนี้

2.3.1 การเลี้ยวเบน (diffraction) คลื่นเหนือเสียงสามารถเลี้ยวเบนอ้อมสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นมุมหรือช่องแคบ ดังรูปที่ 2.2



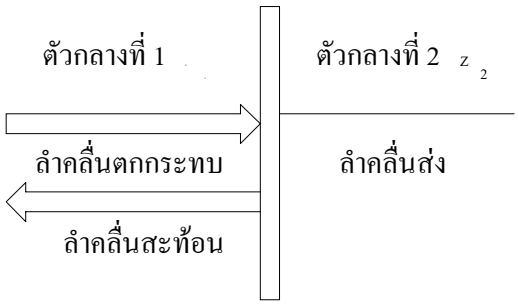
รูปที่ 2.2 การเลี้ยวเบนของคลื่นเหนือเสียง

2.3.2 การแทรกสอด (interference) เกิดจากการรวมกันของคลื่นสองขบวนขึ้นไป เมื่อพบกันในตัวกลางเดียวกัน โดยอาจทำให้คลื่นผสมกันหรือที่เรียกว่า บีต (beats) การเกิดบีตเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการรวมคลื่นที่มีความถี่ต่างกัน หรือต่างเฟสกันเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเดียวกันและรวมเป็นคลื่นใหม่ทำให้ค่าแอมพลิจูดเปลี่ยน รูปที่ 2.3 เป็นการเกิดบีตของคลื่นเสียงสองขบวน ประโยชน์ของการบีตนั้นจะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบความถี่ของคลื่นให้แสดงผลออกมาในลักษณะที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.3 การเกิดบีตของคลื่นสองขบวน

2.3.3 การสะท้อน (reflection) คลื่นเหนือเสียงสามารถสะท้อนได้เมื่อตกกระทบตัวกลางที่มีคุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกัน ซึ่งเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปกระทบผิวหน้าที่มีลักษณะแตกต่างกัน การสะท้อนของคลื่นก็จะมีความแตกต่างกันด้วย เช่น ถ้าคลื่นกระทบกับผิวหน้าที่ตั้งฉากจะได้คลื่นที่สะท้อนกลับมากที่สุด แต่ถ้าคลื่นกระทบกับผิวหน้าที่มีลักษณะเอียง คลื่นที่สะท้อนกลับมาก็จะน้อย หรือ ถ้าคลื่นกระทบผิวหน้าที่มีลักษณะขรุขระจะมีการสะท้อนกลับน้อยด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.4 การเดินทางของลำคลื่นตกกระทบ ลำคลื่นสะท้อน และลำคลื่นส่ง
เมื่อคลื่นเหนือเสียงเดินทางกระทบกับผิวหน้าที่ตั้งฉาก

2.3.4 การหักเหของคลื่นเหนือเสียง (refraction) เมื่อคลื่นเหนือเสียงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน จะเกิดการหักเหของคลื่นทำให้ความเร็วของคลื่นเปลี่ยนไป โดยที่ความถี่ยังคงที่ รูปที่ 2.5 แสดงการหักเหของคลื่นเหนือเสียง เมื่อคลื่นเหนือเสียงกระทบพื้นผิววัสดุมุม θ_i คลื่นที่สะท้อนออกมาก็จะทำมุม θ_i ที่เท่ากันด้วย แต่ถ้าคลื่นส่งผ่านต่อไปจะทำมุม θ_t โดยสามารถคำนวณได้จาก Snell 's law (Asher,1997) กล่าวคือ

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \qquad (2\text{-}11)$$

เมื่อ

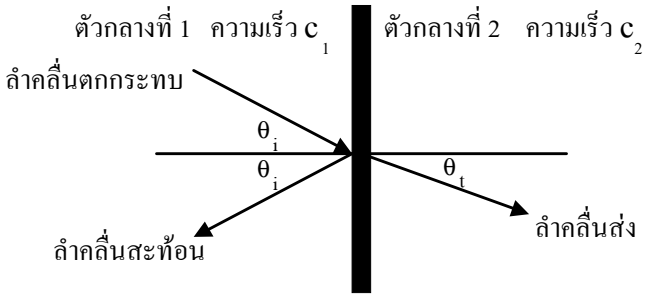
c_1 คือ ความเร็วของคลื่นเหนือเสียงในตัวกลางที่ 1

c_2 คือ ความเร็วของคลื่นเหนือเสียงในตัวกลางที่ 2

μ_1 คือ ดรรชนีการหักเห (index of refraction) ของตัวกลางที่ 1

μ_2 คือ ดรรชนีการหักเหของตัวกลางที่ 2

2.3.5 การดูดกลืนคลื่นเหนือเสียง (absorption) เมื่อคลื่นเหนือเสียงเดินทางผ่านตัวกลาง คลื่นนั้นจะค่อยๆถูกดูดกลืนไปและจะเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อน สำหรับตัวกลางที่เป็นเนื้อเยื่อในทางชีววิทยา การดูดกลืนคลื่นจะเกิดจากปรากฏการณ์ของเซลล์และโมเลกุลที่ซับซ้อน แอมพลิจูดที่ลดลงจากการดูดกลืนจะมีความสำคัญในด้านที่เกี่ยวข้องกับการวินิจฉัยโรค ตัวกลางต่างๆ ที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านจะมีการดูดกลืนที่แตกต่างกัน เช่น ตัวกลางที่คลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ได้เร็วจะดูดกลืนได้น้อย ส่วนตัวกลางที่คลื่นเหนือเสียงเคลื่อนที่ได้ช้าจะดูดกลืนคลื่นเหนือเสียงได้มาก เช่น อากาศเป็นตัวกลางที่ดูดกลืนคลื่นเหนือเสียงได้มาก ดังนั้นจึงไม่ค่อยนิยมใช้อากาศเป็นตัวกลางสำหรับคลื่นเหนือเสียงในช่วงที่มีความถี่เป็นเมกะเฮริตซ์หรือสูงกว่า (ชูศักดิ์ เวชแพศย์, 2525)



รูปที่ 2.5 การหักเหของคลื่นเหนือเสียง

2.4 อัลทราโซนิกเซนเซอร์ (ultrasonic sensor)

เซนเซอร์สำหรับคลื่นเหนือเสียงอาจแบ่งออกได้เป็นสามกลุ่มใหญ่ๆ (ทะนง โชติสรยุทธ์, 2524) กล่าวคือ

พิโซอิเล็กตริกเซนเซอร์ (piezoelectric sensor) เป็นเซนเซอร์ที่แปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล โดยมีความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) อยู่ค่าหนึ่ง

แมกนีโตรสตริกทีฟเซนเซอร์ (magnetostrictive sensor) เป็นเซนเซอร์ที่แปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าในขดลวดกับตำแหน่งความยาวของแกนเหล็กที่สวมขดลวดนั้นอยู่

อิเล็กโตรสตริกทีฟเซนเซอร์ (electrostrictive sensor) เป็นเซนเซอร์ที่แปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานทางกล

เซนเซอร์ที่ใช้กับคลื่นเหนือเสียงทั้งสามแบบที่กล่าวมานี้ แบบแรกเท่านั้นเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด เพราะหาซื้อได้ง่ายและราคาถูกที่สุด อีกทั้งในงานวิจัยนี้ยังได้ใช้พิโซอิเล็กตริกเซนเซอร์เป็นตัวกำเนิดและตรวจจับคลื่นเหนือเสียงสำหรับวัดระยะทาง ดังนั้นจะกล่าวแต่เพียงรายละเอียดของพิโซอิเล็กตริกเซนเซอร์ เท่านั้น

2.4.1 ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กตริก (piezoelectric effect)

ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กตริกเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่ง ซึ่งทำให้พลังงานสามารถเปลี่ยนแปลงจากรูปหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปหนึ่งได้ (Blitz, 1967) กล่าวคือ เมื่อมีแรงมากระทำบนผลึกพิโซอิเล็กตริก การเปลี่ยนรูปร่างของผลึกจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น ในทางกลับกันถ้ามีแรงดันไฟฟ้าป้อนให้แก่ผลึกนั้น ผลึกก็จะเปลี่ยนรูปร่างและเกิดแรงกระทำบนผลึกนั้น วัสดุที่สามารถเกิดปรากฏการณ์พิโซอิเล็กตริกมีหลายชนิด เช่น ควอร์ท (quartz) แบเรียมไตตาเนท (barium titanate) เกลือร็อคเชล (rochelle salt) เป็นต้น ผลึกที่นิยมใช้ในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียง คือ ผลึกแร่ควอรท์ โดยจะเป็นพิโซอิเล็กตริกที่มีขั้วเองตามธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีพิโซอิเล็กตริกที่สังเคราะห์ขึ้น เช่น แบเรียมไตตาเนท โดยจะผลิตออกมาในรูปแบบของชิ้นสารเซรามิกที่ต้องทำการอบผลึกภายใต้ความดันและวางในสนามไฟฟ้ากระแสตรง หลังจากถูกวางในสนามไฟฟ้าแล้วผลึกนี้ก็จะมีขั้วตามทิศทางของสนามไฟฟ้า และประพฤติตัวตามคุณสมบัติของพิโซอิเล็กตริก ในการผลิตเซนเซอร์โดยทั่วไปจะใช้ผลึกควอร์ทที่สังเคราะห์ขึ้น เพราะสามารถทำให้มีรูปร่างและขนาดต่างๆได้ อีกทั้งยังมีความบริสุทธิ์มากกว่าผลึกควอร์ทตามธรรมชาติอีกด้วย

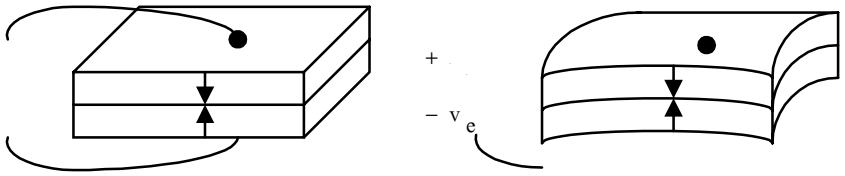
2.4.2 เซนเซอร์แบบพิโซอิเล็กตริก (piezoelectric sensor)

พิโซอิเล็กตริกเซนเซอร์จะประกอบด้วยชิ้นสารเซรามิกสี่เหลี่ยม ซึ่งมีผิวโลหะเงินฉาบอยู่ทั้งสองหน้า เพื่อต่อสายไฟออกมายังขาทั้งสองขาของเซนเซอร์ ชิ้นสารเซรามิกนี้ประกอบด้วยสารเซรามิก 2 ชิ้นประกบกันอยู่ โดยวางไดโพลทางไฟฟ้าภายในอะตอมมีทิศตรงกันข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 2.6

ชิ้นสารเซรามิกจะถูกยึดติดภายในตัวถังเพื่อไม่ให้การสั่นสะเทือนจากภายนอกเข้าไปรบกวนการสั่นของชิ้นสารขณะที่กำลังทำงานได้ ตัวถังมักจะสร้างเป็นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและมีความสูงประมาณ 1-2.5 เซนติเมตร ด้านหน้าจะทำเป็นช่องเปิดและมีตะแกรงติดอยู่เพื่อให้คลื่นเหนือเสียงเข้ามาหรือออกจากช่องนี้ได้โดยสะดวก และตะแกรงนี้ยังป้องกันสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ เช่น แมลง เป็นต้น ตัวถังทำมาจากโลหะและต่อลงกราวด์เพื่อช่วยในการกำบังสัญญาณ

เมื่อป้อนสัญญาณแรงดันที่มีลักษณะเป็นพัลส์เข้าขั้วทั้งสองของชิ้นสารเซรามิกจะทำให้ชิ้นสารโก่งงอไปมาดังรูปที่ 2.6ข) ก่อให้เกิดการอัดอากาศโดยรอบ เกิดเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่เดียวกับสัญญาณนั้นออกไป โดยทั่วไปกำลังเอาต์พุตที่ออกไปจะมีค่าประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของกำลังอินพุตที่ป้อนให้ แต่กำลังเอาต์พุตจะสูงสุดที่ค่าประมาณนี้ต่อเมื่อความถี่ของสัญญาณแรงดันที่ป้อนให้ชิ้นสารมีค่าเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งเป็นความถี่ธรรมชาติของชิ้นสารเซรามิกนั้นๆ ส่วนที่ระดับความถี่อื่นๆ กำลังเอาต์พุตจะลดน้อยลงกว่านี้

ในทำนองกลับกันเมื่อคลื่นเหนือเสียงที่มีความถี่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของชิ้นสารเซรามิกเข้ามากระทบชิ้นสารเซรามิก จะทำให้ชิ้นสารเซรามิกโก่งงอไปมาและเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นตกคร่อมที่ขั้วทั้งสองของชิ้นสารเองได้ โดยขนาดของแรงดันขึ้นอยู่กับความเข้มของคลื่น (ทนง โชติสรยุทธ์, 2524)



ก) ข)

รูปที่ 2.6 ก) แบบจำลองของชิ้นสารเซรามิกภายในอัลทราโซนิกเซนเซอร์แบบพิโซอิเล็กตริก
ข) เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่ชิ้นสารเซรามิกจะทำให้ชิ้นสารเซรามิกโก่งงอไปมา ทำให้เกิดคลื่นเหนือเสียงกระจายไปในอากาศ

2.5 การใช้อัลทราโซนิกเซนเซอร์วัดระยะทาง

2.5.1 หลักการทั่วไปของการใช้อัลทราโซนิกเซนเซอร์วัดระยะทาง

การใช้งานอัลทราโซนิกเซนเซอร์ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ในการตรวจจับปริมาณทางกายภาพ เช่น ระยะทาง, ขนาดของวัตถุเล็กๆ เป็นต้น การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์จะอาศัยหลักการทั่วไปของอัลทราโซนิก กล่าวคือ คลื่นเหนือเสียงจะถูกส่งออกไปจากตัวส่งคลื่น คลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง เช่น อากาศ หรือของไหลอื่นๆ (Andria, Attivissimo and Lanzolla, 1998) เมื่อคลื่นที่ถูกส่งออกไปนั้นกระทบผิวสัมผัสหรือวัตถุใดๆ ก็จะสะท้อนกลับมายังตัวรับคลื่น โดยสิ่งจำเป็นที่ต้องทราบจากกระบวนการนี้ คือ เวลาที่คลื่นเดินทางจากอัลทราโซนิกตัวส่งจนกระทั่งสะท้อนกลับมายังอัลทราโซนิกตัวรับหรือ ToF นั่นเอง

ระยะทางระหว่างจุดส่งและรับคลื่นกับผิวสัมผัสหรือวัตถุใดๆที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น ซึ่งตามปกติตัวส่งและตัวรับคลื่นอัลทราโซนิกได้รับการติดตั้งให้ประชิดกัน จะสามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ทางฟิสิกส์พื้นฐาน กล่าวคือ

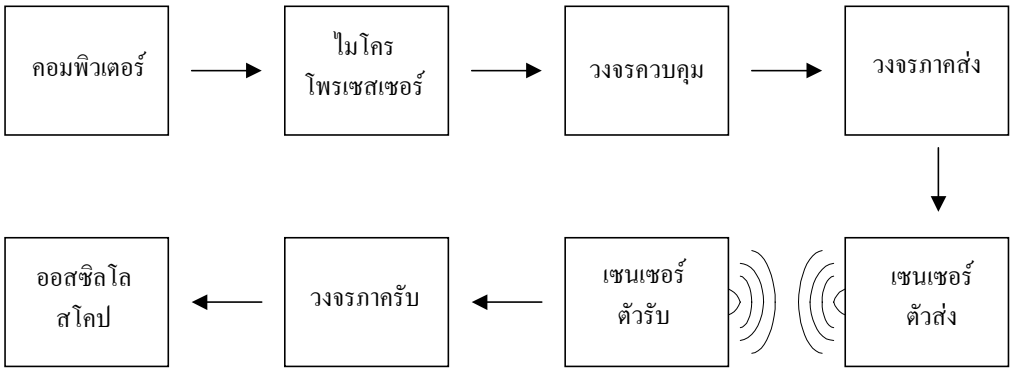
$$S = \frac{vt}{2} \qquad (2\text{-}12)$$

เมื่อ

S คือ ระยะทางจากชุดอัลทราโซนิกถึงวัตถุที่ทำการวัดระยะห่าง (เมตร)

t คือ เวลาที่ใช้ในการเดินทางทั้งหมดของคลื่นอัลทราโซนิกหรือเรียกว่า time of flight หรือ ToF (วินาที)

v คือ ความเร็วเสียงในอากาศ (เมตร/วินาที)



รูปที่ 2.7 แผนภาพบล็อกแทนระบบวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์

ระบบการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงได้ด้วยแผนภาพดังรูปที่ 2.7 สำหรับการทำงานของระบบวัดระยะทางนั้น ผู้ใช้จะสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์ซึ่งติดต่อกับไมโครโพรเซสเซอร์ผ่านทางพอร์ทอนุกรมเพื่อสั่งให้วงจรควบคุมทำงาน โดยจะสั่งให้ตัวส่งส่งคลื่นเหนือเสียงออกไป ในขณะที่ตัวรับจะต่อกับออสซิลโลสโคป ซึ่งทำหน้าที่บันทึกสัญญาณของคลื่นสะท้อนกลับจากหน้าสัมผัสของวัตถุเป้าหมาย มายังตัวรับเพื่อประมวลผลการวัดระยะทางต่อไป

2.5.2 การออกแบบวงจรภาคส่งสำหรับอัลทราโซนิกเซนเซอร์

อัลทราโซนิกเซนเซอร์จะสามารถผลิตคลื่นเหนือเสียงได้ ก็ต่อเมื่อ มีพัลส์ที่มีความถี่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของชิ้นสารเซรามิกมาทำการกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือน เพื่อให้เกิดการกดและขยายอากาศบริเวณรอบๆ เกิดเป็นคลื่นออกไป ความถี่เรโซแนนซ์ของเซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปตามข้อกำหนดทางเทคนิคของอัลทราโซนิกเซนเซอร์มีค่าเท่ากับ 40 kHz

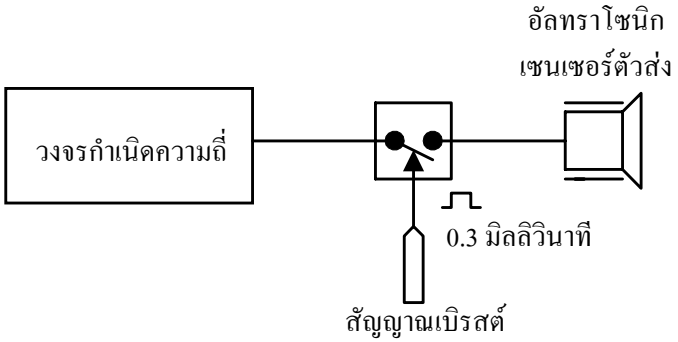
วงจรภาคส่งแสดงเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ 2.8 วงจรกำเนิดความถี่เป็นวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ สามารถผลิตพัลส์ความถี่ออกมาโดยใช้ไอซี TLC556 ดังรูปที่ 2.9 โดยจะกำเนิดพัลส์ความถี่ 40 kHz ที่ขา 5 โดยช่วงเวลางาน (duty cycle : D) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$D = \frac{(R_a + R_b)}{(R_a + 2R_b)} \quad (2\text{-}13)$$

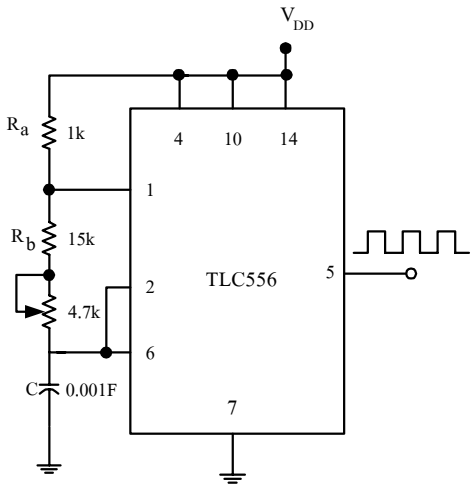
โดยพัลส์ที่ดีจะมีช่วงเวลางานประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และคำนวณความถี่ (f) จาก

$$f = \frac{1.443}{(R_a + 2R_b) \times C} \quad (2\text{-}14)$$

รายละเอียดของความสัมพันธ์ที่ (2-13) และ (2-14) แสดงไว้ในภาคผนวก ก.



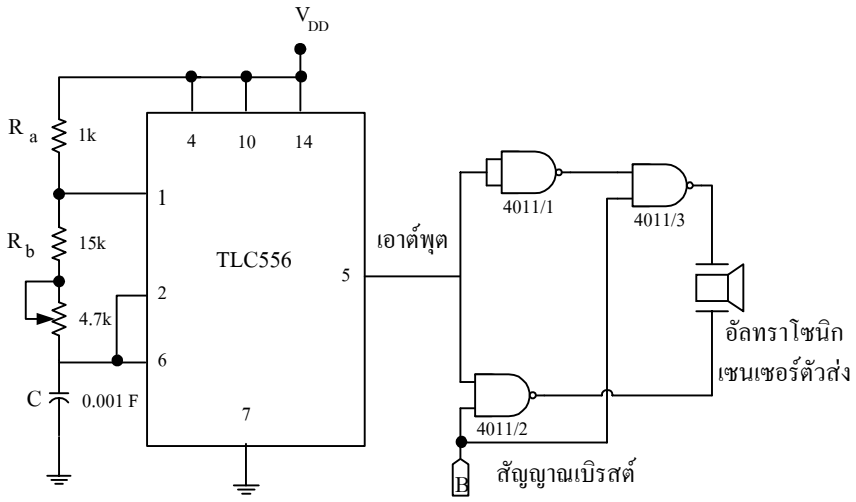
รูปที่ 2.8 แผนภาพบล็อกแทนวงจรภาคส่ง



รูปที่ 2.9 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์โดยใช้ TLC 556

วงจรภาคส่งต้องการความถี่ 40 kHz เลือก R_a เท่ากับ 1 kΩ เลือก R_b เท่ากับ 15 kΩ + 4.7 kΩ ตัวต้านทาน 4.7 kΩ เป็นโพเทนชิออมิเตอร์ (potentiometer) และเลือก C ตัวเก็บประจุ 0.001 μF ถ้าปรับโพเทนชิออมิเตอร์ให้มีค่าประมาณ 2.5 kΩ วงจรจะกำเนิดพัลส์ที่มีช่วงเวลางานเท่ากับ 51.4 เปอร์เซ็นต์ และมีความถี่เท่ากับ 40.083 kHz

การใช้อัลทราโซนิกเซนเซอร์วัดระยะทางโดยใช้หลักการส่งคลื่นออกไปแล้วรอคลื่นที่สะท้อนกลับมานั้น คล้ายกับการทำงานของเรดาร์หรือระบบโซนาร์ คือ จะปล่อยพัลส์สั้นๆออกไปในสภาวะแวดล้อมและคอยจับเวลาในการสะท้อนกลับมาของพัลส์นั้นๆ ในส่วนของวงจรกำเนิดพัลส์ซึ่งใช้ไอซี TLC556 จะกำเนิดพัลส์มีความถี่ 40 kHz โดยมีลักษณะต่อเนื่อง ดังนั้นจึงนำเอาต์พุตของ TLC556 ต่อกับแนนด์เกต ซึ่งทำหน้าที่คล้ายสวิตช์เปิดปิดให้พัลส์ความถี่ 40 kHz ผ่านไปยังตัวส่งได้เป็นช่วงๆ วงจรดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นว่า ส่วนของวงจรกำเนิดความถี่ 40kHz เป็นวงจรอะสเตเบิ้ลมัลติไวเบรเตอร์ที่สร้างจากไอซี TLC556 ดังรายละเอียดที่กล่าวไปแล้วข้างต้น เอาต์พุตจากขา 5 ของ TLC556 จะถูกส่งไปให้แนนด์เกตที่ทำหน้าที่คล้ายสวิตช์เปิดปิดให้พัลส์ความถี่ 40kHz ผ่านไปที่ตัวส่ง โดยมีสัญญาณเบิรสต์เป็นตัวไปกระตุ้น (trig) สวิตช์เปิดให้พัลส์ความถี่ 40kHz ผ่านไปได้



รูปที่ 2.10 วงจรภาคส่งคลื่นเหนือเสียง

วงจรแนนด์เกตนั้นจะใช้ไอซีดิจิตอล CMOS เบอร์ 4011 จากรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าแนนด์เกต 4011/1 ทำหน้าที่กลับเฟสของสัญญาณพัลส์ ส่วนแนนด์เกต 4011/2 จะมีสัญญาณพัลส์แบบเดียวกับเอาต์พุตขา 5 ของ TLC556 มารออยู่ เมื่อมีสัญญาณเบิรสต์จากพอร์ตขนานของบอร์ด

ไมโครโพรเซสเซอร์มาทริกที่ขาที่เหลือของแนนด์เกต 4011/2 จะทำให้พัลส์ผ่านแนนด์เกต 4011/2 ไปได้ ในขณะเดียวกันสัญญาณพัลส์ที่ถูกกลับเฟสจากแนนด์เกต 4011/1 จะมารอที่อินพุตหนึ่งของแนนด์เกต 4011/3 และอีกอินพุตหนึ่งของ 4011/3 จะรับสัญญาณเบิรสต์เช่นกัน ทำให้สัญญาณพัลส์ความถี่ 40 kHz ที่กลับเฟสผ่านไปได้ ดังจะเห็นได้ว่า การทำงานของแนนด์เกต 4011/1 และ 4011/2 จะทำงานเหมือนวงจรพุช-พูล (push-pull circuit) คือ สัญญาณที่เข้ามาจะถูกแบ่งออกเป็นสองสัญญาณ โดยสัญญาณหนึ่งถูกกลับเฟส 180° ในขณะที่อีกสัญญาณหนึ่งยังคงเดิม ซึ่งจะเกิดการผลักและดึงกระแสทำให้ขนาดของสัญญาณที่ออกไปมีขนาดมากขึ้น ถ้าเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่ขา 5 ของ TLC556 ที่มีขนาดเพียง 5 โวลต์ ทำให้สามารถส่งคลื่นในระยะที่ไกลขึ้นได้

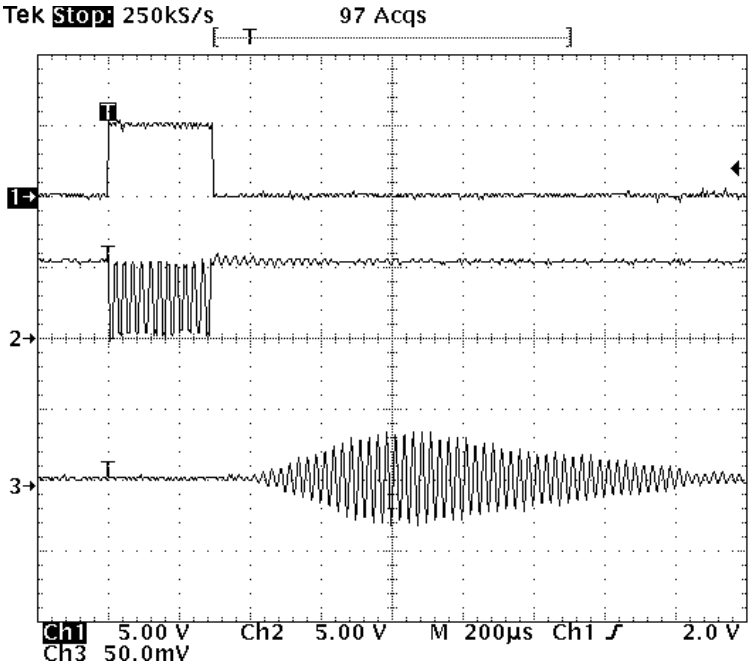
ดังจะเห็นได้ว่า แม้คลื่นความถี่ 40 kHz จะถูกสร้างขึ้นมาตลอดเวลา แต่ก็ยังไม่สามารถไปถึงตัวส่งได้ จนกว่าจะมีสัญญาณเบิรสต์ที่มีลอจิก “1” เข้าไปที่ขั้วต่อ B สัญญาณควบคุมการส่งคลื่นที่เข้าสู่ขั้ว B นั้นจะถูกสร้างจากส่วนของโปรแกรมของไมโครโพรเซสเซอร์ผ่านเอาต์พุตพอร์ทซึ่งอยู่บนบอร์ดไมโครโพรเซสเซอร์ โดยสัญญาณเบิรสต์นั้นจะเป็นการส่งสัญญาณพัลส์ขนาด 5 โวลต์ออกมาเป็นเวลา 0.3 มิลลิวินาที ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งภายในช่วงเวลา 0.3 มิลลิวินาทีนี้ คลื่นเหนือเสียงที่ถูกส่งออกจากตัวส่งจะมีจำนวน 12 พัลส์

2.5.3 การออกแบบวงจรภาครับ

ดังที่ได้อธิบายผ่านมาข้างต้นแล้วว่า เมื่อมีคลื่นเหนือเสียงมากระทบเซนเซอร์ตัวรับ จะเกิดแรงดันขนาดเล็กขึ้นมาตกคร่อมเซนเซอร์ แรงดันที่เกิดขึ้นนี้จะมีรูปคลื่นที่มีความถี่เดียวกับคลื่นเหนือเสียงที่มากระทบ และจะมีขนาดสูงสุดเมื่อความถี่ของคลื่นเหนือเสียงที่เข้ามาตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของตัวรับ ส่วนที่ความถี่อื่นๆ ขนาดสัญญาณจะออกมาน้อยมากแรงดันที่เกิดขึ้นจะมีขนาดน้อยมากๆ ยิ่งเมื่อนำไปวัดระยะทางไกลๆ แรงดันที่ได้จะมีค่าเพียงระดับไมโครโวลต์เท่านั้น วงจรภาครับโดยทั่วไปจะต้องมีภาคขยาย เพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จากตัวรับให้มีขนาดสูงพอที่จะนำไปควบคุมหรือสั่งงานอุปกรณ์อื่นๆ แต่ในงานวิจัยนี้ได้เน้นที่จะวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จากตัวรับเพื่อหาระยะที่แม่นยำ โดยใช้ออสซิลโลสโคปบันทึกสัญญาณที่ตัวรับ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีภาคขยายสัญญาณ สำหรับวงจรภาครับนั้นเพียงต่อตัวต้านทานขนาด 10 kΩ และต่อตัวเก็บประจุขนาด 100 pF ขนานกับตัวรับเพื่อทำหน้าที่เป็นโหลดและกรองสัญญาณรบกวน

ในการตรวจจับสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับ เมื่อติดตั้งให้ตัวส่งและตัวรับอยู่ประชิดกันพบว่า เกิดการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างเซนเซอร์ตัวส่งและตัวรับ ในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีในการแก้ปัญหาดังกล่าวไว้สองวิธีใหญ่ๆ กล่าวคือ วิธีที่หนึ่งติดตั้งตัวส่งและตัวรับให้อยู่คนละตำแหน่งกัน ส่วนวิธีที่สองติดตั้งเซนเซอร์ตัวส่งและตัวรับให้ประชิดกันแต่นำเอาวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดซับและสะท้อนคลื่นมากั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ โดยวัสดุที่นำมาใช้กั้นระหว่างตัวส่ง

และตัวรับ ได้แก่ แผ่นอะลูมิเนียม แผ่นสังกะสี แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม วัสดุที่มีลักษณะทรงกระบอกทำจากพลาสติกแข็ง และฉนวนใยแก้ว จากผลการทดสอบพบว่า การใช้วัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากพลาสติกแข็งสามารถที่จะลดการแทรกสอดระหว่างตัวส่งและตัวรับได้ดีที่สุด โดยสัญญาณที่เซนเซอร์ตัวส่ง เซนเซอร์ตัวรับ และ สัญญาณเบิรสต์ แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งสัญญาณบน คือ สัญญาณเบิรสต์จากไมโครโพรเซสเซอร์ที่ไปเปิดเกต สัญญาณกลาง คือ สัญญาณที่ไปกระตุ้นตัวส่ง และสัญญาณล่าง คือ สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ (รายละเอียดผลการทดสอบการลดการแทรกสอดปรากฏในภาคผนวก ข.)

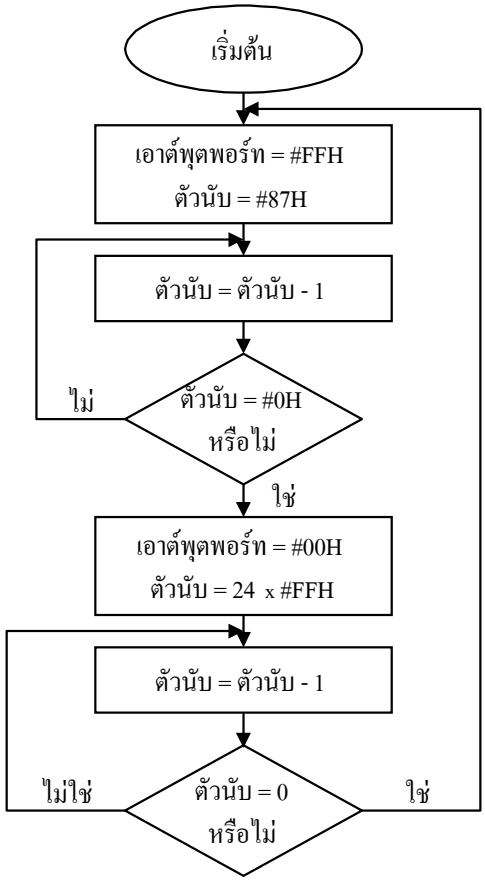


รูปที่ 2.11 สัญญาณของอัลทราโซนิกเซนเซอร์

2.5.4 โปรแกรมควบคุมการกระตุ้นตัวส่งคลื่น

ในการควบคุมอัลทราโซนิกเซนเซอร์ตัวส่งนั้นจะใช้ไมโครโพรเซสเซอร์สร้างสัญญาณเบิรสต์ ซึ่งเป็นพัลส์ที่มีลอจิก “1” มีขนาด 5 โวลต์ สำหรับไปกระตุ้นแนนด์เกต โปรแกรมในการควบคุมการส่งสัญญาณเบิรสต์ออกไปกระตุ้นตัวส่งจะใช้ภาษาแอสเซมบลี้ โดยแผนภูมิของโปรแกรมแสดงในรูปที่ 2.12 โปรแกรมจะทำการสร้างสัญญาณเบิรสต์ออกมาเป็นเวลา 0.3 มิลลิวินาที จากนั้นหน่วงเวลาประมาณ 13.3 มิลลิวินาที เพื่อรอรับคลื่นที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ แล้วจึงสร้างสัญญาณเบิรสต์พัลส์ต่อไปอีก 0.3 มิลลิวินาที และวนรอบเช่นนี้ไปเรื่อยๆ การส่งสัญญาณ

เบิรสต์ที่สร้างขึ้นนั้นจะส่งผ่านเอาต์พุตพอร์ทซึ่งอยู่บนไมโครโพรเซสเซอร์ 8051 บอร์ดโปรแกรมภาษาแอสแซมบลี้ที่ใช้สร้างสัญญาณเบิรสต์ มีรายละเอียดปรากฏในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมสร้างสัญญาณเบิรสต์

รายละเอียดของโปรแกรม

LOOP1 : เป็นส่วนกำหนดค่าพอร์ท P1 ให้มีค่าเท่ากับ 1

DELAY และDEL : เป็นส่วนของการหน่วงเวลาให้ พอร์ท P1 มีค่า 1 เป็นเวลา 0.3 มิลลิวินาที

LOOP2 : เป็นส่วนกำหนดค่าพอร์ท P1 ให้มีค่าเท่ากับ 0

DELAY1 ถึง DEL 24 : เป็นส่วนของการหน่วงเวลาให้พอร์ท P1 มีค่า 0 เป็นเวลา 13.3 มิลลิวินาที

เวลาที่ใช้ในการส่งคลื่น คือ 0.3 มิลลิวินาที โดยจะมีพัลส์ความถี่ 40 kHz จำนวน 12 พัลส์ไปกระตุ้นตัวส่ง อย่างไรก็ตามคลื่นเหนือเสียงที่ส่งออกไปจากตัวส่งจะมีค่ามากกว่า 12 พัลส์เนื่องจากเกิดการสั่นอย่างต่อเนื่องจากพัลส์ที่ส่งไปกระตุ้น ถ้าหากใช้เวลาในการส่งคลื่นน้อยเกินไปจะทำให้โอกาสที่จะได้รับคลื่นที่สะท้อนกลับน้อยลงเมื่อนำไปตรวจจับระยะทางไกลๆ แต่ถ้าเวลาในการ

ส่งคลื่นมากเกินไปก็จะทำให้ไม่สามารถตรวจจับระยะทางที่ใกล้ๆได้ เพราะเวลาในการส่งอาจจะมากกว่าเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมายังตัวรับ

```
//โปรแกรมภาษาแอสแซมบลี้ของ 8051 สำหรับสร้างสัญญาณเบริสต์
//โดย ทิวาวรรณ เนตรผง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
                ORG     8000H
LOOP1:  MOV     P1,#FFH         //กำหนดให้พอร์ต P1 เป็น 1
DELAY:  MOV     R1,#87H         //กำหนดค่าเริ่มต้นให้รีจิสเตอร์ R1
DEL:            DJNZ    R1,DEL  //ลดค่าใน R1 และถ้า R1 มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ให้ไปที่ DEL
LOOP2:  MOV     P1,#00H         //กำหนดให้พอร์ต P1 เป็น 0
DELAY1:         MOV     R2,#FFH //กำหนดค่าเริ่มต้นให้รีจิสเตอร์ R2
DEL1:   DJNZ    R2,DEL1         //ลดค่าใน R2 และถ้า R2 มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ให้ไปที่ DEL1
DELAY2:         MOV     R3,#FFH //กำหนดค่าเริ่มต้นให้รีจิสเตอร์ R3
DEL2:   DJNZ    R3,DEL2         //ลดค่าใน R3 และถ้า R3 มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ให้ไปที่ DEL2
DELAY3:         MOV     R4,#FFH //กำหนดค่าเริ่มต้นให้รีจิสเตอร์ R4
DEL3:   DJNZ    R4,DEL3         //ลดค่าใน R4 และถ้า R4 มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ให้ไปที่ DEL3
DELAY4:         MOV     R5,#FFH //กำหนดค่าเริ่มต้นให้รีจิสเตอร์ R5
DEL4:   DJNZ    R5,DEL4         //ลดค่าใน R5 และถ้า R5 มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ให้ไปที่ DEL4
                        :
                        :
DELAY21:        MOV     R2,#FFH
DEL21:  DJNZ    R2,DEL5
DELAY22:        MOV     R3,#FFH
DEL22:  DJNZ    R3,DEL6
DELAY23:        MOV     R4,#FFH
DEL23:  DJNZ    R4,DEL7
DELAY24:        MOV     R5,#FFH
DEL24:  DJNZ    R5,DEL8         //เวลาในการลดค่าในรีจิสเตอร์ตั้งแต่ DELAY2 และ
                                  DELAY24 เท่ากับ 13.3 มิลลิวินาที
                SJMP    LOOP    //กลับไปทำงานที่ LOOP
                END
```

รูปที่ 2.13 โปรแกรมภาษาแอสแซมบลี้ของ 8051 สำหรับสร้างสัญญาณเบริสต์

2.6 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทที่ 2 นี้ ได้กล่าวถึง คุณสมบัติเบื้องต้นของคลื่นเหนือเสียง อัลทราโซนิกเซนเซอร์ ความรู้พื้นฐานของการใช้อัลทราโซนิกเซนเซอร์ หลักการใช้อัลทราโซนิกเซนเซอร์ในการวัดระยะทาง การออกแบบวงจรที่จำเป็นสำหรับอัลทราโซนิกเซนเซอร์ในการวัดระยะทาง ได้แก่ วงจรภาคส่งและภาครับคลื่นเหนือเสียง และในหัวข้อสุดท้ายได้กล่าวถึงโปรแกรมในการควบคุมการกระตุ้นเซนเซอร์ตัวส่ง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ ซึ่งเป็นแบบพิโซอิเล็กตริกเซนเซอร์ ที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 40 kHz และบันทึกสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับด้วยออสซิลโลสโคป โดยสัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ เพื่อหาระยะทางที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังที่จะได้กล่าวถึงในบทต่อๆ ไป

บทที่ 3
วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด

3.1 บทนำ

ในการหาค่า ToF สำหรับการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ โดยทั่วไปจะนิยมใช้วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (Gueuning, Varlan, Eugene and Dupuis, 1996) ซึ่งวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับ โดยทำการตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนของแอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ เมื่อสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับมีแอมพลิจูดมากกว่าค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้ ค่า ToF จะเป็นค่าเวลา ณ จุดที่แอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมีค่ามากกว่าค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้นั่นเอง ในความเป็นจริงแล้วคลื่นที่สะท้อนกลับมายังตัวรับจะเกิดขึ้นก่อนระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งค่าไว้ ส่งผลให้ค่า ToF ที่ได้มีค่ามากกว่าค่า ToF ที่ควรจะเป็น จึงทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นโดยระยะทางที่คำนวณได้จะมากกว่าความเป็นจริง (Parrilla, Anaya and Fritsch, 1991)

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด ซึ่งนำเอาจีนเนติกอัลกอริทึมมาช่วยค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่า ToF และคำนวณระยะทางที่วัดได้ให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอหลักการของจีนเนติกอัลกอริทึม การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด และวิธีการในการนำจีนเนติกอัลกอริทึมมาช่วยค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด อีกทั้งยังได้นำเสนอการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของจีนเนติกอัลกอริทึมสำหรับใช้ในการค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด

3.2 หลักการของจีนเนติกอัลกอริทึม

จีนเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm หรือ GA) เป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีความสามารถในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดอย่างชาญฉลาด โดยอาศัยหลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์ (อาทิตย์ ศรีแก้ว, 2545) หลักการของจีนเนติกอัลกอริทึมแบ่งออกได้เป็น 3 หัวข้อใหญ่ๆ ดังนี้

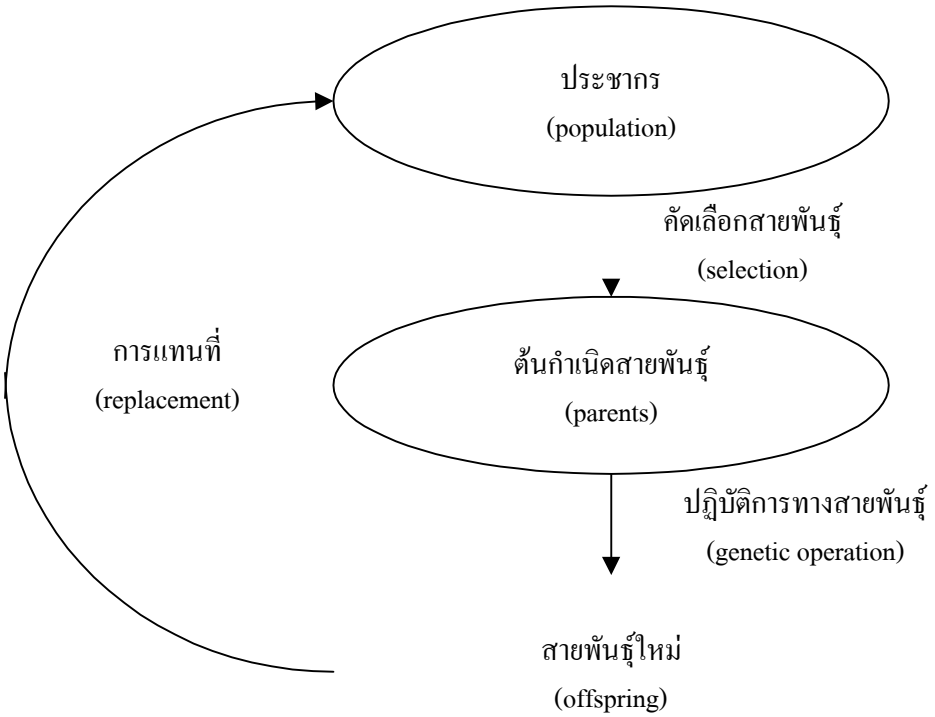
3.2.1 กระบวนการของจีนเนติกอัลกอริทึม

วัฏจักรของจีนเนติกอัลกอริทึมโดยอาจแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ กล่าวคือ

การคัดเลือกสายพันธุ์ (selection) คือ ขั้นตอนในการคัดเลือกประชากรที่ดีไปเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป

ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (genetic operation) คือ กรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีการทางสายพันธุ์ เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นโครโมโซมลูกหลานที่ได้รับส่วนดีจากโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์

การแทนที่ (replacement) คือ ขั้นตอนการนำเอาลูกหลานที่กำเนิดใหม่จากต้นกำเนิดสายพันธุ์ไปแทนที่บางส่วนของโครโมโซมประชากรรุ่นก่อน



รูปที่ 3.1 วัฏจักรของจีนเนติกอัลกอริทึม

รายละเอียดขององค์ประกอบในวัฏจักรของจีนเนติกอัลกอริทึมที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 มีดังนี้

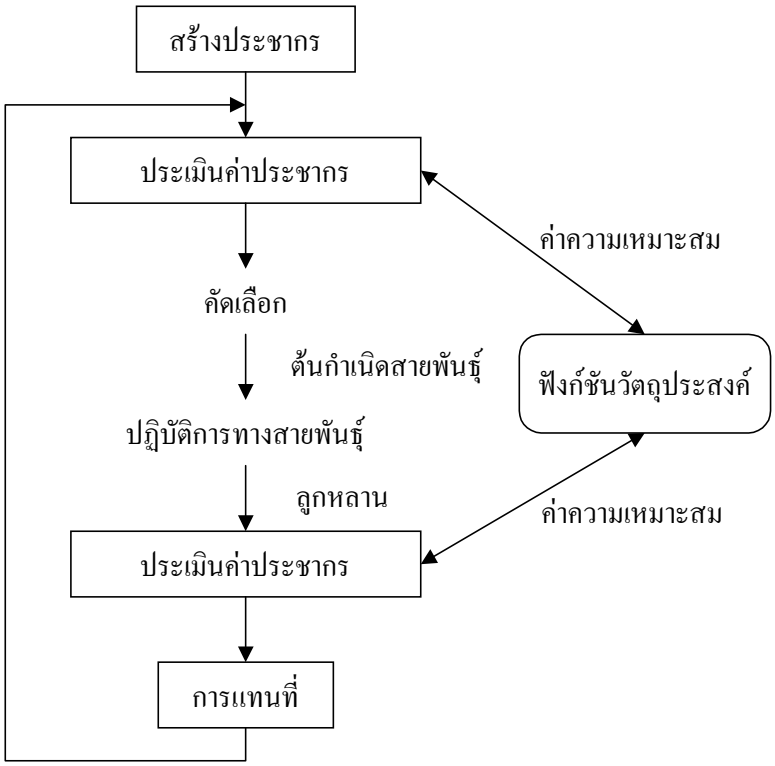
ประชากร (population) คือ กลุ่มของโครโมโซม (chromosome) ซึ่งเป็นตัวแทนของระบบที่ต้องการหา

ต้นกำเนิดสายพันธุ์ (parents) คือ กลุ่มประชากรที่ถูกคัดเลือกเพื่อใช้เป็นตัวแทนในการให้กำเนิดสายพันธุ์ใหม่ในรุ่นถัดไป (next generation) ดังนั้นประชากรกลุ่มนี้จึงเปรียบเสมือนพ่อแม่ ที่จะสืบทอดพันธุกรรมให้ลูกหลานต่อไป

สายพันธุ์ใหม่ (offspring) หรือ ลูกหลาน คือ ประชากรกลุ่มใหม่ที่ได้รับการถ่ายทอดสายพันธุ์มาจากพ่อแม่ โดยคาดหวังว่าจะเกิดสายพันธุ์ที่ดีที่สุดเพื่อถ่ายทอดต่อๆ กันในประชากรรุ่นถัดไป

3.2.2 ขั้นตอนการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึม

ขั้นตอนการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึมแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยมีขั้นตอนการทำงานเป็นดังนี้



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึม

ขั้นตอนที่ 1 สร้างประชากร ซึ่งตามปกติจะใช้วิธีการสุ่ม (random)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการประเมินค่าโครโมโซมของกลุ่มประชากรที่สร้างขึ้นด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ซึ่งก่อนที่จะประเมินค่าโครโมโซมของกลุ่มประชากรนั้น จะต้องถอดรหัสโครโมโซมก่อน เพื่อให้ระบบเข้าใจค่าของโครโมโซม

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซม จากนั้นส่งค่ากลับไปยังจีนเนติกอัลกอริทึม

ขั้นตอนที่ 4 ทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่มจากค่าความเหมาะสมที่ได้ในขั้นตอนที่ 3 เพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์

ขั้นตอนที่ 5 นำต้นกำเนิดสายพันธุ์มาทำปฏิบัติการทางสายพันธุ์ เพื่อสร้างโครโมโซมประชากรลูกหลาน

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลาน โดยใช้วิธีเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 7 ทำการแทนที่โครโมโซมประชากรเดิมด้วยโครโมโซมลูกหลานจากขั้นตอนที่ 5 ซึ่งจะมีประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอนของการแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสม

ขั้นตอนที่ 8 เริ่มต้นทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 2 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ดีที่สุดตามต้องการ

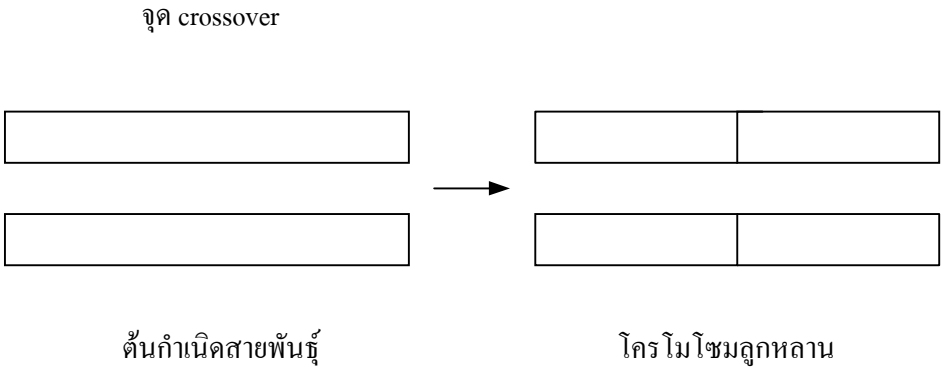
3.2.3 ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (genetic operation)

ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ เป็นการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ให้เป็นโครโมโซมลูกหลาน ซึ่งโครโมโซมลูกหลานนี้จะได้รับส่วนดีจากโครโมโซมต้นกำเนิด ปฏิบัติการทางสายพันธุ์จะมีอยู่ 2 วิธีหลักๆ กล่าวคือ

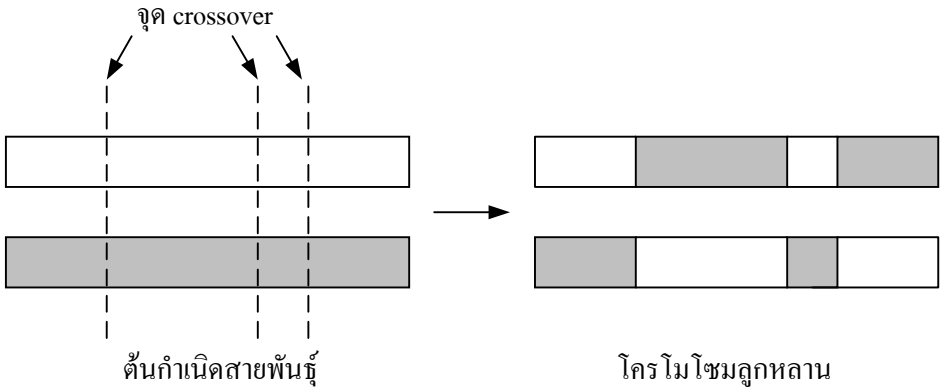
การทำครอสโอเวอร์ (crossover) เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม (recombination operator) ระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไปเพื่อให้ได้เป็นโครโมโซมลูกหลานซึ่งมีพันธุกรรมจากต้นกำเนิดสายพันธุ์อยู่ในตัว ในการกำหนดอัตราการทำครอสโอเวอร์ ปกติจะกำหนดโดยใช้ความน่าจะเป็น วิธีการทำครอสโอเวอร์ของจีนเนติกอัลกอริทึมมีอยู่หลายแบบด้วยกันซึ่งได้แก่ การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว (single-point crossover) การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด (multiple-point crossover) และการทำครอสโอเวอร์แบบสลับที่ (shuffle crossover) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีการทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด เนื่องจากการทำครอสโอเวอร์แบบดังกล่าวให้ผลที่ดีกว่าการทำครอสโอเวอร์แบบอื่นๆ ดังผลทดสอบในหัวข้อที่ 3.4 การทำครอสโอแวอร์แบบจุดเดียวและการทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุดแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

การทำมิวเทชัน (mutation) เป็นวิธีการแปรผันยีนหรือเปลี่ยนแปลงส่วนย่อยของโครโมโซมเดิม ทำให้กลายเป็นโครโมโซมใหม่ ในทางปฏิบัติแล้วยีน คือ บิตในระบบตัวเลขของคอมพิวเตอร์

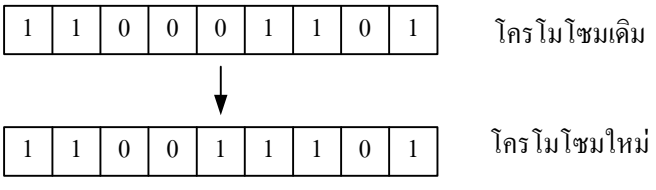
ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยปกติแล้วการทำมิวเทชันจะมีอัตราการใช้งานค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันน้อย



รูปที่ 3.3 การครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว



รูปที่ 3.4 การครอสโอเวอร์แบบหลายจุด



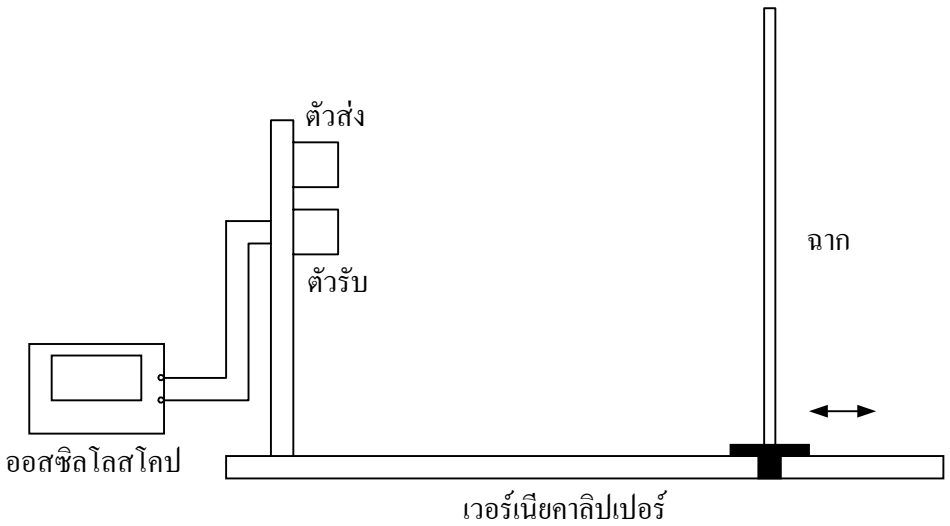
รูปที่ 3.5 การทำมิวเทชัน

3.3 0การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ว่า การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์จะอาศัยหลักการทั่วไปของอัลทราโซนิก กล่าวคือ คลื่นเหนือเสียงจะถูกส่งออกไปจากตัวส่ง คลื่นดังกล่าวจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง เช่น อากาศ หรือ ของไหลอื่นๆ และเมื่อกระทบผิวสัมผัสหรือวัตถุใดๆ คลื่นนั้นก็จะสะท้อนกลับมายังตัวรับ ดังนั้นการหาค่า ToF จึงวิเคราะห์ได้จากสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับ ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึง การทดสอบการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด รวมทั้งนำเสนอการหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่า ToF ด้วยจีนเนติกอัลกอริทึม

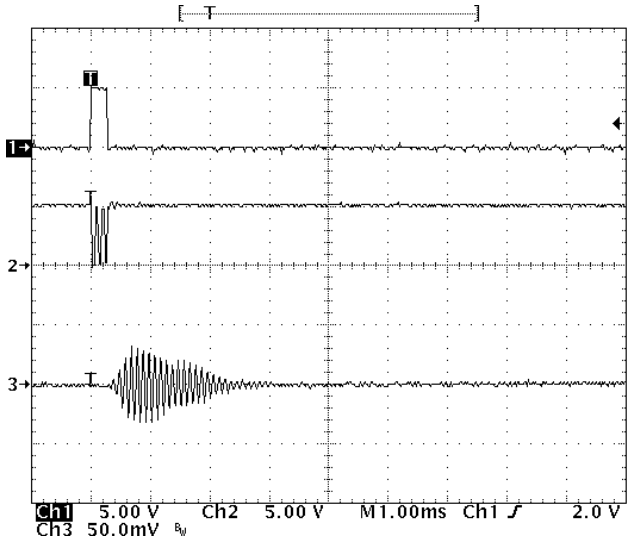
3.3.1 การทดสอบการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์

ชุดวัดระยะทางประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ชุดอัลทราโซนิกเซนเซอร์ และฉากเป็นวัตถุที่ทำจากแผ่นพลาสติกโปร่งใสมีขนาดความหนา 50 มิลลิเมตร และมีขนาดพื้นที่ 20 x 30 เซนติเมตร ชุดเซนเซอร์และฉากจะถูกติดตั้งให้อยู่ในแนวตั้งฉากกัน โดยชุดวัดระยะทางนี้จะถูกติดตั้งไว้บนเวอร์เนียคาลิปเปอร์ ซึ่งชุดอัลทราโซนิกเซนเซอร์ถูกติดตั้งอยู่กับที่ตรงบริเวณส่วนหัวของเวอร์เนียคาลิปเปอร์ ในขณะที่แผ่นพลาสติกจะถูกติดตั้งไว้ที่แกนเลื่อนของเวอร์เนียคาลิปเปอร์ซึ่งสามารถเลื่อนเข้าและเลื่อนออกจากชุดเซนเซอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

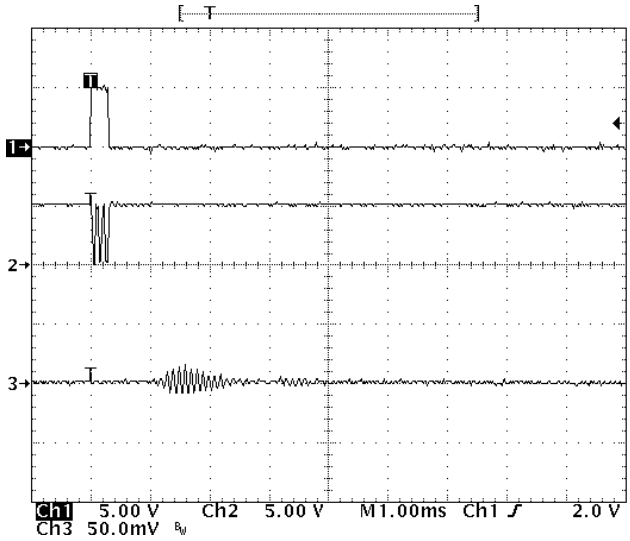


รูปที่ 3.6 ระบบวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์

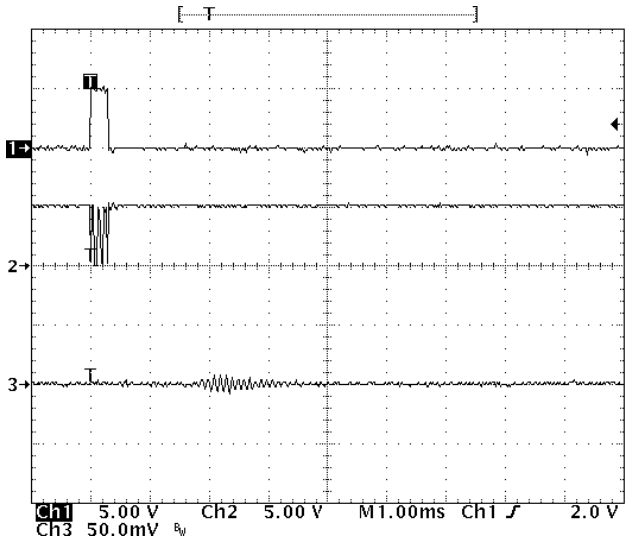
ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวัดระยะทางระหว่างชุดอัลทราโซนิกเซนเซอร์และฉาก โดยทำการเลื่อนฉากออกจากชุดอัลทราโซนิกเซนเซอร์ที่ระยะทาง 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 และ 30 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังทำการวัดระยะทางโดยการเลื่อนฉากเข้าหาชุดอัลทราโซนิกเซนเซอร์ที่ระยะทางเดียวกัน โดยแต่ละระยะทางจะทำการวัดและบันทึกสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยออสซิลโลสโคปหกครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับที่ระยะทาง 6, 18 และ 30 เซนติเมตร แสดงไว้ในภาพ 3.7 –3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 สัญญาณของอัลทราโซนิกเซนเซอร์เมื่อวัดระยะทาง 6 เซนติเมตร



รูปที่ 3.8 สัญญาณของอัลทราโซนิกเซนเซอร์เมื่อวัดระยะทาง 18 เซนติเมตร



รูปที่ 3.9 สัญญาณของอัลทราโซนิกเซนเซอร์เมื่อวัดระยะทาง 30 เซนติเมตร

รูปสัญญาณบน รูปสัญญาณกลาง และรูปสัญญาณล่างที่ปรากฏในรูปที่ 3.7-3.9 คือ สัญญาณเบิรสต์จากไมโครโพรเซสเซอร์ที่ไปเปิดเกต สัญญาณที่ไปกระตุ้นเซนเซอร์ตัวส่ง และสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับ ตามลำดับ

3.3.2 วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด (Optimum threshold method)

ในการหาค่า ToF โดยทั่วไปจะนิยมใช้เทคนิคการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งจะวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ โดยจะทำการตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนของแอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับ เมื่อสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับมีแอมพลิจูดมากกว่าค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้ ค่า ToF จะเป็นค่าเวลา ณ จุดที่แอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมีค่ามากกว่าค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้นั่นเอง ดังความสัมพันธ์

$$|w(t)| \geq \alpha \qquad (3\text{-}1)$$

เมื่อ

$|w(t)|$ คือ แอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ

α คือ ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน

สำหรับวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะแตกต่างจากวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดาเพียงเล็กน้อย กล่าวคือ มีการนำเอาจีนเนติกอัลกอริทึมมาช่วยค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า จีนเนติกอัลกอริทึมจะหาค่า

ระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้หาค่า ToF และคำนวณระยะทางที่วัดให้คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

3.3.3 การหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่า ToF ด้วยจีนเนติกอัลกอริทึม

การหาค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดด้วยจีนเนติกอัลกอริทึมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อาศัย Genetic Toolbox (Chipperfield, Fleming and Pohlheim, 1994) ของโปรแกรม MATLAB โดยโปรแกรมในการหาค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่า ToF มี 8 ขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวเป็นขั้นตอนการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึมที่แสดงไว้ในหัวข้อ 3.2.2 ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าเริ่มต้นของจีนเนติกอัลกอริทึม สำหรับค่าเริ่มต้นของจีนเนติกอัลกอริทึม ได้แก่

NIND คือ จำนวนประชากรเริ่มต้น

MAXGEN คือ จำนวนรอบการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึม

NVAR คือ จำนวนพารามิเตอร์ที่จะให้จีนเนติกอัลกอริทึมค้นหา

GGAP คือ ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์

P_c คือ ความน่าจะเป็นหรืออัตราในการทำครอสโอเวอร์

P_m คือ ความน่าจะเป็นหรืออัตราในการทำมิวเทชัน

การออกแบบโปรแกรมที่ใช้จีนเนติกอัลกอริทึม ควรจะทำการเลือก *NIND MAXGEN GGAP* P_c และ P_mให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของระบบ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองและเก็บข้อมูลเพื่อเลือกค่าดังกล่าวให้เหมาะสมกับการหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อใช้หาค่า ToF โดยรายละเอียดของวิธีการทดลองและผลการทดลองหาค่าเริ่มต้นดังกล่าวแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.4

ขั้นตอนที่ 2 สร้างประชากรเริ่มต้นให้กับจีนเนติกอัลกอริทึม คำสั่งของโปรแกรม MATLAB เป็นดังนี้

```
Chrom = crtbp(NIND,s_preci)
```

เมื่อ

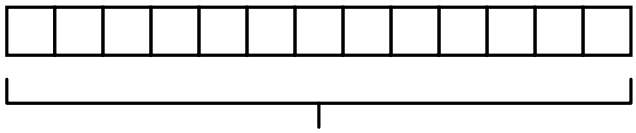
Chrom คือ กลุ่มของโครโมโซมเริ่มต้น ซึ่งมีลักษณะเป็นไบนารี (binary) ดังนั้นส่วนย่อยของโครโมโซมหรือยีนที่ได้จากคำสั่งนี้จะมีลักษณะเป็นบิต และจำนวนโครโมโซมที่ได้จะมีจำนวนเท่ากับ NIIND โครโมโซม

s_preci คือ ความยาวของโครโมโซมหรือเป็นจำนวนบิตของยีนนั่นเอง โดยในแต่ละโครโมโซมของประชากรเริ่มต้นจะมีความยาวของโครโมโซมเท่ากัน

ความยาวของโครโมโซมขึ้นอยู่กับจำนวนและความละเอียดของพารามิเตอร์ ซึ่งความละเอียดดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับลักษณะของพารามิเตอร์ว่าต้องการความละเอียดมากน้อยเพียงใด

พารามิเตอร์ที่ต้องการให้จีนเนติกอัลกอริทึมค้นหาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ ค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวจะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ที่เทียบกับค่าแอมพลิจูดที่มากที่สุด สาเหตุที่จะต้องทำเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าแอมพลิจูดที่มากที่สุด เพราะในการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์นั้น แอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางมากขึ้น และไม่สามารถคาดเดาได้ว่าจะลดลงเหลือเพียงใด ทำให้ไม่สามารถที่จะกำหนดค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เป็นค่าแอมพลิจูดที่จะใช้กับทุกระยะทางได้ ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องหามาตรฐานเพื่อกำหนดค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่สามารถใช้ได้กับทุกระยะทาง โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าแอมพลิจูดที่มีค่าสูงสุดของแต่ละระยะทาง กล่าวคือ 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 และ 30 เซนติเมตร

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดความละเอียดของค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนเท่ากับ 13 บิต ซึ่งมีความละเอียดเพียงพอสำหรับการค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยน โดยโครโมโซมแต่ละโครโมโซมของกลุ่มประชากรจะมีความยาวเท่ากับ 13 บิต ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ความยาวของโครโมโซม 1 โครโมโซม

ขั้นตอนที่ 3 การประเมินค่าโครโมโซมประชากรทั้งหมดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในขั้นตอนนี้โครโมโซมประชากรจะต้องถูกถอดรหัสให้อยู่ในรูปแบบฟีโนไทป์ (phenotype) ก่อนที่จะถูกประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เนื่องจากระบบไม่สามารถเข้าใจค่าโครโมโซมที่เป็นไบนารีได้ โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดรูปแบบฟีโนไทป์เป็นเลขฐานสิบ ซึ่งคำสั่งของโปรแกรม MATLAB ในการถอดรหัสจากไบนารีเป็นเลขฐานสิบเป็นดังนี้

Phen = bs2rv(Chroom,FieldD)

เมื่อ

Phen คือ รูปแบบฟีโนไทป์ก่อนที่จะถูกประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์

FieldD คือ รูปแบบของการกำหนดค่าในการถอดรหัสจากโครโมโซมที่เป็นไบนารีเป็นรูปแบบฟีโนไทป์ที่เป็นเลขฐานสิบ

การกำหนดรูปแบบของ FieldD จะมีโครงสร้างการกำหนดรูปแบบ ดังนี้

$$\text{FieldD} = \begin{bmatrix} \text{length} \\ \text{lower limit} \\ \text{upper limit} \\ \text{code} \\ \text{scale} \\ \text{lower bound} \\ \text{upper bound} \end{bmatrix} \tag{3-2}$$

ความสัมพันธ์ (3-2) เป็นการกำหนดโครงสร้างของ FieldD ในรูปแบบของเวกเตอร์ ซึ่งสมาชิกแต่ละตัวมีความหมายและการใช้งานดังนี้

- length เป็นโครงสร้างสำหรับกำหนดความยาวในแต่ละโครโมโซม โดยกำหนดจากจำนวนพารามิเตอร์และความละเอียดของพารามิเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้พารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหามีเพียงตัวเดียวและได้กำหนดความละเอียดไว้เท่ากับ 13 บิต

- lower limit คือ ขอบเขตของค่าต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ในแต่ละพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องค้นหา ซึ่ง lower limit ของระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ต้องการค้นหาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์จะกำหนดให้มีค่าเป็น 0

- upper limit คือ ขอบเขตของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ในแต่ละพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการค้นหา ซึ่ง upper limit ของระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ต้องการค้นหาในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ เปอร์เซ็นต์ของแอมพลิจูดจุดแรกเมื่อเทียบกับค่าแอมพลิจูดที่มีค่ามากที่สุด หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ นำเอาค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับที่เกิดขึ้นค่าแรกมาหาเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าแอมพลิจูดที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งค่านี้จะถูกกำหนดให้เป็น upper limit

- code เป็นโครงสร้างสำหรับเลือกการเข้ารหัส โดยในโปรแกรม MATLAB มีการเข้ารหัสอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ การเข้ารหัสแบบไบนารีมาตรฐาน (standard binary) และการเข้ารหัสแบบเกรย์ (Gray code) โดย code มีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับการเข้ารหัสแบบไบนารีมาตรฐาน และมีค่าเท่ากับหนึ่ง สำหรับการเข้ารหัสแบบเกรย์ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกการเข้ารหัสแบบไบนารีมาตรฐาน เนื่องจากเป็นวิธีการเข้ารหัสที่ง่ายและเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย

- scale เป็นโครงสร้างสำหรับเลือกเทคนิคการสเกลค่า ในช่วงระหว่างขอบเขตของค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้และขอบเขตของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ซึ่งในโปรแกรม MATLAB มีเทคนิคการสเกลอยู่สองแบบ คือ การสเกลเชิงเลขคณิต (arithmetic scaling) และ การสเกลเชิงลอการิทึม (logarithmic scaling) โดยค่า scale เป็นศูนย์สำหรับการสเกลเชิงเลขคณิต และมีค่าเป็นหนึ่งสำหรับการสเกลเชิงลอการิทึม ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้เทคนิคการสเกลเชิงเลขคณิต

- lower bound เป็นการกำหนดรูปแบบว่าจะพิจารณาค่าขอบเขตต่ำสุด (lower limit) ด้วยหรือไม่ ซึ่งค่า lower bound จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อไม่ต้องการพิจารณาค่าขอบเขตต่ำสุด และจะมีค่าเป็นหนึ่งเมื่อต้องการพิจารณาค่าขอบเขตต่ำสุด สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ไม่ต้องการพิจารณาค่าขอบเขตต่ำสุด เพราะหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ ซึ่งถ้ามีเป็นศูนย์แสดงว่ายังไม่มีสัญญาณสะท้อนกลับมายังตัวรับ ดังนั้นจึงไม่นำค่าขอบเขตต่ำสุดคือ ศูนย์ มาร่วมพิจารณา

- upper bound มีความหมายเช่นเดียวกับ lower bound แต่สำหรับ upper bound จะพิจารณาที่ค่าขอบเขตสูงสุดที่เป็นไปได้ (upper limit) แทน ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ไม่นำขอบเขตสูงสุดที่เป็นไปได้มาร่วมพิจารณา เนื่องจากจะต้องค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ได้ค่า ToF คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งไม่ใช่ค่าขอบเขตสูงสุด

ขั้นตอนที่ 4 ประเมินผลคำตอบของระบบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และคำนวณหาค่าความเหมาะสมส่งกลับไปยังจีนเนติกอัลกอริทึม เพื่อใช้คัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดสำหรับขยายพันธุ์เพื่อให้ได้ลูกหลานต่อไป ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีชื่อฟังก์ชันว่า objective_ultrasonic ซึ่งแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมฟังก์ชันวัตถุประสงค์แสดงได้ในรูปที่ 3.11 ส่วนโปรแกรม MATLAB การหาค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดที่ประกอบด้วยส่วนของจีนเนติกอัลกอริทึมและฟังก์ชันวัตถุประสงค์แสดงไว้ในภาคผนวก ค.

ระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่จีนเนติกอัลกอริทึมค้นหาได้จะต้องมีมากกว่า 0 อีกทั้งยังจะต้องมีค่าน้อยที่สุดที่จะสามารถตรวจจับได้เมื่อสัญญาณสะท้อนกลับมาถึง จากตัวอย่างในรูปที่ 3.12 จะเห็นว่า ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง ToF แอมพลิจูดของสัญญาณมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ โดยจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่ใช้งานจริง ซึ่งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ได้จากจีนเนติกอัลกอริทึมอาจจะเป็นค่าระดับแอมพลิจูดของสัญญาณในช่วง 0 ถึง ToF นี้ ดังนั้นจะต้องนำฟังก์ชันหน้าต่างมาคูณกับข้อมูล โดยฟังก์ชันหน้าต่างจะมีขนาดเท่ากับ 0 ในช่วงเวลา 0 ถึง ToF และมีขนาดเท่ากับ 1 ในช่วงเวลาตั้งแต่ ToF เป็นต้นไปดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.13 สัญญาณที่ได้เป็นผลลัพธ์ อาจนับว่าเป็นข้อจำกัดของวิธีตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3.11 แผนภูมิการทำงานของฟังก์ชัน objective_ultrasonic

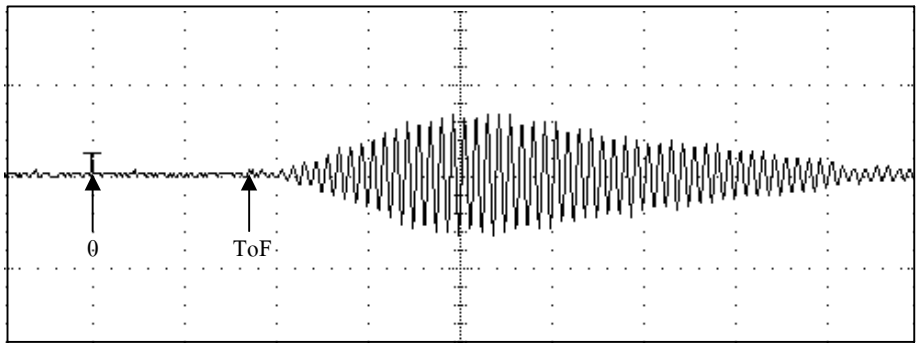
จากแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้างต้น ได้คำนวณค่าคลาดเคลื่อนระหว่างค่าระยะทางที่ได้จากการประมวลผลโปรแกรมฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าระยะทางที่วัดจริง ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้ เรียกว่า ค่าการประมาณ (objective value) ซึ่งจะส่งกลับไปยังจีนเนติกอัลกอริทึมเพื่อคำนวณค่าความเหมาะสม โดยการคำนวณค่าความเหมาะสมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการจัดอันดับ (ranking selection) สำหรับโปรแกรม MATLAB ในการคำนวณค่าความเหมาะสมเป็นดังนี้

FitnV = ranking(error)

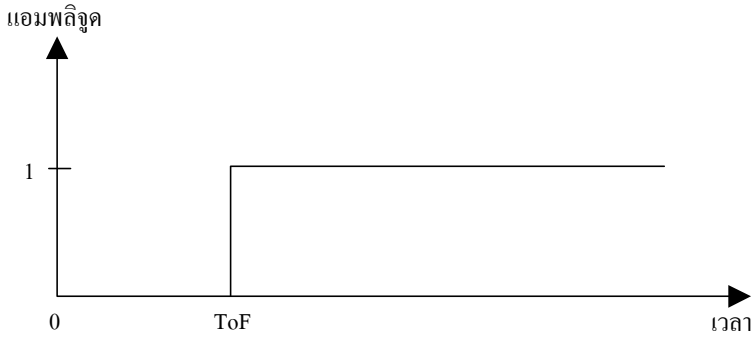
เมื่อ

FitnV คือ ค่าความเหมาะสมที่ได้จากวิธีการจัดอันดับ

error คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์



รูปที่ 3.12 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ



รูปที่ 3.13 ฟังก์ชันหน้าต่างที่นำมาคูณกับสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ

ขั้นตอนที่ 5 คัดเลือกโครโมโซมประชากรบางกลุ่มมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ โดยจะคัดเลือกจากค่าความเหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 สำหรับการคัดเลือกในโปรแกรม MATLAB นั้น มีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ท (roulette wheel sampling หรือ rws) และวิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล (stochastic universal sampling หรือ sus) สำหรับการคัดเลือกโครโมโซมประชากรในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีความเหมาะสมกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทางน้อยที่สุด โดยสามารถดูได้จากผลการทดสอบในหัวข้อที่ 3.4 ซึ่งคำสั่งของโปรแกรม MATLAB เป็นดังนี้

SelCh = select('sus', Chrom, FitnV, GGAP)

เมื่อ

SelCh คือ ต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ได้จากการคัดเลือกเพื่อเตรียมที่จะสร้างลูกหลานด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์ในขั้นตอนต่อไป

sus คือ เป็นการกำหนดการใช้วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล และจะใช้ชื่อว่า rws สำหรับวิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ท

Chrom คือ ประชากรเริ่มต้นที่ได้จากขั้นตอนที่ 2

FitnV คือ ค่าความเหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 4

GGAP คือ ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้น

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้น (GGAP) มีค่าเท่ากับ 0.8 เนื่องจากค่าดังกล่าวมีความเหมาะสมที่สุด เพราะให้ผลในการวัดระยะทางคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังผลทดสอบในหัวข้อที่ 3.4

ขั้นตอนที่ 6 สร้างลูกหลานจากต้นกำเนิดสายพันธุ์ด้วยวิธีปฏิบัติการทางสายพันธุ์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย คือ การทำครอสโอเวอร์และการทำมิวเทชัน โดยคำสั่ง MATLAB สำหรับการทำครอสโอเวอร์ เป็นดังนี้

SelCh1 = recombin('xovsp', SelCh, Pc)

เมื่อ

SelCh คือ โครโมโซมหลังจากการทำครอสโอเวอร์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์ SelCh

xovsp คือ การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว (single-point crossover)

Pc คือ ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกการทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด ซึ่งกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.9 โดยการทำครอสโอเวอร์และค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ดังกล่าวให้ผลการวัดระยะทางคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังผลทดสอบในหัวข้อที่ 3.4

หลังจากการทำครอสโอเวอร์ จะมีการทำมิวเทชันอีกกระบวนการหนึ่ง ซึ่งคำสั่งของโปรแกรม MATLAB เป็นดังนี้

SelCh2 = mut(SelCh1,Pm)

เมื่อ

SelCh2 คือ โครโมโซมลูกหลานที่ได้จากปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์

Pm คือ ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชัน

ความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีค่าเท่ากับ 0.01 ตามข้อแนะนำจากผลการวิจัยของ K.F.Man และคณะในปี ค.ศ. 1996

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลาน โดยใช้วิธีการเดียวกับขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 8 เป็นขั้นตอนการแทนที่โครโมโซมในประชากรเดิมด้วยลูกหลานที่ได้จากขั้นตอนที่ 6 ซึ่งจะมีประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอนของการแทนที่ โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสิน สำหรับคำสั่งในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในขั้นตอนนี้ คือ

[Chrom error] = reins(Chrom, SelCh2, 1, 1, error, error1)

เมื่อ

error คือ ค่าการประเมิน (objective value) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการคำนวณของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในขั้นตอนที่ 4

error1 คือ ค่าการประเมินซึ่งเป็นผลที่ได้จากการคำนวณของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในขั้นตอนที่ 7

เมื่อดำเนินการครบตามขั้นตอน 1-8 แล้วจะเริ่มต้นทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 2-8 ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้คำตอบซึ่งคือ ค่าระดับจุดเริ่มที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่า ToF คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้การวัดระยะทางแม่นยำมากที่สุด

3.4 ผลการทดสอบค่าตัวแปรของจีนเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB

จากขั้นตอนการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึมในหัวข้อที่ 3.3.3 จะต้องเลือกค่าพารามิเตอร์ของจีนเนติกให้เหมาะสมที่สุด สำหรับการค้นหาค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ผลการวัดระยะทางคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ ได้แก่ จำนวนประชากรเริ่มต้น วิธีการคัดเลือกชนิดของการทำครอสโอเวอร์ ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ และค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ ซึ่งผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์มีดังต่อไปนี้

3.4.1 การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสม

จำนวนประชากรเริ่มต้น (NIND) หรือโครโมโซมประชากรที่ทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีสี่ค่า กล่าวคือ NIND = 20 , 40, 60, 80 และ 90 โครโมโซมตามลำดับ ซึ่งจำนวนประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับทุกระยะทางทั้งขาไป[1]และขากลับ[2] คือ 80 โครโมโซม โดยค่าประชากรดังกล่าวให้ความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะทางน้อยที่สุด อีกทั้งยังมีจำนวนรอบการทำงานเร็วที่สุดด้วย ดังผลการทดสอบในตารางที่ 3.1-3.2

---

[1] ขาไป หมายถึง การวัดระยะทางเมื่อเลื่อนฉากออกจากชุดเซนเซอร์

[2] ขากลับ หมายถึง การวัดระยะทางเมื่อเลื่อนฉากกลับเข้าหาชุดเซนเซอร์

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขาไป

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	จำนวนประชากรเริ่มต้น (โครโมโซม)	Full-Scale-error (FSE) ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
6	20	0.624	3.8
	40	0.611	8.4
	60	0.611	7
	80	0.609	5
	90	0.610	9.6
9	20	0.349	12
	40	0.349	13
	60	0.347	8.2
	80	0.285	5.2
	90	0.348	8.4
12	20	0.304	38
	40	0.303	17.2
	60	0.303	13.2
	80	0.303	7.4
	90	0.303	10.4
15	20	0.137	14.8
	40	0.139	12.2
	60	0.139	16.2
	80	0.136	6.8
	90	0.137	13.4
18	20	0.074	27.8
	40	0.075	15.2
	60	0.074	12.2
	80	0.074	9.8
	90	0.074	15.6
21	20	2.477	31.8
	40	2.383	46.2
	60	2.363	26.4
	80	2.353	21.2
	90	2.475	15.8
24	20	0.862	35
	40	0.868	27.8
	60	0.876	30.6
	80	0.861	19.2
	90	0.864	32.6

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	จำนวนประชากรเริ่มต้น (โครโมโซม)	Full-Scale-error (FSE) ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
27	20	0.786	26.8
	40	0.783	16.6
	60	0.782	14.8
	80	0.781	10.6
	90	0.781	14.8
30	20	0.438	21.6
	40	0.434	17.2
	60	0.435	21.6
	80	0.434	15.4
	90	0.436	20.8

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขากลับ

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	จำนวนประชากรเริ่มต้น (โครโมโซม)	Full-Scale-error (FSE) ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
6	20	0.440	22.6
	40	0.423	8.2
	60	0.413	7.6
	80	0.409	5.4
	90	0.410	12.4
9	20	0.324	11
	40	0.313	10
	60	0.307	10.4
	80	0.304	7.2
	90	0.305	10.2
12	20	0.773	11
	40	0.774	13.4
	60	0.766	12.6
	80	0.766	9.8
	90	0.766	14.2
15	20	0.506	38.4
	40	0.504	14.4
	60	0.503	15
	80	0.503	7
	90	0.503	12.8

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	จำนวนประชากรเริ่มต้น (โครโมโซม)	Full-Scale-error (FSE) ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
18	20	0.170	38.2
	40	0.169	27.2
	60	0.169	13.2
	80	0.169	7.6
	90	0.169	11.6
21	20	0.267	42.6
	40	0.266	17.6
	60	0.266	9
	80	0.266	6.6
	90	0.266	13
24	20	0.242	47.4
	40	0.241	25.6
	60	0.241	15
	80	0.241	6.2
	90	0.241	11.6
27	20	0.214	34.4
	40	0.214	19.4
	60	0.214	15
	80	0.213	9.4
	90	0.214	14.6
30	20	0.939	29
	40	0.940	18.4
	60	0.938	10.6
	80	0.938	8.6
	90	0.938	11.2

3.4.2 การทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสม

วิธีการคัดเลือกที่ทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีสองวิธี กล่าวคือ วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล (sus) และวิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ท (rws) ซึ่งวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสมสำหรับทุกระยะทางทั้งขาไปและขากลับ คือ วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล โดยวิธีการคัดเลือกดังกล่าวให้ความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะทางน้อยกว่าวิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ท และมีจำนวนรอบในการทำงานเร็วกว่าด้วย แม้ว่าบางระยะทางจะให้ความคลาดเคลื่อนของทั้งสองวิธีเท่ากัน แต่วิธีวิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่ม

ครอบจักรวาล ก็ยังมีจำนวนรอบการทำงานที่เร็วกว่าวิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ท ดังผลทดสอบในตารางที่ 3.3 -3.4

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขาไป

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	วิธีการคัดเลือก	Full-Scale-error (FSE) ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
6	sus	0.609	8
	rws	0.616	12.6
9	sus	0.347	7
	rws	0.348	10.6
12	sus	0303	8.2
	rws	0.303	13
15	sus	0.137	5.8
	rws	0.139	18
18	sus	0.074	6.8
	rws	0.074	12.6
21	sus	2.340	17.8
	rws	2.354	29.8
24	sus	0.860	24.2
	rws	0.872	30.4
27	sus	0.780	11.4
	rws	0.783	17
30	sus	0.435	13.4
	rws	0.436	24.8

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขากลับ

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	วิธีการคัดเลือก	Full-Scale-error (FSE) ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
6	sus	0.410	11
	rws	0.411	11.4
9	sus	0.303	8.6
	rws	0.305	10.4
12	sus	0.766	7.6
	rws	0.766	13.2
15	sus	0.503	10.6
	rws	0.503	12.8
18	sus	0.169	9.6
	rws	0.169	18.8

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	วิธีการคัดเลือก	Full-Scale-error (FSE) ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
21	sus	0.266	7.6
	rws	0.266	14
24	sus	0.241	8.8
	rws	0.241	10.4
27	sus	0.213	7.8
	rws	0.214	11.4
30	sus	0.938	5.2
	rws	0.939	12

3.4.3 การทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม

ชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่ทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีทั้งหมดสี่ชนิด กล่าวคือ การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว (xovsp), การทำครอสโอเวอร์แบบสองจุด (xovdp), การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด (xovmp) และการทำครอสโอเวอร์แบบสลับที่ (xovsh) ซึ่งชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมสำหรับทุกระยะทางทั้งขาไปและขากลับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด โดยการทำครอสโอเวอร์ชนิดดังกล่าวให้ความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะทางน้อยที่สุด อีกทั้งยังมีจำนวนรอบในการทำงานเร็วที่สุดด้วย แม้ว่าบางระยะทางจะให้ความคลาดเคลื่อนของทั้งสี่ชนิดเท่ากัน แต่การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุดก็ยังมีจำนวนรอบการทำงานที่เร็วกว่าการทำครอสโอเวอร์ชนิดอื่น ดังผลทดสอบในตารางที่ 3.5-3.6

3.4.4 การทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม

ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้น (GGAP) ที่ทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีทั้งหมดห้าค่า กล่าวคือ GGAP = 0.5, GGAP = 0.6, GGAP = 0.7, GGAP = 0.8 และ GGAP = 0.9 ตามลำดับ ซึ่งร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับทุกระยะทางทั้งขาไปและขากลับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ GGAP = 0.8 โดยร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้นดังกล่าวให้ความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะทางน้อยที่สุด อีกทั้งยังมีจำนวนรอบในการทำงานเร็วที่สุดด้วย แม้ว่าบางระยะทางจะให้ความคลาดเคลื่อนของทั้งห้าค่าทดสอบเท่ากัน แต่ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้น GGAP = 0.8 ก็ยังมีจำนวนรอบการทำงานที่เร็วกว่าร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้นค่าอื่นๆ ดังผลทดสอบในตารางที่ 3.7-3.8

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขาไป

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	ชนิดของการทำครอสโอเวอร์	Full-Scale error (FSE) ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
6	xovsp	0.609	6.2
	xovdp	0.609	8.4
	xovmp	0.609	7.2
	xovsh	0.610	8
9	xovsp	0.347	16.4
	xovdp	0.347	8.4
	xovmp	0.347	7.4
	xovsh	0.347	11.6
12	xovsp	0.303	14.4
	xovdp	0.303	8.6
	xovmp	0.303	8.4
	xovsh	0.303	13.6
15	xovsp	0.143	13.6
	xovdp	0.139	10.6
	xovmp	0.137	7.4
	xovsh	0.137	8.8
18	xovsp	0.074	11.8
	xovdp	0.074	16.2
	xovmp	0.074	10
	xovsh	0.074	10.2
21	xovsp	2.314	67.6
	xovdp	2.359	50.2
	xovmp	2.345	33.4
	xovsh	2.351	47.8
24	xovsp	0.867	35
	xovdp	0.863	30.8
	xovmp	0.860	16
	xovsh	0.863	30.8
27	xovsp	0.784	19.2
	xovdp	0.783	16.8
	xovmp	0.781	8.8
	xovsh	0.782	20.6
30	xovsp	0.438	23.3
	xovdp	0.436	20.4
	xovmp	0.434	11.2
	xovsh	0.435	15.6

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขากลับ

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	ชนิดของการทำครอสโอเวอร์	Full-Scale error (FSE)ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
6	xovsp	0.417	16.4
	xovdp	0.414	10.2
	xovmp	0.410	5
	xovsh	0.413	8.4
9	xovsp	0.305	14.4
	xovdp	0.305	10.8
	xovmp	0.303	6.8
	xovsh	0.305	12
12	xovsp	0.766	13.6
	xovdp	0.766	9.4
	xovmp	0.766	5.4
	xovsh	0.766	5.8
15	xovsp	0.504	9.4
	xovdp	0.503	7
	xovmp	0.503	6.6
	xovsh	0.504	9.6
18	xovsp	0.169	13.8
	xovdp	0.169	6.6
	xovmp	0.169	4.8
	xovsh	0.169	7.8
21	xovsp	0.267	10.8
	xovdp	0.266	8.8
	xovmp	0.266	5.8
	xovsh	0.266	9.8
24	xovsp	0.241	12
	xovdp	0.241	10.8
	xovmp	0.241	6.6
	xovsh	0.241	7.6
27	xovsp	0.214	7.6
	xovdp	0.214	7.6
	xovmp	0.213	7
	xovsh	0.214	10.4
30	xovsp	0.939	27.4
	xovdp	0.939	11
	xovmp	0.938	5
	xovsh	0.938	11.4

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขาไป

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ (GGAP)	Full-Scale error (FSE) ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
6	0.5	0.611	9.6
	0.6	0.609	7.6
	0.7	0.608	7.4
	0.8	0.608	4.3
	0.9	0.608	6.2
9	0.5	0.349	13.4
	0.6	0.348	14.4
	0.7	0.348	12.6
	0.8	0.347	8.8
	0.9	0.348	13.4
12	0.5	0.303	15.8
	0.6	0.303	15.6
	0.7	0.303	11.2
	0.8	0.303	9
	0.9	0.303	11.2
15	0.5	0.138	21
	0.6	0.138	11
	0.7	0.137	12
	0.8	0.137	8.4
	0.9	0.138	11
18	0.5	0.075	21.6
	0.6	0.075	17.4
	0.7	0.074	9.4
	0.8	0.074	6.2
	0.9	0.074	20.2
21	0.5	2.451	48.8
	0.6	2.359	42.8
	0.7	2.363	38.6
	0.8	2.343	30.2
	0.9	0.247	40.8
24	0.5	0.863	38.2
	0.6	0.863	44.4
	0.7	0.868	35.6
	0.8	0.862	30.2
	0.9	0.863	39.2

ตารางที่ 3.7 (ต่อ)

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ (GGAP)	Full-Scale error (FSE) ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
27	0.5	0.786	20.6
	0.6	0.783	12
	0.7	0.784	19
	0.8	0.781	8.6
	0.9	0.784	14.6
30	0.5	0.437	17.4
	0.6	0.435	17.4
	0.7	0.436	12.8
	0.8	0.435	7.4
	0.9	0.440	11.4

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขากลับ

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ (GGAP)	Full-Scale error (FSE) ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
6	0.5	0.410	13.6
	0.6	0.411	11
	0.7	0.412	9.6
	0.8	0.410	6.8
	0.9	0.411	13.8
9	0.5	0.307	11.2
	0.6	0.314	16.2
	0.7	0.308	19.6
	0.8	0.304	8.8
	0.9	0.308	9.4
12	0.5	0.766	23.4
	0.6	0.766	15.4
	0.7	0.766	15.2
	0.8	0.766	5.8
	0.9	0.766	6.2
15	0.5	0.504	15.4
	0.6	0.504	11.6
	0.7	0.503	16.8
	0.8	0.503	5.4
	0.9	0.503	10.4

ตารางที่ 3.8 (ต่อ)

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ (GGAP)	Full-Scale error (FSE) ที่น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
18	0.5	0.169	19.4
	0.6	0.169	12.4
	0.7	0.169	13
	0.8	0.169	5.8
	0.9	0.170	11
21	0.5	0.266	27.2
	0.6	0.266	17.8
	0.7	0.266	15.6
	0.8	0.266	6
	0.9	0.267	10.2
24	0.5	0.242	14.2
	0.6	0.241	12.6
	0.7	0.242	10.2
	0.8	0.241	6.2
	0.9	0.242	10.2
27	0.5	0.214	14.6
	0.6	0.214	9.8
	0.7	0.213	10
	0.8	0.213	7.2
	0.9	0.214	14.8
30	0.5	0.939	11.4
	0.6	0.938	20.8
	0.7	0.938	7.8
	0.8	0.938	7
	0.9	0.938	10.2

3.4.5 การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม

ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่ทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีทั้งหมดสี่ค่า กล่าวคือ 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 ตามลำดับ ซึ่งค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมสำหรับทุกระยะทางทั้งขาไปและขากลับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ 0.9 โดยค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ดังกล่าวให้ความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะทางน้อยที่สุด อีกทั้งยังมีจำนวนรอบในการทำงานเร็วที่สุดด้วย แม้ว่าบางระยะทางจะให้ความคลาดเคลื่อนของทั้งสี่ค่าทดสอบเท่ากัน แต่ค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.9 ก็ยังมีจำนวนรอบการทำงานที่เร็วกว่าค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ค่าอื่นๆ ดังผลทดสอบในตารางที่ 3.9-3.10

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขาไป

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	ค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์	Full-Scale error (FSE) น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
6	0.6	0.611	10.6
	0.7	0.614	10.8
	0.8	0.613	9.8
	0.9	0.608	4.8
9	0.6	0.349	12.2
	0.7	0.348	10.6
	0.8	0.347	10.2
	0.9	0.347	6.4
12	0.6	0.303	15.8
	0.7	0.303	11.8
	0.8	0.303	11
	0.9	0.303	8.2
15	0.6	0.138	17
	0.7	0.137	10
	0.8	0.136	14.2
	0.9	0.136	10.6
18	0.6	0.074	19.6
	0.7	0.074	18.6
	0.8	0.074	11.8
	0.9	0.074	8
21	0.6	2.367	46.6
	0.7	2.360	41
	0.8	2.353	43.4
	0.9	2.335	35
24	0.6	0.865	35.4
	0.7	0.862	27
	0.8	0.862	24.4
	0.9	0.860	12.4
27	0.6	0.784	14
	0.7	0.785	22.2
	0.8	0.784	15.2
	0.9	0.781	7
30	0.6	0.438	14.4
	0.7	0.438	13
	0.8	0.436	10.6
	0.9	0.435	7.6

ตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสมที่สุดของการวัดระยะทางขากลับ

ระยะทางที่ทดสอบ (เซนติเมตร)	ค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์	Full-Scale error (FSE) น้อยที่สุด (%)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)
6	0.6	0.413	12
	0.7	0.410	14.8
	0.8	0.414	9.8
	0.9	0.409	8.8
9	0.6	0.311	17.6
	0.7	0.304	14.6
	0.8	0.309	15.4
	0.9	0.305	10.2
12	0.6	0.766	10.6
	0.7	0.766	11.2
	0.8	0.766	8.4
	0.9	0.766	7.4
15	0.6	0.503	7.4
	0.7	0.504	12.6
	0.8	0.503	8.4
	0.9	0.503	6.8
18	0.6	0.169	11.4
	0.7	0.169	9.2
	0.8	0.169	7.6
	0.9	0.169	6.8
21	0.6	0.267	15.2
	0.7	0.267	10.8
	0.8	0.267	8
	0.9	0.266	7.4
24	0.6	0.242	10.8
	0.7	0.241	17
	0.8	0.241	10
	0.9	0.241	7.6
27	0.6	0.214	11.4
	0.7	0.214	16.6
	0.8	0.213	13
	0.9	0.213	8
30	0.6	0.938	12.8
	0.7	0.938	10.8
	0.8	0.938	8.6
	0.9	0.938	6

ค่าตัวแปรต่างๆ และค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดให้จีนเนติกอัลกอริทึมในการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สามารถสรุปได้ดังตาราง 3.11

ตารางที่ 3.11 ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ของจีนเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB

ตัวแปรและพารามิเตอร์ของ จีนเนติกอัลกอริทึม	ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ของ จีนเนติกอัลกอริทึม
จำนวนประชากรเริ่มต้น (NIND)	80 โครโมโซม
จำนวนรอบสูงสุดในการทำงานของ จีนเนติกอัลกอริทึม (MAXGEN)	1000 รอบ
จำนวนพารามิเตอร์ที่ค้นหา (NVAR)	1 พารามิเตอร์
วิธีการคัดเลือกสายพันธุ์	วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่ม ครอบจักรวาล
ชนิดของการทำครอสโอเวอร์	การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด
ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ (GGAP)	0.8
ค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ (P_C)	0.9
ค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชัน (P_m)	0.01

ในการค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดด้วยค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ของจีนเนติกอัลกอริทึมดังตารางที่ 3.11 นั้น ได้มีการสังเกตแนวโน้มของค่าที่ได้ตลอดเวลา ซึ่งพบว่าเมื่อจำนวนรอบการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึม ประมาณ 500 รอบขึ้นไป ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จะเริ่มคงที่ ซึ่งหมายความว่าได้คำตอบที่ดีที่สุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ได้ค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการหาค่า ToF เพื่อหาค่าระยะทางที่คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้น จึงได้กำหนดให้จำนวนรอบสูงสุดในการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึมสำหรับค้นหาค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดไว้ที่ 1000 รอบ โดยผลของการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยวิธีการตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดและค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดจะกล่าวต่อไปในบทที่ 6

3.5 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทที่ 3 นี้ ได้นำเสนอหลักการของจีนเนติกอัลกอริทึม การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดในการนำเอาจีนเนติกอัลกอริทึมมาช่วยค้นหาค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ค่า ToF และระยะทางในการวัดมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และในหัวข้อสุดท้ายได้กล่าวถึงผลทดสอบในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของจีนเนติกอัลกอริทึม ซึ่งจะนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวของจีนเนติกจะนำช่วยไปหาค่า ToF และระยะทางในการวัด โดยพบว่าจีนเนติกอัลกอริทึมสามารถค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด อีกทั้งยังสามารถค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนได้เองโดยอัตโนมัติ ซึ่งผู้ใช้ไม่จำเป็นจะต้องคอยสังเกตค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนแล้วกำหนดเองเหมือนดังวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดาทั่วไป ซึ่งผลของการวัดระยะทางจะแสดงในบทที่ 6

บทที่ 4
วิธีการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ต

4.1 บทนำ

จากข้อจำกัดของวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุดดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ว่า แอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมาในช่วงเวลาตั้งแต่ส่งคลื่นออกไปจนกระทั่งปรากฏคลื่นสะท้อนกลับมายังตัวรับเป็นครั้งแรกจะต้องมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งในการใช้งานจริงมีสัญญาณแอมพลิจูดต่ำๆ ปรากฏขึ้นในช่วงเวลานี้ อีกทั้งถ้าหากสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย การหาค่า ToF และระยะทางจากวิธีตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุดก็อาจไม่แม่นยำ ดังนั้น จะต้องหาวิธีใหม่ที่จะนำมาวิเคราะห์สัญญาณสะท้อนกลับมายังตัวรับสำหรับหาค่า ToF เพื่อคำนวณระยะทางให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งวิธีวิเคราะห์เชิงทางเวลา-ความถี่ (time-frequency analysis) เป็นทางเลือกหนึ่งในกระบวนวิธีการประมวลผลสัญญาณ โดยสามารถแก้ข้อจำกัดดังกล่าวได้และยังมีข้อดีคือ สามารถวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ได้ในขณะเดียวกัน วิธีการวิเคราะห์เชิงทางเวลา-ความถี่สำหรับวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอไว้สองวิธีเพื่อเปรียบเทียบผล คือ การแปลงเวฟเล็ต และการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ (Choi-Williams distribution)

ดังนั้น ในบทนี้จะกล่าวรายละเอียดเกี่ยวกับการแปลงเวฟเล็ต ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาของการแปลงเวฟเล็ต ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง พร้อมด้วยการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตในหัวข้อสุดท้าย ส่วนรายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์จะกล่าวในบทที่ 5 ต่อไป

4.2 ความเป็นมาของการแปลงเวฟเล็ต

ในปี พ.ศ. 2545 สราวุฒิ สุจิตจร ได้ให้ความหมายของการแปลงไว้ว่า “การแปลง (transform) หมายถึง การใช้คณิตศาสตร์ประยุกต์บางประเภทเข้าดำเนินการกับชุดข้อมูลที่เราบันทึกไว้ได้ ข้อมูลที่บันทึกนั้นผันแปรไปตามเวลาโดยมีข้อมูลเชิงความถี่ซ่อนอยู่ เมื่อดำเนินการเสร็จแล้วข้อมูลเชิงความถี่จะปรากฏออกมาอย่างเด่นชัด ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ การดำเนินการเช่นนี้ เรา

เรียกว่า การแปลงจากโดเมนเวลา (time domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (frequency domain)" ซึ่งข้อมูลดังกล่าวนั้นคือ สัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ นั่นเอง

เทคนิคการแปลงสำหรับสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงคงที่ (stationary signal) จะนิยมใช้การแปลงฟูริเยร์ (fourier transform: FT) ซึ่งมีสมการการแปลงดังนี้

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t}dt \tag{4-1}$$

เมื่อ

s(t) คือ สัญญาณใดๆ

F(ω) คือ การแปลงฟูริเยร์ของสัญญาณ s(t)

จะเห็นได้ว่าข้อจำกัดของการแปลงฟูริเยร์ คือ ไม่สามารถที่จะเลือกวิเคราะห์สัญญาณที่เวลาใดเวลาหนึ่งได้ หรือเฉพาะความถี่ใดความถี่หนึ่งได้ อีกทั้งยังไม่สามารถวิเคราะห์สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่ (non-stationary signal) ได้

ในปี ค.ศ. 1964 Gabor (Shie and Dapang, 1996) ได้นำเสนอการแปลงกาบอร์ (Gabor transform หรือ GT) ขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดของการแปลงฟูริเยร์ ซึ่ง GT สามารถเลือกวิเคราะห์สัญญาณเฉพาะช่วงเวลาและช่วงความถี่ที่ต้องการได้ โดยกำหนดผ่านฟังก์ชันหน้าต่าง (window function) ที่เป็นฟังก์ชันแบบเกาส์ (Gaussian function) ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันหน้าต่างแบบเกาส์ และ GT $((G_{\beta}^{\alpha}f)(\omega))$ เป็นดังนี้

$$h_{\alpha}(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha}}e^{\frac{-t^2}{4\alpha}} \tag{4-2}$$

$$(G_{\beta}^{\alpha}f)(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\,h_{\alpha}(t-\beta)e^{-j\omega t}dt \tag{4-3}$$

เมื่อ

f(t) คือ สัญญาณใดๆ

$h_{\alpha}(t)$ คือ ฟังก์ชันหน้าต่างแบบเกาส์

GT สามารถกำหนดตำแหน่งเวลาและเลือกช่วงความถี่ในการวิเคราะห์สัญญาณด้วยพารามิเตอร์ β และ α ตามลำดับ ต่อมาได้มีการพัฒนาการแปลงฟูริเยร์ในช่วงเวลาสั้น (short-time

fourier transform: STFT) ซึ่งมีความอ่อนตัวในการใช้งานมากกว่า GT เนื่องจากสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันหน้าต่างหลากหลายชนิดตามความเหมาะสมกับสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์และให้ผลดี ทำให้สามารถวิเคราะห์สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่ได้ ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของ STFT เป็นดังนี้ (Shie and Dapang, 1996)

$$STFT(t,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)\gamma^{*}(\tau - t)e^{-j\omega\tau}d\tau \qquad (4\text{-}4)$$

เมื่อ

$f(\tau)$ คือ สัญญาณใดๆ

$*$ คือ สังยุคเชิงซ้อน

$\gamma(t)$ คือ ฟังก์ชันหน้าต่าง

จากสมการที่ (4-3) และ (4-4) จะเห็นว่า การวิเคราะห์สัญญาณด้วย GT และ STFT จะนำฟังก์ชันหน้าต่างที่ถูกเลื่อนตำแหน่งด้วยพารามิเตอร์ τ มาคูณกับสัญญาณเพื่อจะแบ่งการวิเคราะห์สัญญาณออกเป็นช่วงๆ โดยพารามิเตอร์ ω ในสมการที่ (4-3) และ (4-4) เป็นความถี่เหมือนกับในการแปลงฟูริเยร์ในสมการที่ (4-1) (Rioul and Vetterli, 1991) การวิเคราะห์ของ STFT นั้นจะสามารถกำหนดตำแหน่งเวลาในการวิเคราะห์สัญญาณด้วยพารามิเตอร์ τ

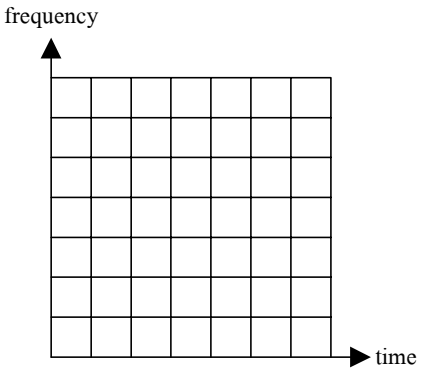
การวิเคราะห์สัญญาณด้วย GT และ STFT จะมีช่วงเวลาและช่วงความถี่ในการวิเคราะห์คงที่ดังรูปที่ 4.1 แต่ในทางปฏิบัติการวิเคราะห์สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็วหรือสัญญาณที่มีความถี่สูงจำเป็นจะต้องใช้ฟังก์ชันหน้าต่างที่มีช่วงแคบๆ ในทางกลับกันถ้าต้องการวิเคราะห์สัญญาณความถี่ต่ำๆ จำเป็นจะต้องเลือกใช้ฟังก์ชันหน้าต่างที่มีช่วงกว้างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธี STFT ยังมีข้อจำกัดในการเลือกฟังก์ชันหน้าต่างให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ข้อมูลทางความถี่ของสัญญาณอยู่ เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวของ STFT จึงได้มีการพัฒนาการแปลงเวฟเล็ต เพื่อให้สามารถเลื่อนตำแหน่งและปรับเปลี่ยนช่วงเวลาให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่จะวิเคราะห์ได้ โดยการแปลงเวฟเล็ตนั้นก็จะนำฟังก์ชันหน้าต่างมาคูณกับสัญญาณดังเช่นวิธี STFT แต่จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือ ฟังก์ชันหน้าต่างของเวฟเล็ตจะสามารถเลื่อนและปรับช่วงเวลาได้ ซึ่งฟังก์ชันหน้าต่างนี้เรียกว่า ฟังก์ชันเวฟเล็ต (wavelet function) หรืออาจเรียกว่า เวฟเล็ตแม่ (mother wavelet) โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้ (Rioul and Vetterli, 1991)

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}}\int_{-\infty}^{\infty}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad , \quad a \neq 0 \qquad (4\text{-}5)$$

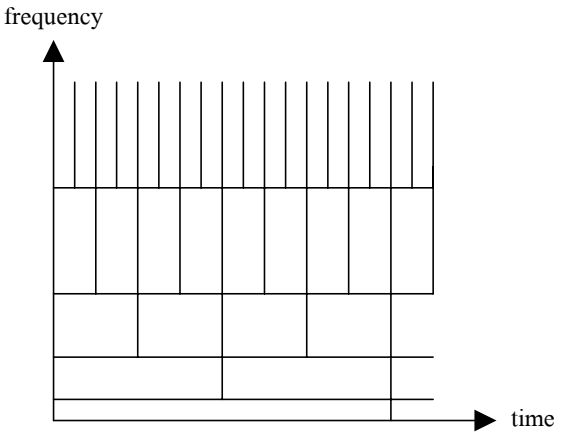
เมื่อ

$\psi(t)$ คือ เวฟเล็ตแม่

เวฟเล็ตแม่ที่ถูกสเกล (เปลี่ยนความถี่) ด้วยพารามิเตอร์ a และถูกเลื่อนตำแหน่ง (เปลี่ยนช่วงเวลา) ด้วยพารามิเตอร์ b ซึ่งช่วงเวลาและช่วงความถี่ในการวิเคราะห์เป็นดังรูปที่ 4.2 โดยจะเห็นว่าช่วงเวลาในการวิเคราะห์ของเวฟเล็ตจะมีความสัมพันธ์กับความถี่ กล่าวคือ การวิเคราะห์สัญญาณที่มีความถี่สูงจะใช้ช่วงเวลาในการวิเคราะห์น้อย และในทางกลับกัน การวิเคราะห์สัญญาณที่ความถี่ต่ำจะใช้ช่วงเวลาในการวิเคราะห์มาก ซึ่งเหมาะสำหรับวิเคราะห์สัญญาณในทางปฏิบัติที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่ นอกจากนี้การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตยังมีความอ่อนตัว เนื่องจากมีเวฟเล็ตแม่หลายแบบที่สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับสัญญาณที่จะนำมาวิเคราะห์ได้อย่างหลากหลาย



รูปที่ 4.1 ระนาบเวลาและความถี่แบบคงที่



รูปที่ 4.2 ระนาบเวลาและความถี่ของการแปลงเวฟเล็ต

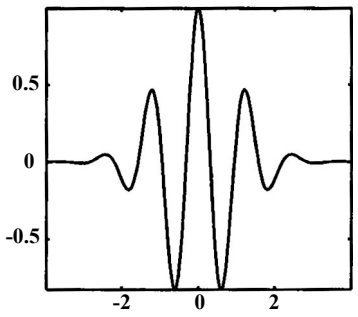
4.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต

การแปลงเวฟเล็ตเป็นคณิตศาสตร์แบบใหม่ที่สามารถวิเคราะห์สัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Sheng, 1996) ซึ่งสัญญาณดังกล่าว ได้แก่ สัญญาณเสียง สัญญาณเรดาร์ สัญญาณโซนาร์ สัญญาณเกิดจากแผ่นดินไหว เป็นต้น นอกจากนี้การแปลงเวฟเล็ตยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนประมวลผลภาพ (image processing) อย่างเช่น การบีบอัดภาพ (image compression) การกำจัดสัญญาณรบกวนในภาพ (image denoising) การปรับปรุงภาพ (image enhancement) นอกจากนี้ยังใช้กับการรู้จำแบบรูป (pattern recognition) รวมไปถึงการจำแนกเสียง (speech recognition) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะและทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต

4.3.1 ลักษณะของเวฟเล็ต

เวฟเล็ตประกอบขึ้นด้วยสัญญาณเฉพาะที่มีลักษณะเป็นคลื่นเล็กๆ โดยลักษณะของเวฟเล็ตจะเป็นคลื่นที่มีการสั่นไหวต่อเนื่อง (oscillatory) และขนาดของคลื่นจะลดลงสู่ศูนย์กลางอย่างรวดเร็วทั้งสองด้าน (ณัฐนันท์ ทัดพิทักษ์กุล, 2545) ดังรูปที่ 4.3

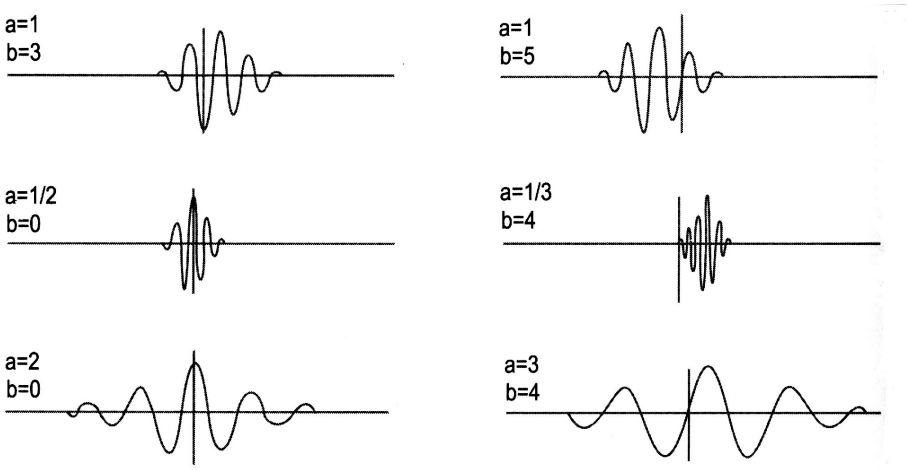
การอธิบายสัญญาณใดๆด้วยเวฟเล็ตนั้น สามารถทำได้โดยการนำเวฟเล็ตหลายๆอันมาประกอบกันเป็นกลุ่มหรือเซ็ต ซึ่งเวฟเล็ตแต่ละตัวในเซ็ตเกิดจากการสเกลและเลื่อนตำแหน่งเวฟเล็ตต้นกำเนิดหรือที่เรียกว่า เวฟเล็ตแม่ ซึ่งการสเกล คือ การบีบเข้า (compressing) หรือ การขยายออก (dilation) โดยใช้พารามิเตอร์ a ส่วนการเลื่อนตำแหน่งนั้นจะใช้พารามิเตอร์ b ดังความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4-3) ดังนั้นจะเห็นว่าเวฟเล็ตย่อยแต่ละตัวนั้นจะมีโครงสร้างมาจากเวฟเล็ตแม่เดียวกัน อีกทั้งเวฟเล็ตย่อยที่เกิดขึ้นจะต้องถูกนอร์แมลไลซ์ (normalize) ด้วยค่า $\sqrt{|a|}$ เสมอ เพื่อให้เวฟเล็ตที่ถูกสเกลและเลื่อนเวลาไป ยังคงมีพลังงานเช่นเดียวกับเวฟเล็ตแม่



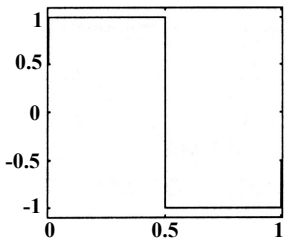
รูปที่ 4.3 ลักษณะของเวฟเล็ต

4.3.2 ทฤษฎีพื้นฐานในการสเกลและการเลื่อนตำแหน่ง

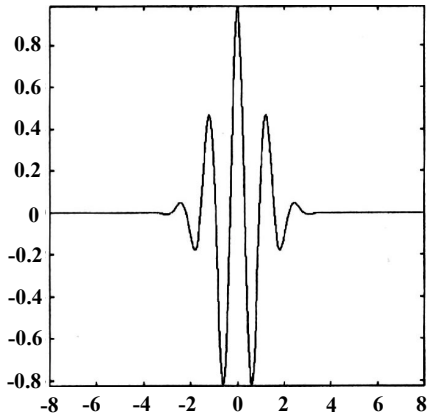
การวิเคราะห์หรือการอธิบายสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งด้วยการแปลงเวฟเล็ตเปรียบเสมือนกับการแตกหรือแยกสัญญาณนั้นออกเป็นส่วนประกอบเล็กๆ โดยส่วนประกอบดังกล่าวจะอยู่ในรูปของการสเกลและเลื่อนตำแหน่งเวฟเล็ตแม่ ซึ่งส่วนประกอบย่อยๆแต่ละตัว จะมีค่าถ่วงน้ำหนักต่างๆกันไป ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า คลื่นเวฟเล็ตเป็นฟังก์ชันพื้นฐาน (basis function) ในการสร้างสัญญาณใดๆโดยขบวนการแตกหรือแยกส่วนประกอบจะเรียกว่า การแยกองค์ประกอบด้วยเวฟเล็ต (wavelet decomposition) ซึ่งก็คือ การแปลงเวฟเล็ตนั่นเอง ในทางตรงกันข้าม การสร้างกลับสัญญาณใดๆ ด้วยองค์ประกอบย่อยของเวฟเล็ต (wavelet reconstruction) หรือเรียกว่า การแปลงกลับเวฟเล็ต (inverse wavelet transform: IWT) สำหรับเวฟเล็ตแม่ของการแปลงเวฟเล็ตนั้นมีให้เลือกใช้อยู่หลายตระกูลดังรูปที่ 4.5 ซึ่งทำให้การแปลงเวฟเล็ตมีความอ่อนตัวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลายๆ ประเภทดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



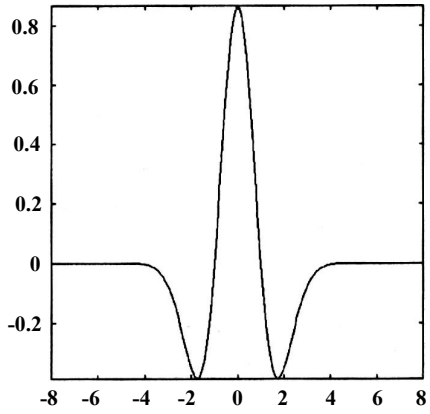
รูปที่ 4.4 ลักษณะของเวฟเล็ตแม่ที่ถูกสเกลและเลื่อนตำแหน่งไป



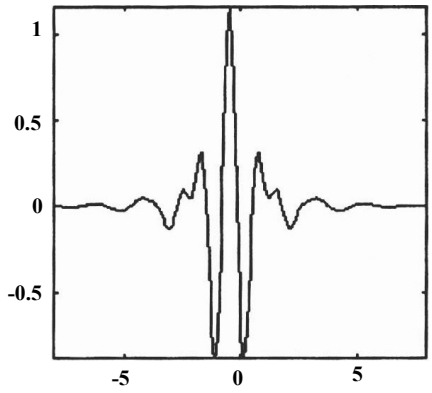
รูปที่ 4.5 ก) ตระกูลฮาร์ (Haar)



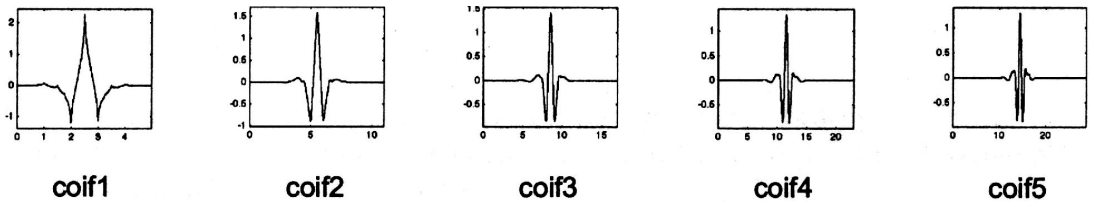
รูปที่ 4.5 ข) ตระกูลมอร์เล็ต (Morlet)



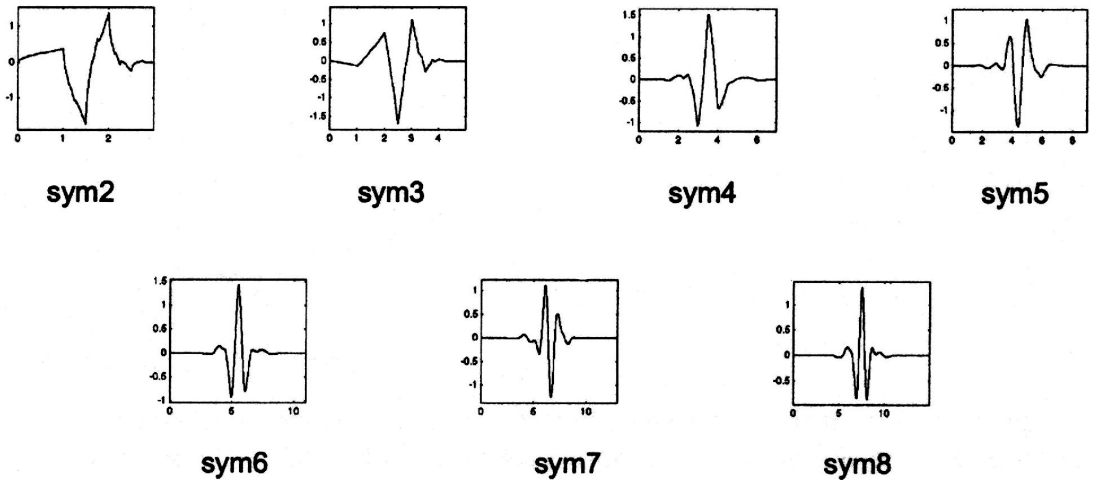
รูปที่ 4.5 ค) ตระกูลแมกซิกันแฮท (Mexican hat)



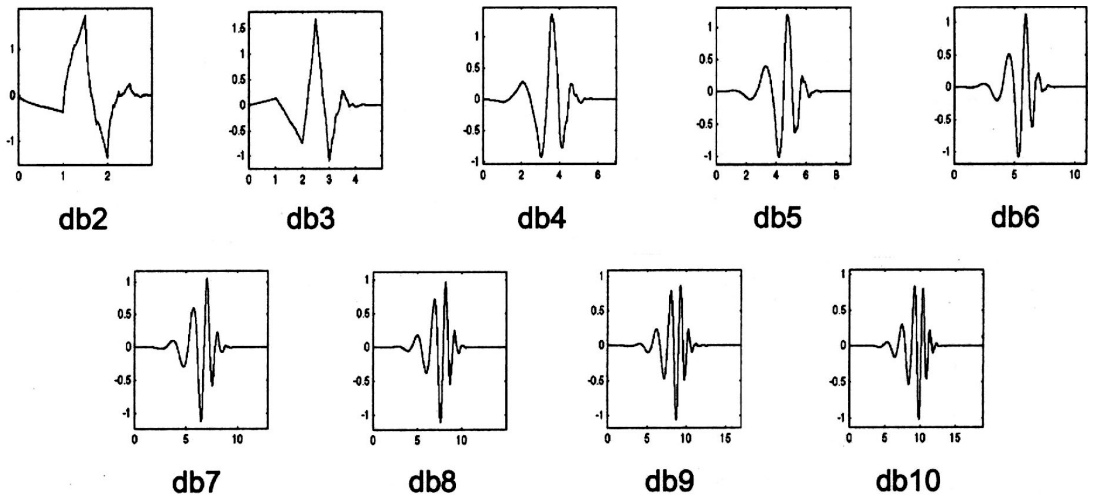
รูปที่ 4.5 ง) ตระกูลเมเยอร์ (Meyer)



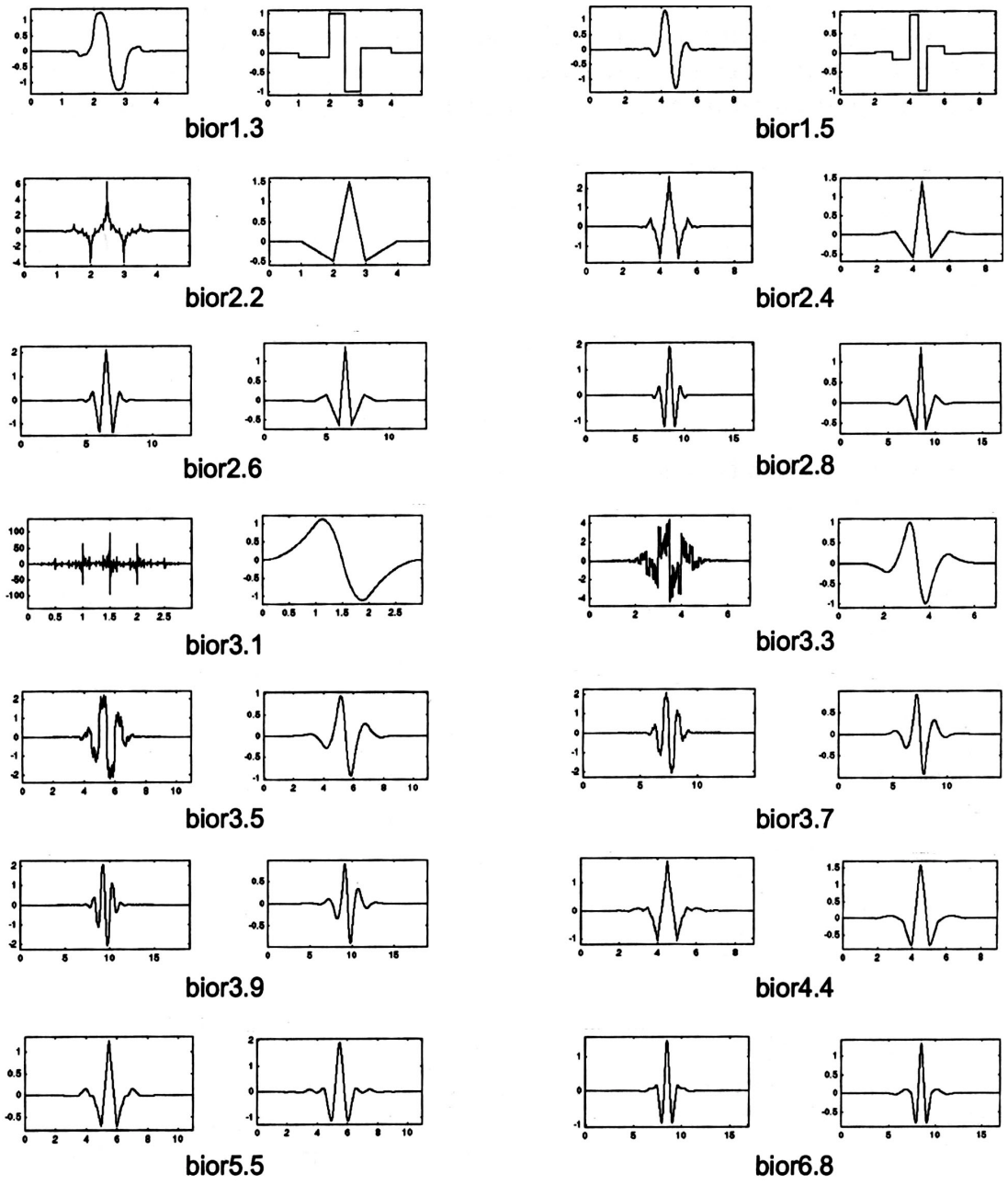
รูปที่ 4.5 จ) ตระกูลคอยเฟล็ต (Coiflet)



รูปที่ 4.5 ฉ) ตระกูลซิมเล็ตส์ (Symlets)



รูปที่ 4.5 ช) ตระกูลดาบีชี่ส์ (Daubechies)



รูปที่ 4.5 ซ) ตระกูลไบออร์ทอกอนอล (Biorthogonal)

รูปที่ 4.5 ตระกูลต่างๆ ของเวฟเล็ตแม่ (Michel, Yves, Georges and Jean, 1996)

4.4 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง

การแปลงเวฟเล็ตแบ่งออกเป็นสองชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่ การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (continuous wavelet tranform) และการแปลงเวฟเล็ตแบบดีสครีต (discrete wavelet tranform) สำหรับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง เนื่องจากการแปลงเวฟเล็ตชนิดดังกล่าวสามารถที่จะวิเคราะห์สัญญาณได้ในทุกๆ สเกล โดยเริ่มสเกลสัญญาณต้นแบบด้วยค่าสเกลต่ำๆ ไปเรื่อยๆ จนถึงการสเกลสัญญาณดังกล่าวด้วยค่าสเกลที่มีค่าสูงๆ ซึ่งค่าสเกลสูงสุดจะมีค่ามากเพียงใดขึ้นอยู่กับความละเอียดของการวิเคราะห์ (Michel, Yves, Georges and Jean-Michel, 1996) ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวเพียงรายละเอียดของการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องเท่านั้น

4.4.1 การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง

การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง (CWT) เป็นการสหสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างสัญญาณใดๆ กับเวฟเล็ตแม่ที่ถูกสเกลและเลื่อนเวลาไป ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้ (Shie and Dapang, 1996)

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\psi^{*}\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \qquad a \neq 0 \qquad (4\text{-}6)$$

เมื่อ

s(t) คือ สัญญาณใดๆ

$\psi^{*}(t)$ คือ สังยุคเชิงซ้อน (complex conjugate) ของเวฟเล็ตแม่

โดยเวฟเล็ตแม่จะต้องมีค่าคงที่ C_{ψ} ซึ่งมีนิยามดังสมการที่ (4-7) เป็นไปตามเงื่อนไขที่ยอมรับได้ (admissibility condition) ดังสมการที่ (4-8) กล่าวคือ

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\overline{\psi}(\omega)|^{2}}{|\omega|} d\omega \qquad (4\text{-}7)$$

และ $C_{\psi} < \infty$ (4-8)

เมื่อ

$\overline{\psi}(\omega)$ คือ การแปลงฟูริเยร์ของเวฟเล็ตแม่

และความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4-8) นี้ มีเงื่อนไขอยู่ว่า การแปลงฟูริเยร์ของเวฟเล็ตแม่ที่ความถี่ศูนย์จะต้องมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\overline{\psi}(0) = 0 \tag{4-9}$$

จากความสัมพันธ์ที่ (4-8) และ(4-9) สามารถกล่าวได้ว่า เวฟเล็ตแม่เปรียบเสมือนเป็นวงจรกรองผ่านความถี่ (band-pass filter) ในโดเมนฟูริเยร์ (Sheng, 1996) จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.3.1ว่า ในโดเมนเวลาเวฟเล็ตจะมีขนาดลดลงสู่ศูนย์กลางอย่างรวดเร็วทั้งสองด้านซึ่งคล้ายกับคลื่น ดังนั้น พื้นที่ใต้กราฟของเวฟเล็ตในโดเมนเวลาจะมีค่าเป็นศูนย์ หรือ เรียกว่า zero-mean value ดังนี้

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t)dt = 0 \tag{4-10}$$

และสามารถแปลงกลับเวฟเล็ตได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$s(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} CWT(a,b)\, \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da\, db \tag{4-11}$$

4.4.2 คุณสมบัติของการแปลงเวฟเล็ต

Aydin และ Markus กล่าวในปี ค.ศ 2001 ว่า การแปลงเวฟเล็ตเป็นการแปลงแบบเชิงเส้น (linear transformation) ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

- *การบวก*

$$W_{f1+f2}(a,b) = W_{f1}(a,b) + W_{f2}(a,b) \tag{4-12}$$

- *การเลื่อนทางเวลา (translation)*

$$W_{f(t-t_0)}(a,b) = W_{f(t)}(a,b-t_0) \tag{4-13}$$

- *การสเกลซ้ำ (rescale)*

$$W_{\alpha^{0.5} f(\alpha t)}(a,b) = W_{f(t)}(\alpha a, \alpha b) \tag{4-14}$$

เมื่อ

f(t) คือ ฟังก์ชันหรือสัญญาณใดๆ ที่มีการแปลงเวฟเล็ตเป็น $W_{f(t)}$

ในปี ค.ศ. 1996 Michel, Yves, Georges and Jean-Michel ได้ กล่าวไว้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างสเกลเวฟเล็ตและความถี่นั้นคล้ายกับการวิเคราะห์เวฟเล็ต กล่าวคือ

- เมื่อค่าสเกลต่ำ เวฟเล็ตจะถูกบีบอัด (compressed wavelet) โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว หรือคือ สัญญาณความถี่สูงนั่นเอง

- เมื่อค่าสเกลสูง เวฟเล็ตจะถูกขยาย (stretched wavelet) โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ หรือ สัญญาณความถี่ต่ำนั่นเอง

4.5 การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ต

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และในหัวข้อที่ 3.3 ว่า การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์นั้นสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2-11) ซึ่งค่า ToF ที่ปรากฏในความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถวิเคราะห์หรือหาได้จากคลื่นที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเพื่อหาค่า ToF โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ต ซึ่งประกอบไปด้วยหลักการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต โปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต การทดสอบอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นเพื่อการวิเคราะห์สัญญาณ รวมทั้งผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ

4.5.1 หลักการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต

การวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีหลักการ คือ ทำการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับมายังตัวรับและเวฟเล็ตแม่ จากนั้นเลือกระนาบของการแปลงเวฟเล็ตที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตสูงที่สุดแล้วใช้วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนกับระนาบดังกล่าวเพื่อคำนวณหาค่า ToF และคำนวณระยะทางต่อไป สำหรับหลักการวิเคราะห์นี้อาจเขียนเป็นขั้นตอนเพื่อให้เข้าใจง่ายดังนี้

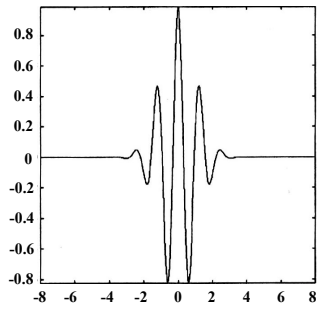
- *ขั้นตอนที่ 1* ทำการแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่องระหว่างสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับและเวฟเล็ตแม่

- *ขั้นตอนที่ 2* เลือกระนาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมากที่สุด

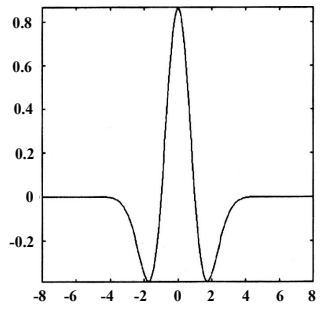
- *ขั้นตอนที่ 3* ใช้วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนกับระนาบในขั้นตอนที่ 2

ในการเลือกเวฟเล็ตแม่ในขั้นตอนที่ 1 นั้น จะเลือกใช้เวฟเล็ตแม่ที่มีรูปร่างคล้ายคลึงกับสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ (Michalodimitrakis and Laopoulos, 2001) ซึ่งในงานวิจัย

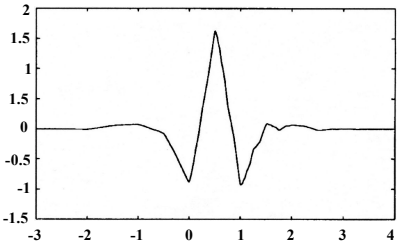
วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้เวฟเล็ตแม่ทั้งหมดสามชนิด ได้แก่ มอร์เล็ตเวฟเล็ต แมกซิกันแฮทเวฟเล็ต และ คอยเฟล็ตเวฟเล็ต เพื่อเปรียบเทียบว่าชนิดใดจะให้ผลที่ดีที่สุด ส่วนเหตุผลในการเลือกระนาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมากที่สุดในขั้นตอนที่ 2 เนื่องจากระนาบดังกล่าวจะมีพลังงานของเวฟเล็ตใกล้เคียงกับสัญญาณที่ใช้วิเคราะห์มากที่สุด (Shie and Dapang, 1996) จึงสามารถที่จะใช้แทนสัญญาณที่วิเคราะห์ ดังนั้นจึงเลือกเอาระนาบนี้มาใช้กับวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเพื่อหาค่า ToF และคำนวณระยะทางต่อไป สำหรับลักษณะของเวฟเล็ตแม่ทั้งสามชนิด แสดงไว้ในรูปที่ 4.6-4.8



รูปที่ 4.6 มอร์เล็ตเวฟเล็ต



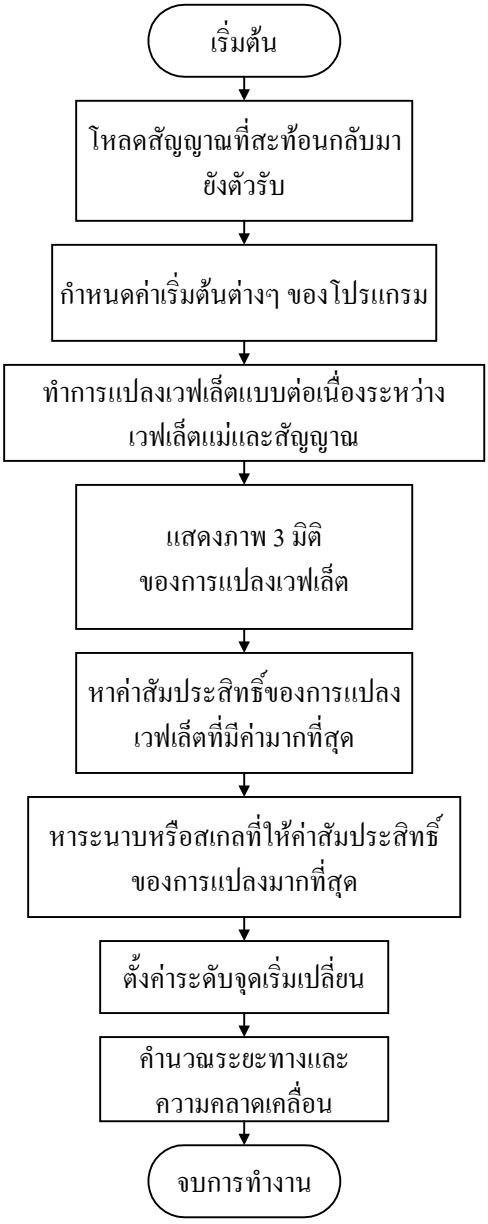
รูปที่ 4.7 แมกซิกันแฮทเวฟเล็ต



รูปที่ 4.8 คอยเฟล็ตเวฟเล็ต

4.5.2 โปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยการแปลงเวฟเล็ต

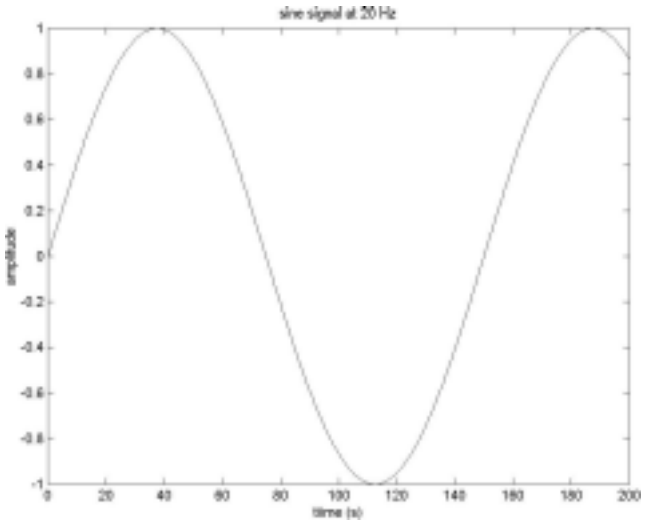
สำหรับโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะพึ่งพา Wavelet Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เป็นเพียงบางส่วน โดยโปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณจะมีทั้งหมดสามขั้นตอนใหญ่ๆ ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.3.1 ซึ่งแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 ส่วนรายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก ง.



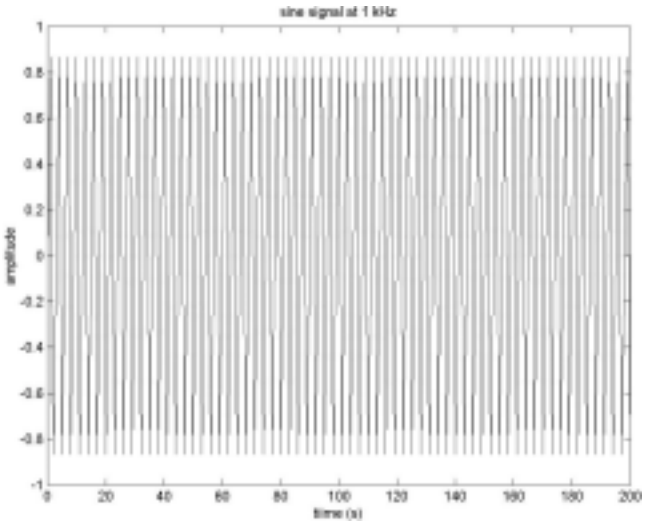
รูปที่ 4.9 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

4.5.3 ผลการทดสอบโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยการแปลงเวฟเล็ต

การทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อการตีความผลนั้น ดำเนินการโดยกำเนิดสัญญาณไซน์ความถี่ต่ำ 20 Hz และสัญญาณไซน์ความถี่สูง 1 kHz จากนั้นทำการทดสอบโปรแกรมกับสัญญาณไซน์ดังล่าว โดยทำการทดสอบกับทั้ง 3 เวฟเล็ตแม่ กล่าวคือ มอร์เล็ตเวฟเล็ต แมกซิกันแฮทเวฟเล็ต และคอยเฟล็ตเวฟเล็ต สำหรับพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้กับโปรแกรมนั้น คือ ค่าสเกลสูงที่สุด (a_{max}) ในการแปลงเวฟเล็ต ได้ทำการทดสอบ 2 ค่า คือ 128 และ 256

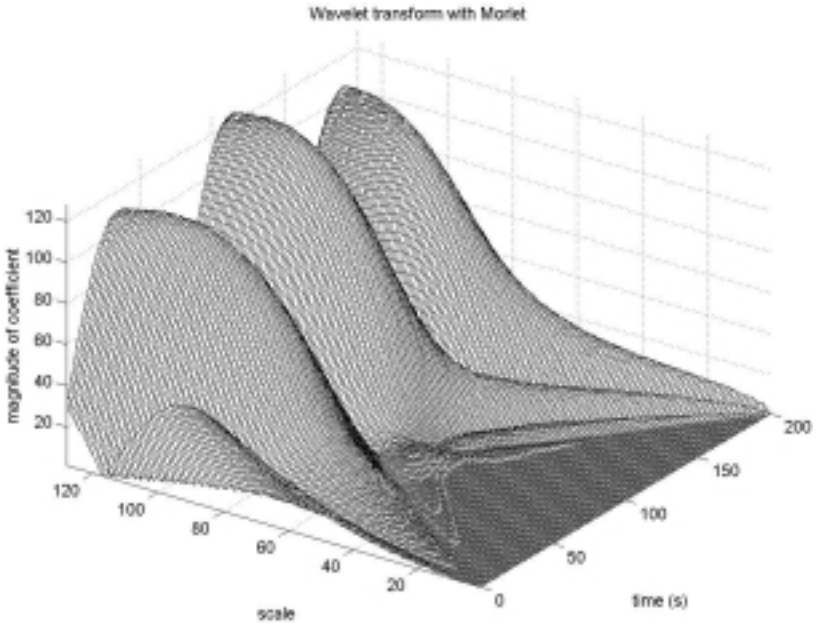


รูปที่ 4.10 สัญญาณไซน์ความถี่ 20 Hz

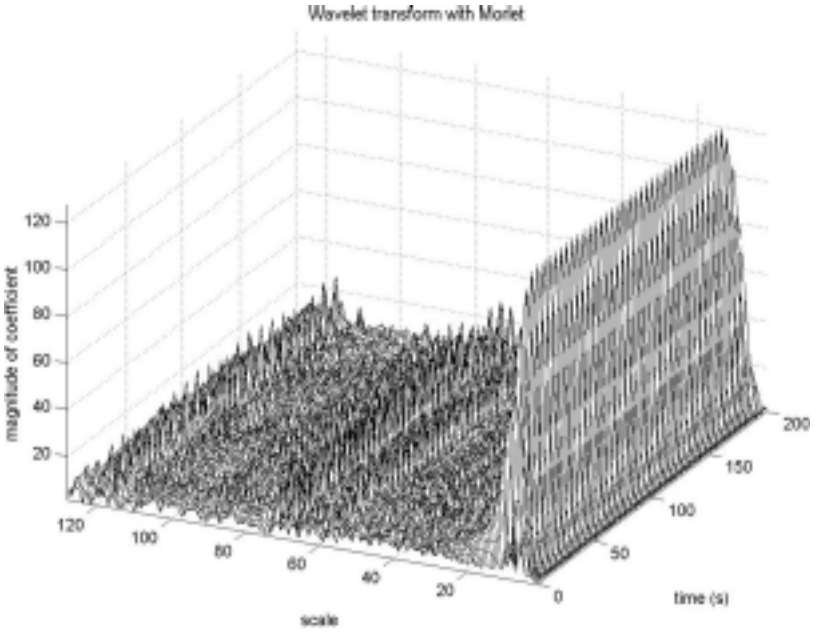


รูปที่ 4.11 สัญญาณไซน์ความถี่ 1 kHz

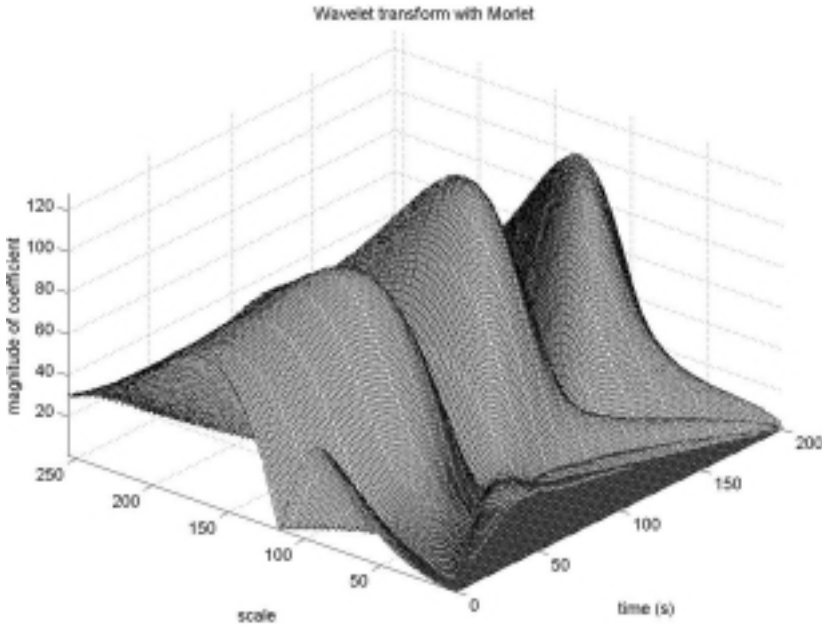
- *ผลการทดสอบของมอร์เล็ตเวฟเล็ต*



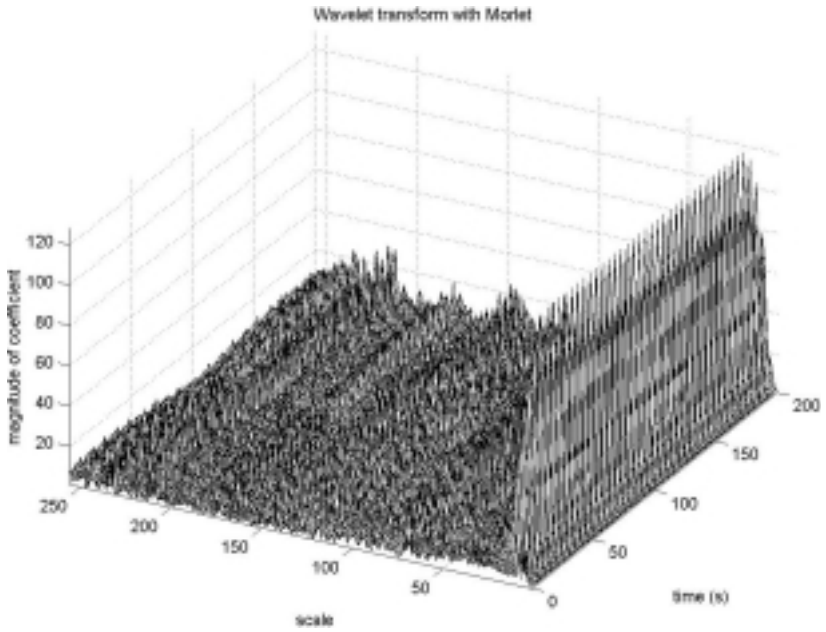
รูปที่ 4.12 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 20Hz ด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=128)



รูปที่ 4.13 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 1 kHz ด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=128)

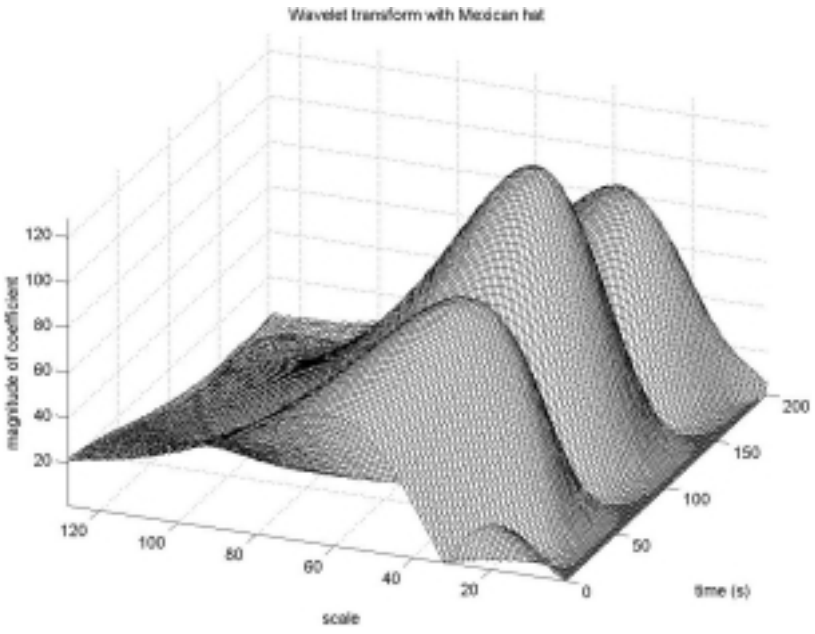


รูปที่ 4.14 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 20 Hz ด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=256)

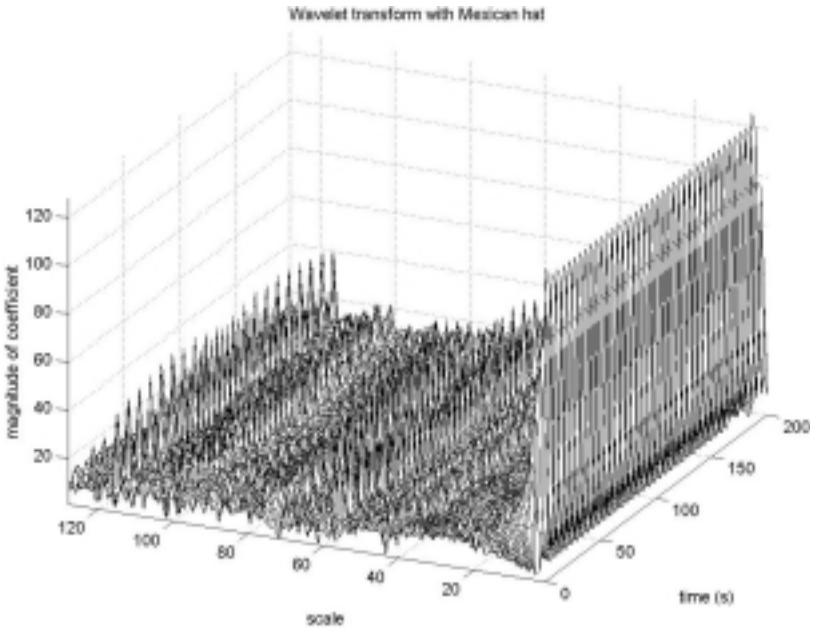


รูปที่ 4.15 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 1 kHz ด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ต(a_{max}=256)

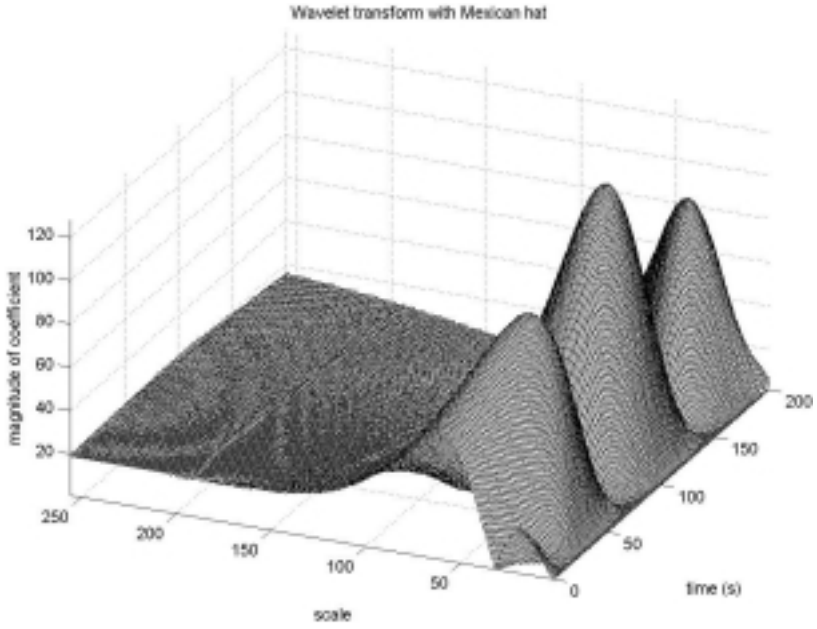
- *ผลการทดสอบของแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต*



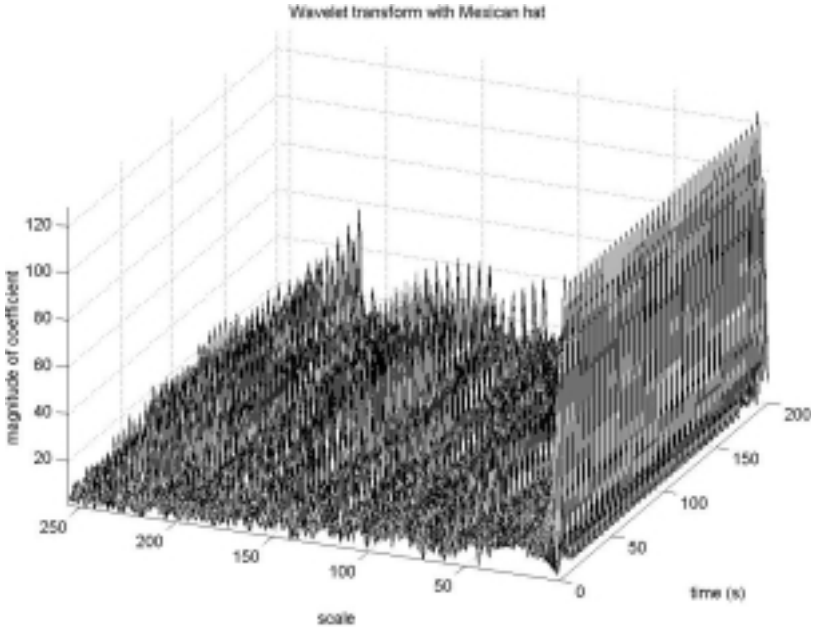
รูปที่ 4.16 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 20Hz ด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต (a_{max}=128)



รูปที่ 4.17 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 1 kHz ด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต (a_{max}=128)

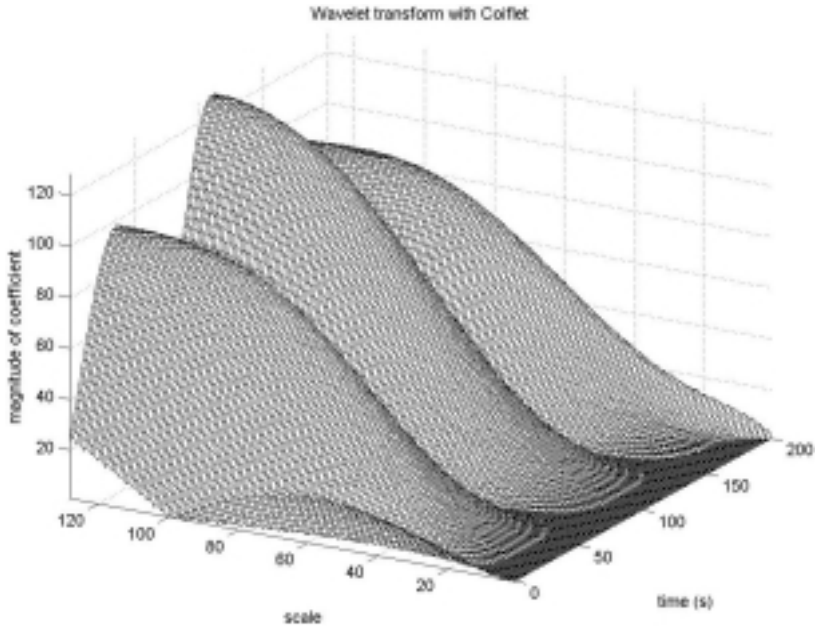


รูปที่ 4.18 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 20 Hz ด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต (a_{max}=256)

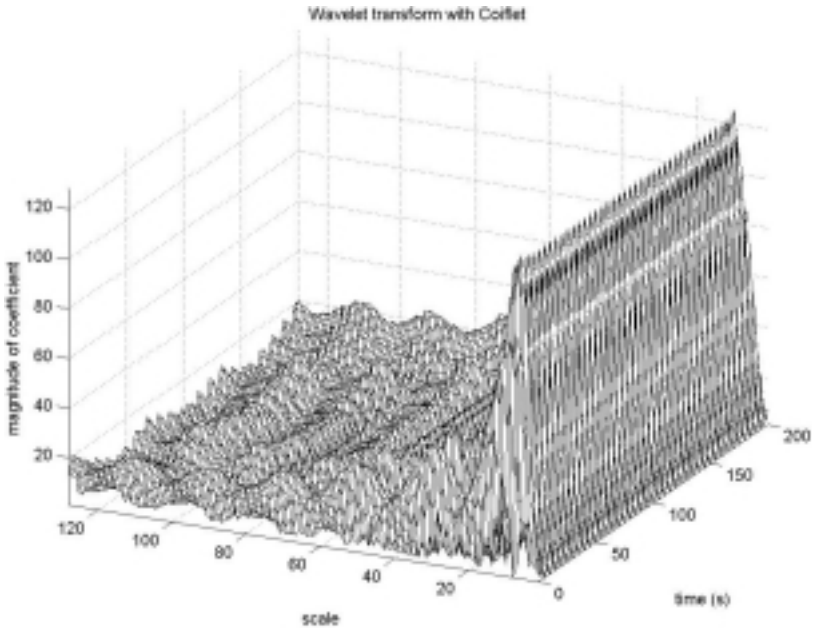


รูปที่ 4.19 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 1 kHz ด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต (a_{max}=256)

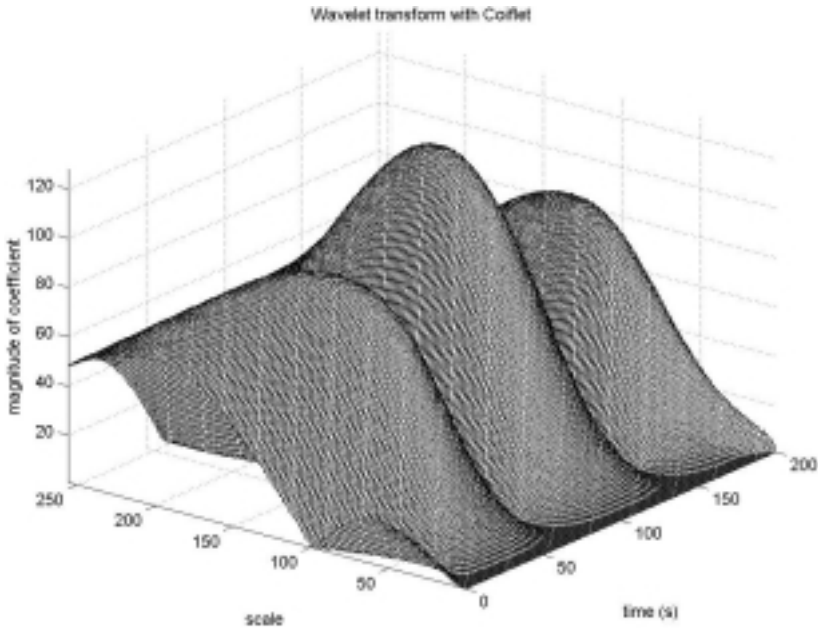
- *ผลการทดสอบของคอยเฟล็ตเวฟเล็ต*



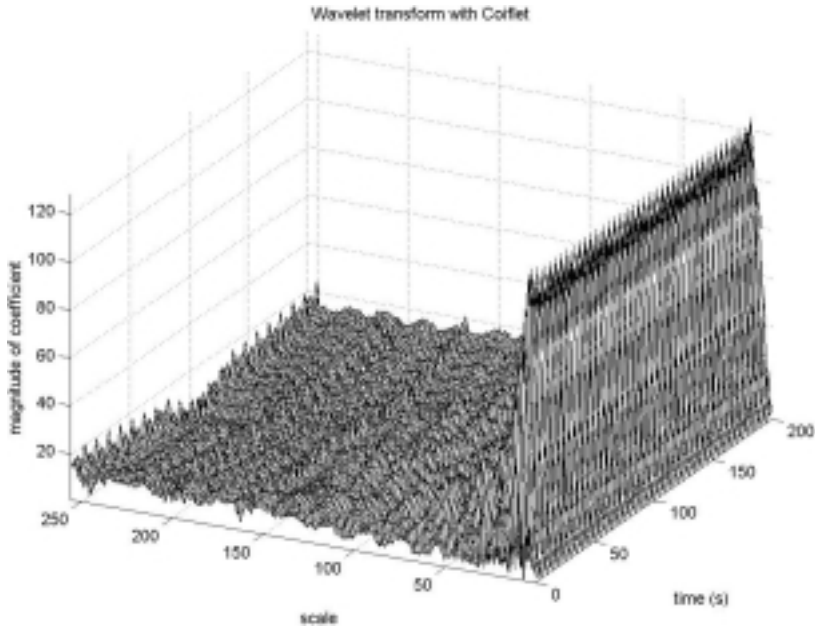
รูปที่ 4.20 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 20Hz ด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=128)



รูปที่ 4.21 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 1 kHz ด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=128)



รูปที่ 4.22 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 20 Hz ด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=256)



รูปที่ 4.23 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์ 1 kHz ด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ต (a_{max}=256)

ค่าสเกลที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตสูงที่สุดของแต่ละเวฟเล็ตแม่แสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณไซน์

เวฟเล็ตแม่	ความถี่ของสัญญาณไซน์ที่ทดสอบ	ค่าสเกลสูงสุดของการแปลงเวฟเล็ต (a_{max})	สเกลที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงมากที่สุด
มอร์เล็ต	20 Hz	128	122
		256	122
	1 kHz	128	8
		256	8
แมกซิกันแฮท	20 Hz	128	27
		256	27
	1 kHz	128	3
		256	3
คอยเฟล็ต	20 Hz	128	128
		256	137
	1 kHz	128	3
		256	3

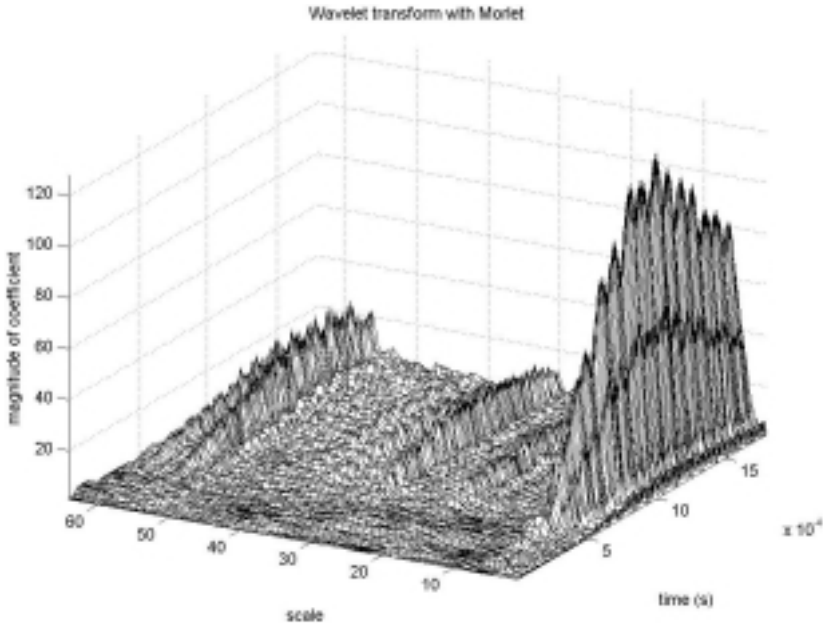
จากตารางที่ 4.1 สังเกตได้ว่า สเกลที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมากที่สุดสำหรับสัญญาณไซน์ 20 Hz ของเวฟเล็ตแม่ทั้งสามตระกูลนั้น จะมีค่าสูง ในทางกลับกันสำหรับสัญญาณไซน์ 1 kHz สเกลที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมากที่สุดจะมีค่าต่ำ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ สเกลที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณความถี่ต่ำจะมีค่าสูง และจะมีค่าน้อยเมื่อวิเคราะห์สัญญาณความถี่สูง

เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์ของอัลทราโซนิกส์เซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีความถี่สูง กล่าวคือ 40 kHz ซึ่งค่าสเกลที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดจะอยู่ที่ค่าสเกลต่ำ ดังนั้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกค่าสเกลสูงสุด (a_{max}) ไว้เพียง 64 เท่านั้น

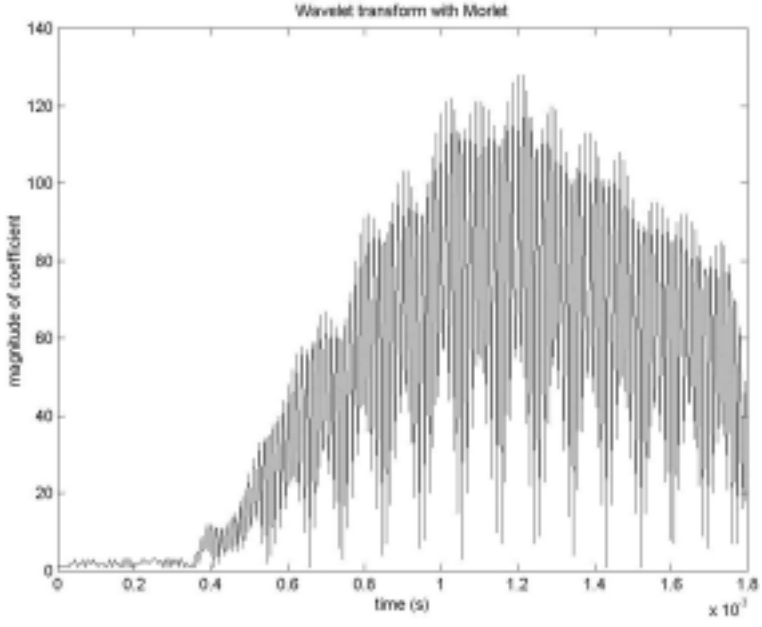
4.3.4 ผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ

ผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับที่ระยะทางต่างๆ ด้วยเวฟเล็ตแม่ทั้งสามตระกูล และระนาบที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมากที่สุด แสดงไว้ในภาพที่ 4.24-4.41

- ผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ต
  - *ระยะทาง 6 เซนติเมตร*

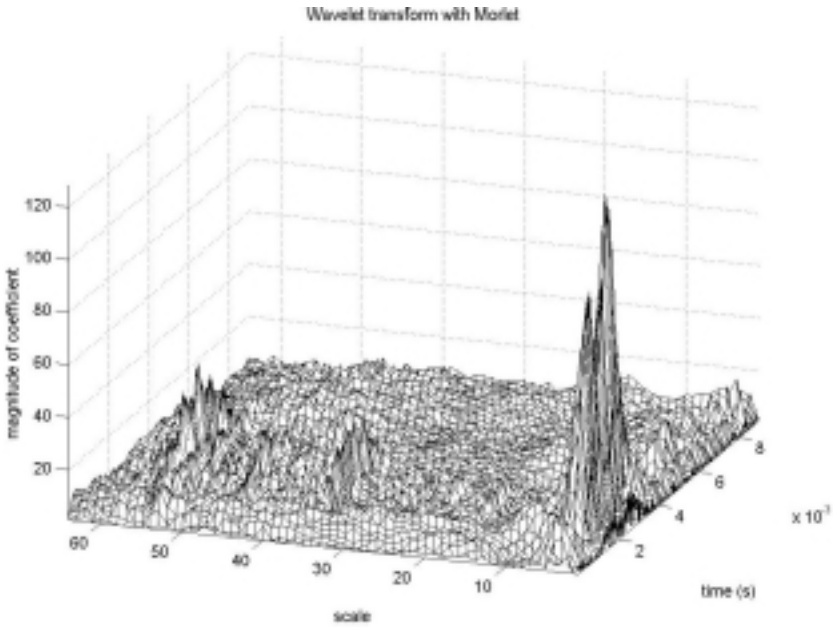


รูปที่ 4.24 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 6 เซนติเมตร

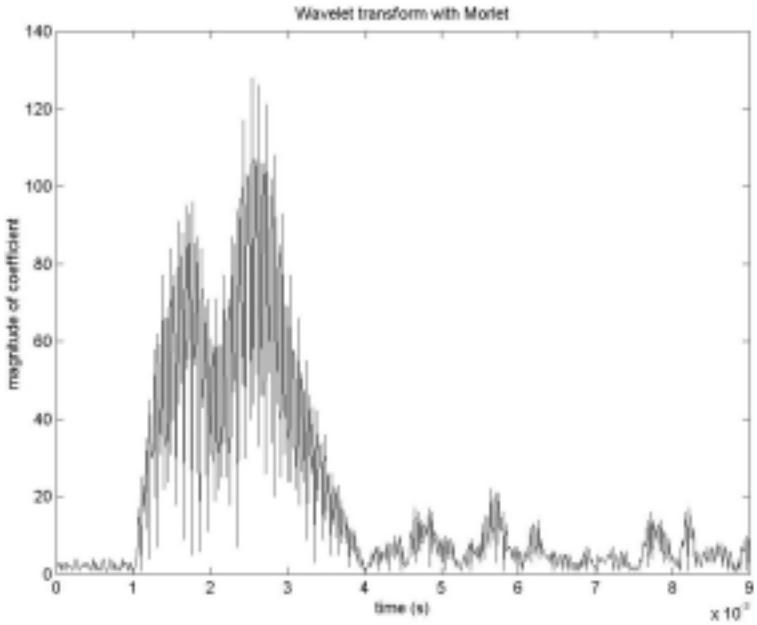


รูปที่ 4.25 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 6 เซนติเมตร
โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 5

- *ระยะทาง 18 เซนติเมตร*

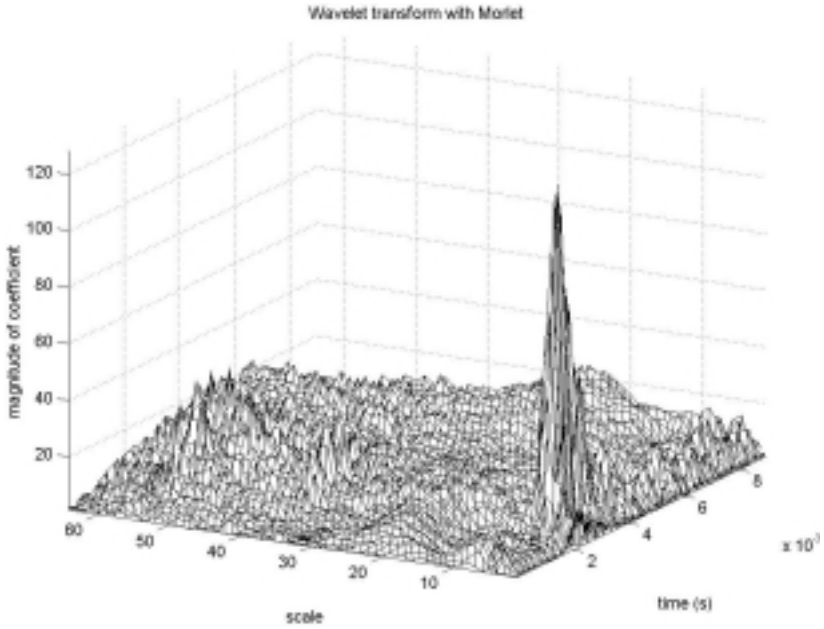


รูปที่ 4.26 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 18 เซนติเมตร

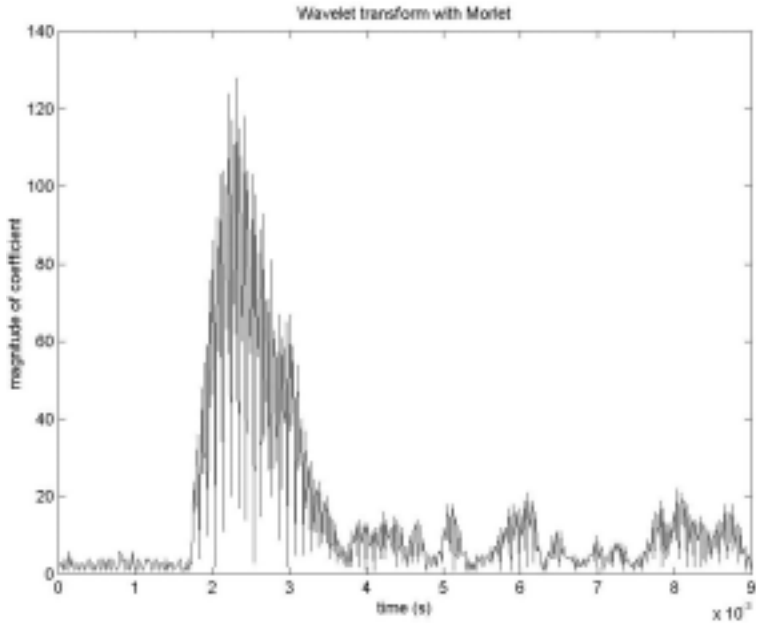


รูปที่ 4.27 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 18 เซนติเมตร
โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 5

- *ระยะทาง 30 เซนติเมตร*

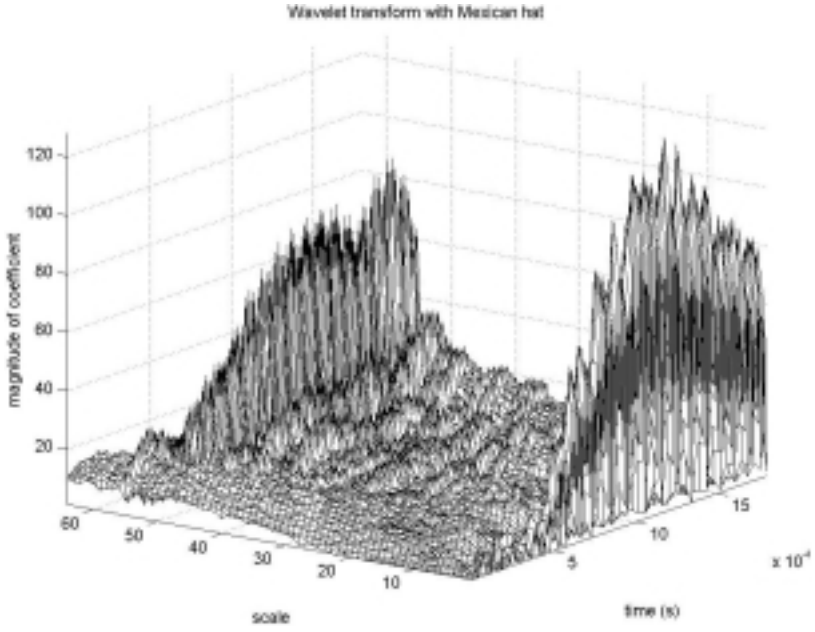


รูปที่ 4.28 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 30 เซนติเมตร

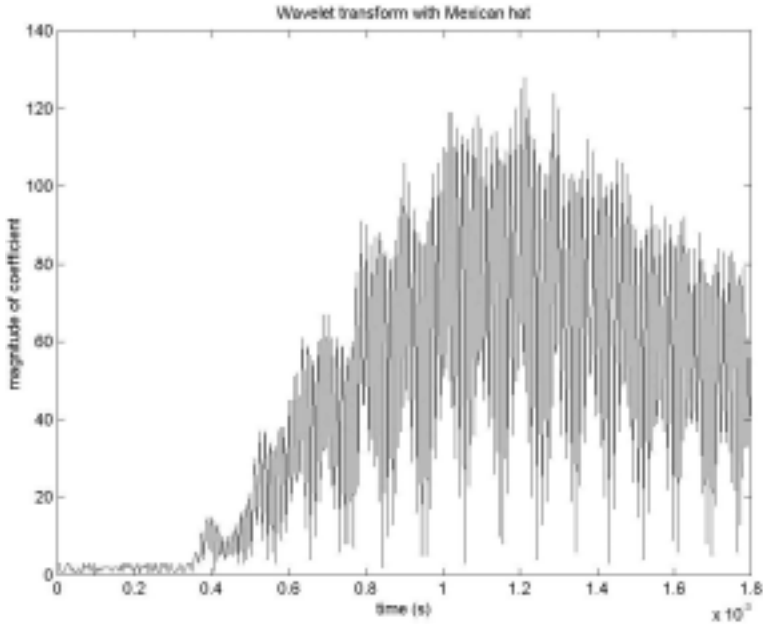


รูปที่ 4.29 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 30 เซนติเมตร
โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 5

- ผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต
  - *ระยะทาง 6 เซนติเมตร*

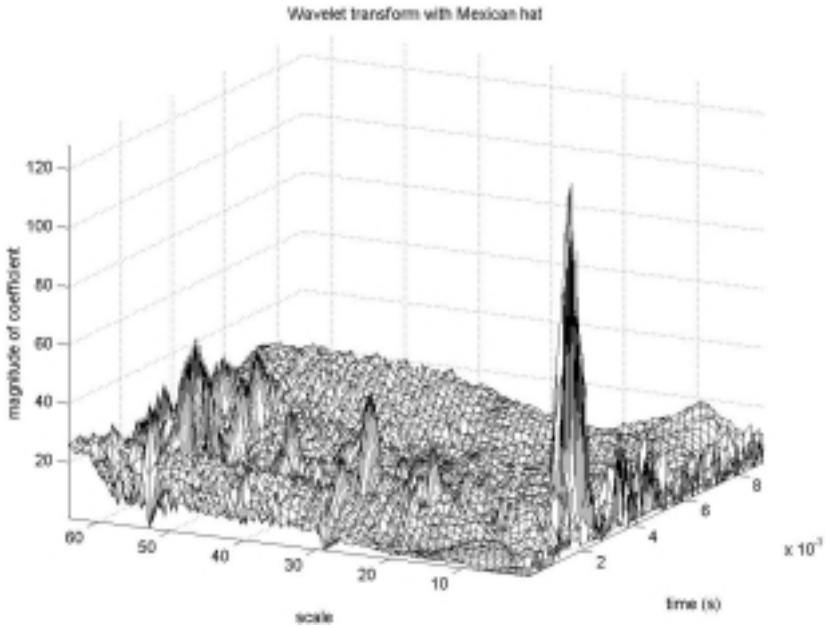


รูปที่ 4.30 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตของระยะทาง 6 เซนติเมตร

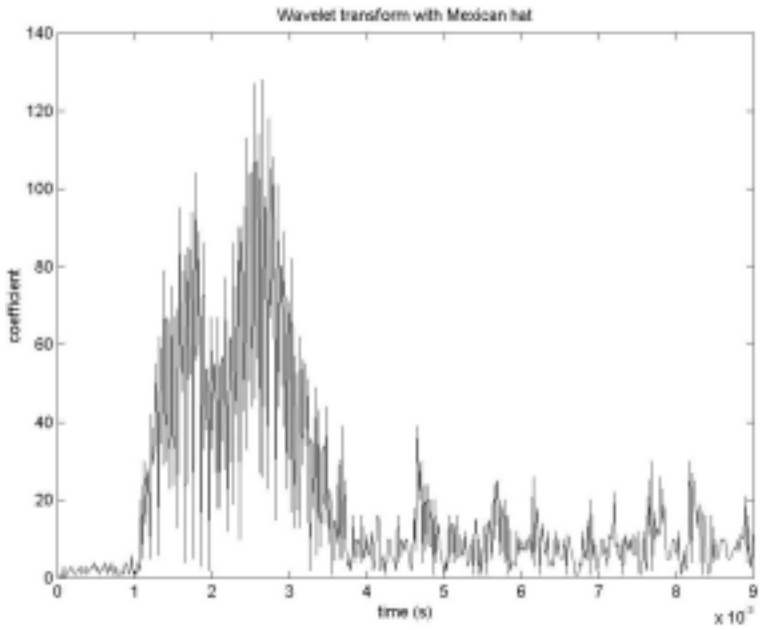


รูปที่ 4.31 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตของระยะทาง 6 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 2

- *ระยะทาง 18 เซนติเมตร*

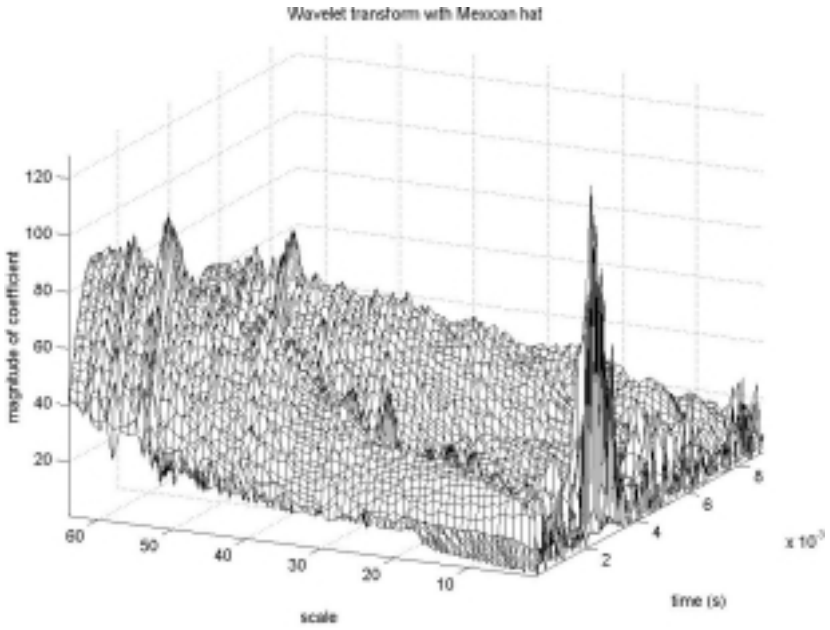


รูปที่ 4.32 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตของระยะทาง 18 เซนติเมตร

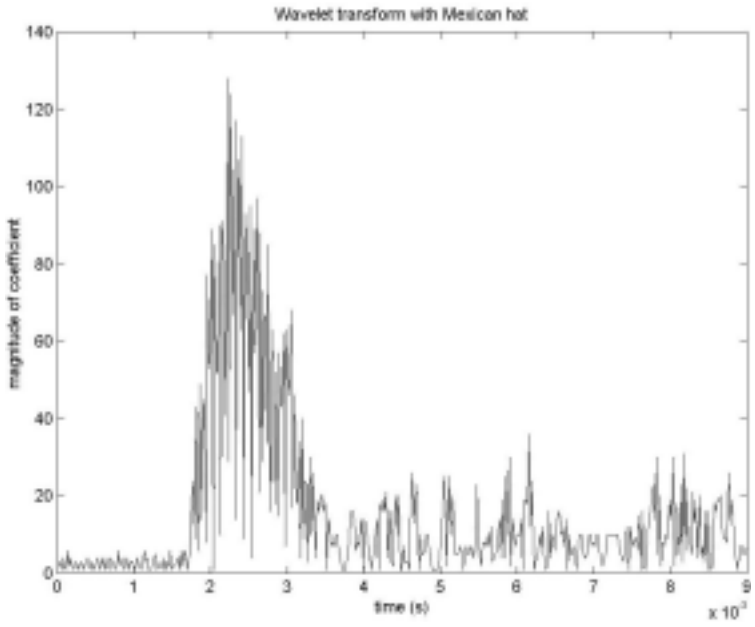


รูปที่ 4.33 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตของระยะทาง 18 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 2

- *ระยะทาง 30 เซนติเมตร*

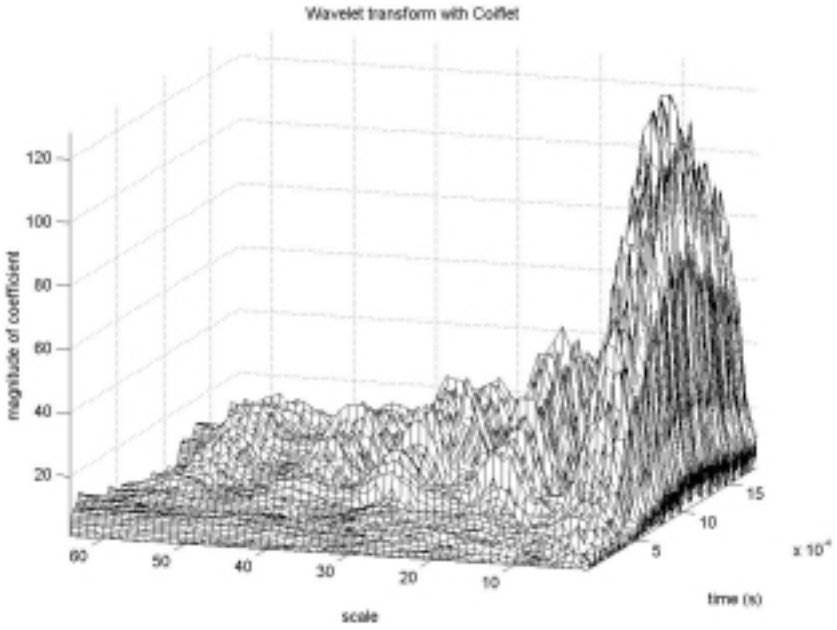


รูปที่ 4.34 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตของระยะทาง 30 เซนติเมตร

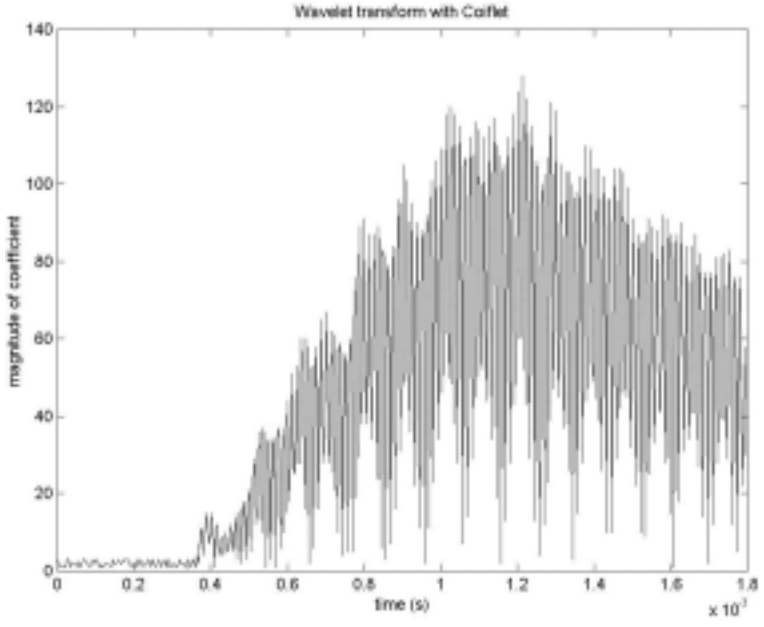


รูปที่ 4.35 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตของระยะทาง 30 เซนติเมตร
โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 2

- ผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ต
  - *ระยะทาง 6 เซนติเมตร*

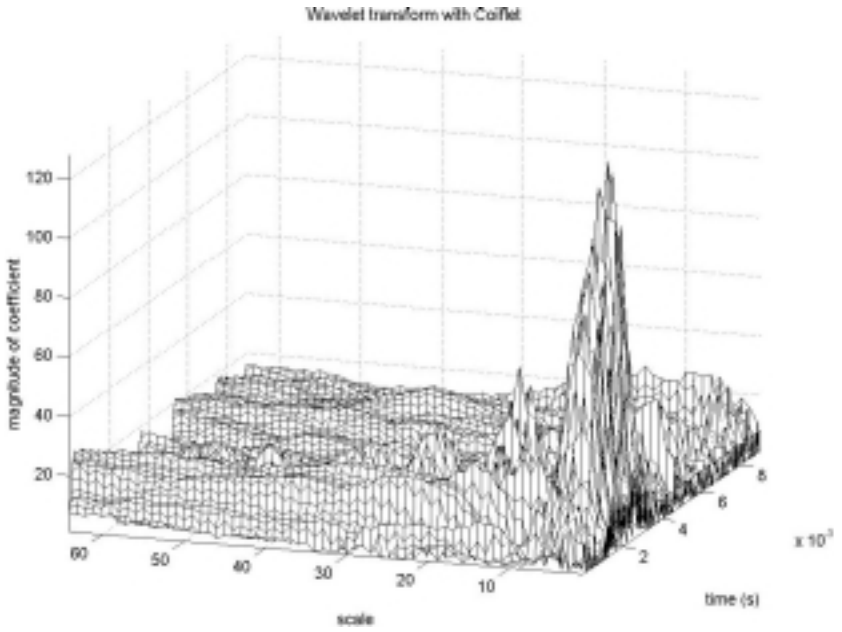


รูปที่ 4.36 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 6 เซนติเมตร

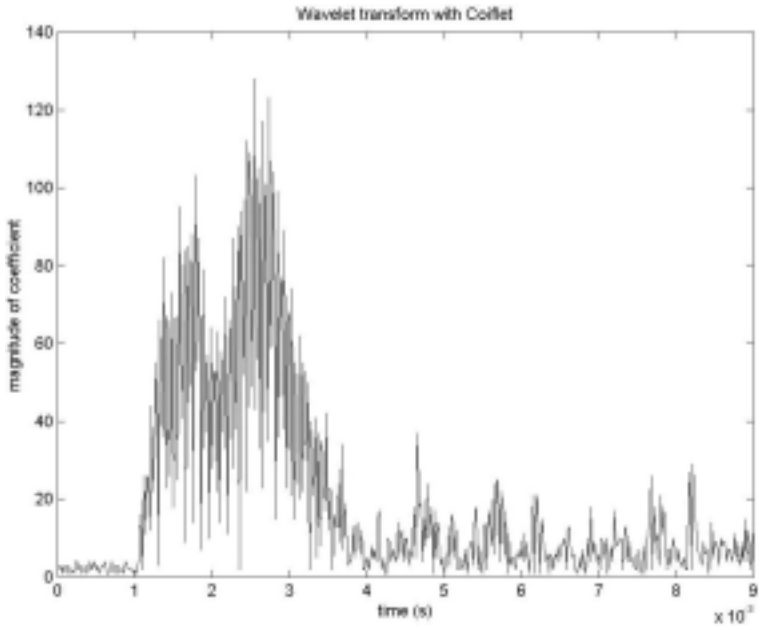


รูปที่ 4.37 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 6 เซนติเมตร
โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 5

- *ระยะทาง 18 เซนติเมตร*

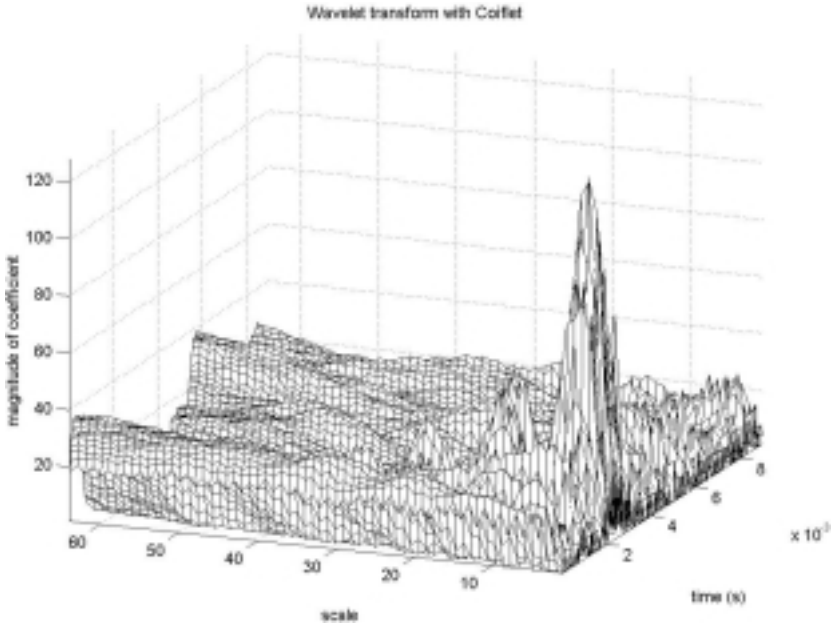


รูปที่ 4.38 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 18 เซนติเมตร

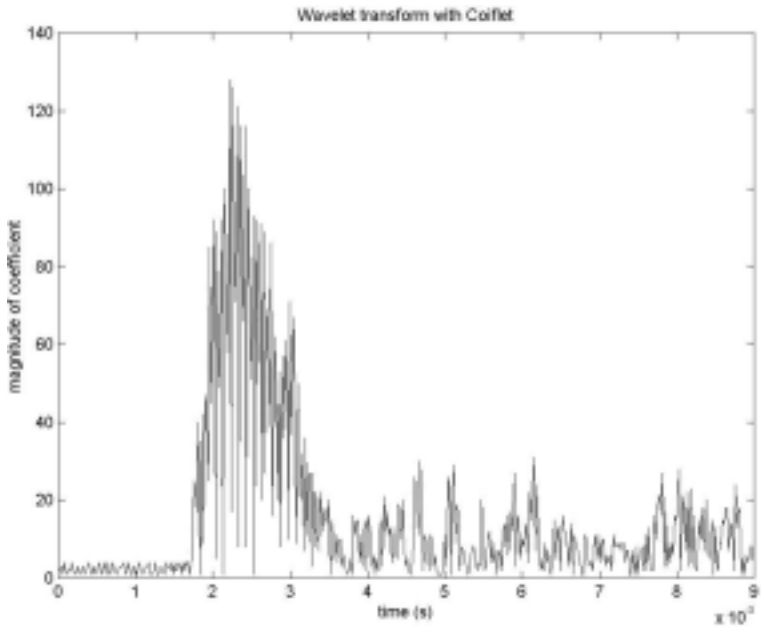


รูปที่ 4.39 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 18 เซนติเมตร
โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 5

- *ระยะทาง 30 เซนติเมตร*



รูปที่ 4.40 พื้นผิวแสดงผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 30 เซนติเมตร



รูปที่ 4.41 ระนาบของผลการแปลงเวฟเล็ตด้วยคอยเฟล็ตเวฟเล็ตของระยะทาง 30 เซนติเมตร
โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุดที่สเกลเท่ากับ 5

ค่าสเกลที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตของระยะทางต่างๆ ที่มากที่สุด เป็นดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยเวฟเล็ตแม่ตระกูลต่างๆ

ระยะทาง (เซนติเมตร)	ตระกูลเวฟเล็ตแม่	สเกลที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมากที่สุด
6	มอร์เล็ต	5
	แมกซิกันแฮท	2
	คอยเฟล็ต	5
18	มอร์เล็ต	5
	แมกซิกันแฮท	2
	คอยเฟล็ต	5
30	มอร์เล็ต	5
	แมกซิกันแฮท	2
	คอยเฟล็ต	5

จากตารางที่ 4.2 สังเกตได้ว่า สเกลที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมากที่สุดของเวฟเล็ตแม่ทั้งสามตระกูลจะอยู่ที่สเกลต่ำ เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์ของอัลทราโซนิกเซนเซอร์มีความถี่สูง ซึ่งระนาบนี้จะนำไปใช้กับวิธีตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดา เพื่อค่า ToF สำหรับคำนวณระยะทางต่อไป โดยผลของการวัดระยะทางด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตแสดงไว้ในบทที่ 6

4.6 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ในบทที่ 4 นี้ ได้นำเสนอการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ต ซึ่งได้กล่าวถึงความเป็นมาของการแปลงเวฟเล็ต ทฤษฎีพื้นฐานของการแปลงเวฟเล็ต การแปลงเวฟเล็ตแบบต่อเนื่อง รวมไปถึงหลักการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยอัลกอริทึมและโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ ผลการทดสอบโปรแกรม และผลการแปลงเวฟเล็ตของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ โดยพบว่า สเกลที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมากที่สุดจะมีค่าน้อยๆ เนื่องจากสัญญาณอัลทราโซนิกเซนเซอร์มีความถี่สูง กล่าวคือ 40 kHz ซึ่งจะนำเอาระนาบของสเกลดังกล่าวไปใช้กับวิธีตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดา เพื่อหาค่า ToF สำหรับคำนวณระยะทางต่อไป โดยผลของการวัดระยะทางแสดงไว้ในบทที่ 6

บทที่ 5
วิธีการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่ด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์

5.1 บทนำ

การกระจายเชิงเวลา-ความถี่ (time-frequency distribution หรือ TFD) เป็นการตีแผ่องค์ประกอบของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ให้แสดงในรูปของความหนาแน่นทางพลังงาน (energy density) หรือความเข้ม (intensity) ของสัญญาณ ในโดเมนเวลาและความถี่พร้อมๆกัน (Cohen, 1989) TFD จึงเป็นเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเหนือเสียง เนื่องจากสามารถตรวจจับหรือแสดงพลังงานของคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ ในระนาบของโดเมนเวลาและความถี่ได้พร้อมกัน (Malik and Saniie, 1996)

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้การกระจายของชอย-วิลเลียมส์ (Choi-Williams distribution หรือ CWD) ซึ่งเป็นการกระจายแบบหนึ่งของการกระจายกลุ่มโคเฮน (Cohen's class distribution) เพื่อการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ โดยในบทนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียดของการกระจายต่างๆ ได้แก่ การกระจายเชิงเวลา-ความถี่ การกระจายของวีกเนอร์-วิลล์ (Wigner-Ville distribution หรือ WVD) การกระจายกลุ่มโคเฮน และการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ พร้อมด้วยการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์

5.2 การกระจายเชิงเวลา-ความถี่

คำว่า การกระจาย ในที่นี้หมายถึง การแสดงความหนาแน่นทางพลังงานหรือความเข้มของสัญญาณ ทั้งในเวลาและความถี่พร้อมๆ กัน สำหรับจุดประสงค์ของการกระจายเชิงเวลา-ความถี่ คือ การอธิบายพฤติกรรมของสเปกตรัมของสัญญาณว่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรเมื่อเทียบกับเวลา (Cohen, 1989)

สเปกตรัมกำลัง (power spectrum หรือ PS) คือ ลักษณะการกระจายพลังงานของสัญญาณในโดเมนความถี่ ซึ่งสามารถหาได้จากการยกกำลังสองของผลการแปลงฟูริเยร์ ทฤษฎีของไวเนอร์-คินชิน (Wiener-Khinchin) กล่าวไว้ว่า สเปกตรัมกำลังของสัญญาณ (s(t)) ใดๆ คือ การแปลงฟูริเยร์ของฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ (auto-correlation function หรือ $R(\tau)$) ดังนี้ (Shie and Dapang, 1996)

$$PS(t,\omega) = |S(\omega)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau)\, e^{-j\omega\tau} d\tau \qquad (5\text{-}1)$$

โดย $R(\tau)$ สามารถหาได้จาก

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t-\tau)\, dt \qquad (5\text{-}2)$$

เมื่อ

$s(t)$ คือ สัญญาณใดๆ

$s^*(t\text{-}\tau)$ คือ สัญญาณใดๆ ที่ถูกเลื่อนเวลาไป τ

$PS(t,\omega)$ คือ สเปกตรัมกำลัง

$R(\tau)$ คือ ฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์

จากความสัมพันธ์ (5-1) จะเห็นได้ว่า สเปกตรัมกำลังของสัญญาณไม่เป็นฟังก์ชันของเวลาแต่จะเป็นฟังก์ชันของความถี่เท่านั้น ซึ่งสามารถที่จะระบุในช่วงคาบเวลาหนึ่งๆได้ว่าสัญญาณที่ สนใจมีสเปกตรัมกำลังเท่าไรและเกิดขึ้นที่ความถี่ ω ใด ในทางตรงกันข้ามกันก็ไม่สามารถระบุได้ว่า ภายในช่วงเวลาที่พิจารณานั้นสเปกตรัมกำลังเปลี่ยนแปลงอย่างไร ดังนั้น สเปกตรัมกำลังจึงไม่สามารถอธิบายสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเวลาและทางความถี่ เช่น เสียงพูด เสียงดนตรี ดัชนีหุ้น เป็นต้น

สเปกตรัมกำลังที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-dependent power spectrum: $P(t,\omega)$) เป็นการพิจารณาสเปกตรัมกำลังของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเวลาและความถี่ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากผลการแปลงฟูริเยร์ของฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา (time-dependent auto-correlation function) ดังนี้

$$P(t,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(t,\tau)\, e^{-j\omega\tau} d\tau \qquad (5\text{-}3)$$

โดย

$P(t,\omega)$ คือ สเปกตรัมกำลังที่ขึ้นอยู่กับเวลา

$R(t,\tau)$ คือ ฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลา

ฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลานั้น จะต้องทำให้สเปกตรัมกำลังที่ขึ้นอยู่กับเวลาสอดคล้องกับสองเงื่อนไขดังต่อไปนี้ (Shie and Dapang, 1996)

- *เงื่อนไขส่วนเผื่อความถี่ (frequency marginal condition)* กล่าวคือ ผลรวมของการกระจายพลังงานตลอดช่วงเวลาทั้งหมด ณ ความถี่ใดความถี่หนึ่งจะมีค่าเท่ากับผลรวมของสเปกตรัมกำลัง นั่นคือ

$$|S(\omega)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} P(t,\omega)\, dt \tag{5-4}$$

- *เงื่อนไขส่วนเผื่อเวลา (time marginal condition)* กล่าวคือ ผลรวมของการกระจายพลังงานตลอดช่วงความถี่ทั้งหมด ณ เวลาใดเวลาหนึ่งจะมีค่าเท่ากับพลังงานขณะใดขณะหนึ่ง (instantaneous energy) นั่นคือ

$$|s(t)|^2 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} P(t,\omega)\, d\omega \tag{5-5}$$

โดยพลังงานของการกระจายสามารถหาได้จาก

$$E = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} P(t,\omega) d\omega dt \tag{5-6}$$

สเปกตรัมที่ขึ้นอยู่กับเวลาที่นิยมใช้ คือ สเปกโตรแกรม ซึ่งก็คือ กำลังสองของ STFT สำหรับ STFT นี้เหมาะสำหรับอธิบายสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบคงที่ อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในการเลือกฟังก์ชันหน้าต่างของ STFT ในการวิเคราะห์สัญญาณดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2 ดังนั้น ในปี ค.ศ. 1932 Ville จึงได้เสนอการกระจายแบบใหม่ที่เรียกว่า การกระจายแบบวีกเนอร์-วิลล์ สำหรับวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงแบบไม่คงที่

5.3 การกระจายแบบวีกเนอร์-วิลล์

ฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาของการกระจายแบบวีกเนอร์-วิลล์ (WVD) เป็นดังนี้

$$R(t,\tau) = s(t+\frac{\tau}{2})s^*(t-\frac{\tau}{2}) \tag{5-7}$$

เมื่อแทนค่า R(t,τ) ของ WVD ดังสมการที่ (5-7) ลงในสมการที่ (5-3) จะได้การกระจายแบบวีกเนอร์-วิลล์ (WVD) ของสัญญาณใดๆ เป็นดังนี้

$$\mathrm{WVD}(t,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t+\frac{\tau}{2})\, s^{*}(t-\frac{\tau}{2})\, e^{-j\omega\tau}\, d\tau \qquad (5\text{-}8)$$

การกระจายแบบวีกเนอร์-วิลล์ มีคุณสมบัติทั่วไปดังต่อไปนี้

- *ความไม่ผันแปรต่อการเลื่อนเวลา (time-shift invariant)* : ถ้า WVD ของสัญญาณ s(t) คือ WVD(t,ω) ดังนั้น WVD ของสัญญาณที่มีการเลื่อนเวลาเป็น $s_0(t) = s(t-t_0)$ จะเป็นดังนี้

$$\mathrm{WVD}(t,\omega)\big|_{t=t-t_0} = \mathrm{WVD}(t-t_0,\omega) \qquad (5\text{-}9)$$

- *ความไม่ผันแปรต่อการมอดูเลตความถี่ (frequency modulation invariant)* : ถ้า WVD ของสัญญาณ s(t) คือ WVD(t,ω) ดังนั้นWVD ของสัญญาณที่มีการมอดูเลตความถี่เป็น $s_0(t) = s(t)e^{j\omega_0 t}$ จะเป็นดังนี้

$$\mathrm{WVD}(t,\omega)\big|_{\omega=\omega-\omega_0} = \mathrm{WVD}_s(t,\omega-\omega_0) \qquad (5\text{-}10)$$

- *เงื่อนไขส่วนเผื่อเวลา (time marginal condition)* :

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{WVD}(t,\omega)d\omega = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} s(t+\frac{\tau}{2})s^{*}(t-\frac{\tau}{2})e^{-j\omega\tau}d\omega d\tau$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} s(t+\frac{\tau}{2})s^{*}(t-\frac{\tau}{2})\delta(\tau)\,d\tau = |s(t)|^2 \qquad (5\text{-}11)$$

- *เงื่อนไขส่วนเผื่อความถี่ (frequency marginal condition)* :

$$\int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{WVD}(t,\omega)dt = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} s(t+\frac{\tau}{2})s^{*}(t-\frac{\tau}{2})e^{-j\omega\tau}dt\,d\tau$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega\tau} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\, s^{*}(t-\tau)\, dt\, d\tau$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega\tau} R(\tau)\, d\tau = |S(\omega)|^2 \qquad (5\text{-}12)$$

เมื่อ

$S(\omega)$ คือ การแปลงฟูริเยร์ของสัญญาณ $s(t)$

จากสมการที่ (5-11) และ (5-12) จะเห็นว่า $WVD(t,\omega)$ ของสัญญาณใดๆ สอดคล้องกับทั้งเงื่อนไขส่วนเผื่อเวลา และเงื่อนไขส่วนเผื่อความถี่ แสดงว่า พลังงานของ $WVD(t,\omega)$ มีค่าเท่ากับพลังงานของสัญญาณต้นกำเนิด $s(t)$

WVD ให้ความละเอียดดีกว่า STFT แต่ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ เมื่อนำ WVD ไปวิเคราะห์สัญญาณตั้งแต่สองสัญญาณขึ้นไป มักเกิดการแทรกสอด หรือที่เรียกว่าพจน์ไขว้ข้าม (cross-term) พจน์ไขว้ข้ามที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นปัญหามากเมื่อนำ WVD ไปประยุกต์ใช้ในงานการรู้จำรูปแบบและการจำแนกสัญญาณ อีกทั้งยังทำให้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มากเกินความจำเป็น (Choi and Williams, 1989) ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาการกระจายทางเวลา-ความถี่แบบใหม่สำหรับอธิบายพฤติกรรมของสัญญาณต่างๆ และมีคุณลักษณะที่แตกต่างกันออกไปอีกหลายแบบเพื่อแก้ข้อจำกัดของ WVD และในปี ค.ศ. 1966 Cohen ได้นำเสนอแนวทางใหม่ที่เรียกว่าเป็นการกระจายทางเวลา-ความถี่กลุ่มโคเฮน ซึ่งสามารถแก้ข้อจำกัดของ WVD ได้ อีกทั้งยังพบว่า การกระจายทางเวลา-ความถี่แบบอื่นๆ สามารถที่จะพัฒนาขึ้นมาจากวิธีดังกล่าวนี้ (Malik and Saniie, 1996)

5.4 การกระจายกลุ่มโคเฮน

การกระจายกลุ่มโคเฮนจะตั้งต้นจากการหาสเปกตรัมกำลังที่ขึ้นอยู่กับเวลาดังสมการที่ (5-3) โดยฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาของโคเฮนเป็นดังนี้

$$R(t,\tau) = \frac{1}{2\pi}\int AF(\vartheta,\tau)\Phi(\vartheta,\tau)\, e^{j\vartheta\tau}\, d\vartheta \qquad (5\text{-}13)$$

เมื่อ

$AF(\vartheta,\tau)$ คือ ฟังก์ชันความไม่แน่นอนแบบสมมาตร (symmetric ambiguity function) ซึ่งมีนิยามดังนี้ (Shie and Dapang, 1996)

$$AF(\vartheta,\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t+\frac{\tau}{2})\, s^{*}(t-\frac{\tau}{2}) e^{-j\vartheta\tau} dt \qquad (5\text{-}14)$$

และ $\Phi(\vartheta,\tau)$ เรียกว่า เคอร์เนลฟังก์ชัน (kernel function) ซึ่งมีการแปลงกลับฟูริเยร์เป็น $\phi(t,\tau)$ เมื่อนำฟังก์ชันอัตสหสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาและฟังก์ชันความไม่แน่นอนแบบสมมาตร ในสมการที่ (5-13) และ (5-14) แทนลงในสมการที่ (5-3) จะได้ รูปแบบทั่วไปการกระจายกลุ่มโคเฮน หรือ $C(t,\omega)$ เป็นดังนี้

$$C(t,\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} AF(\vartheta,\tau)\, \Phi(\vartheta,\tau) e^{j(\vartheta\tau-\omega\tau)} d\vartheta d\tau \qquad (5\text{-}15)$$

หรือ
$$C(t,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s(u+\frac{\tau}{2})\, s^{*}(u-\frac{\tau}{2})\, \phi(t-u,\tau)\, du\; e^{-j\omega\tau} d\tau \qquad (5\text{-}16)$$

เมื่อ

$C(t,\omega)$ คือ การกระจายกลุ่มโคเฮน

การกระจายกลุ่มโคเฮนนี้จะมีคุณสมบัติเหมือนกับ WVD ทั้งสี่คุณสมบัติดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5.3 การกระจายกลุ่มโคเฮนมีสมาชิกย่อยๆ หลายแบบซึ่งขึ้นอยู่กับเคอร์เนลฟังก์ชัน โดยเคอร์เนลฟังก์ชันนั้นจะต้องทำให้การกระจายสอดคล้องกับเงื่อนไขส่วนเผื่อเวลาและเงื่อนไขส่วนเผื่อความถี่ ซึ่งอาจสังเกตได้ว่า WVD คือ การกระจายกลุ่มโคเฮนที่มีเคอร์เนลฟังก์ชันเท่ากับ 1

5.5 การกระจายของชอย-วิลเลียมส์

การกระจายของชอย-วิลเลียมส์ (Choi and Williams, 1989) หรือ CWD เป็นหนึ่งในสมาชิกของการกระจายกลุ่มโคเฮน โดยมีเคอร์เนลฟังก์ชันเป็นเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังนี้

$$\Phi(\vartheta,\tau) = e^{-(\vartheta\tau)^2/\alpha} \qquad (5\text{-}17)$$

และการแปลงกลับฟูริเยร์ของเอ็กซ์โพเนนเชียลเคอร์เนล ในสมการที่ (5-17) เป็นดังนี้

$$\phi(t,\tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau^2/\alpha}} e^{-\frac{\alpha}{4\tau^2}t^2} \qquad (5\text{-}18)$$

เมื่อแทนค่าเอ็กซ์โพเนนเชียลเคอร์เนลในสมการที่ (5-18) ลงในสมการที่ (5-16) จะได้การกระจายของชอย-วิลเลียมส์เป็นดังนี้

$$CWD(t,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau^2/\alpha}} e^{-\frac{\alpha}{4\tau^2}(t-u)^2} s(u+\frac{\tau}{2}) s^*(u-\frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} du d\tau \qquad (5\text{-}19)$$

พารามิเตอร์ α เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการแทรกสอด กล่าวคือ ถ้า α มีค่าน้อยจะทำให้มีการแทรกสอดมาก ในทางตรงกันข้ามกันถ้า α มีค่ามากการแทรกสอดจะน้อย การกระจายของชอย-วิลเลียมส์ดังสมการที่ (5-19) เป็นการกระจายที่เหมาะสำหรับสัญญาณแบบต่อเนื่อง ส่วนการกระจายของชอย-วิลเลียมส์สำหรับสัญญาณแบบดีสครีตเป็นดังนี้ (Choi and Williams, 1989)

$$DCWD(n,\theta) = 2\sum_{\tau=-\infty}^{\infty} e^{-j2\theta\tau} \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} \frac{1}{4\pi\tau^2/\alpha} e^{-\frac{(\mu-n)^2}{(4\tau^2/\alpha)}} s(\mu+\tau) s^*(\mu-\tau) \qquad (5\text{-}20)$$

เมื่อ

n คือ ตัวแปรทางเวลา

θ คือ ตัวแปรทางความถี่

τ คือ ตัวแปรที่มีค่าในช่วง $-\infty$ ถึง ∞

μ คือ ตัวแปรที่มีค่าในช่วง $-\infty$ ถึง ∞

การกระจายของชอย-วิลเลียมส์สำหรับสัญญาณแบบต่อเนื่องและสัญญาณแบบดีสครีตนั้นจะมีคุณสมบัติเหมือนกับ WVD ดังที่กล่าวมาแล้วทั้งสี่ประการ

การกระจายของชอย-วิลเลียมที่กล่าวมานี้เป็นเพียงการนำเสนอหลักการกว้างๆ เท่านั้น ซึ่งรายละเอียดสามารถค้นคว้าได้จากเอกสารอ้างอิง Shie and Dapang (1996) และ Choi and Williams (1989)

5.6 การคำนวณการกระจายเชิงเวลา-ความถี่ของชอย-วิลเลียมส์อย่างรวดเร็ว

ในปี ค.ศ. 1992 Barry ได้นำเสนอการคำนวณการกระจายของชอย-วิลเลียมส์แบบรวดเร็วขึ้น โดยอาศัยหลักการการคำนวณแบบเมตริกซ์และการประมวลผลแบบขนาน เพื่อลดเวลาในการคำนวณการกระจายของชอย-วิลเลียมส์แบบดีสครีตดั้งเดิม

5.6.1 ขั้นตอนการคำนวณการกระจายเชิงเวลา-ความถี่ของชอย-วิลเลียมส์อย่างรวดเร็ว

สำหรับขั้นตอนการคำนวณการกระจายทางเวลา-ความถี่ของชอย-วิลเลียมส์อย่างรวดเร็ว เป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณเมตริกซ์ผลคูณจากด้านนอก (outer product matrix) ซึ่งสมาชิกแต่ละตัวของเมตริกซ์นี้ คือ $s(\mu+\tau)s^*(\mu-\tau)$ โครงสร้างของเมตริกซ์ดังกล่าวดูได้ในรูปที่ 5.1 โดยสมาชิกของเมตริกซ์นี้จะเป็นฟังก์ชันของ t และ τ

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก (weighted matrix) จากเคอร์เนลฟังก์ชัน ซึ่งก็คือ พจน์ $\frac{1}{\sqrt{4\pi\tau^2/\alpha}}e^{-\frac{(\mu-n)^2}{(4\tau^2/\alpha)}}$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการถ่วงนำหนักสมาชิกแต่ละตัวของเมตริกซ์ผลคูณจากด้านนอกด้วยเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก โดยคูณเมตริกซ์ทั้งสองแบบจุดต่อจุด

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณผลรวมแต่ละหลักของเมตริกซ์ที่ได้ในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งจะเป็นแถวลำดับ (array) ที่เป็นฟังก์ชันของ τ

ขั้นตอนที่ 5 ทำการแปลงฟูริเยร์แบบรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ให้กับแถวลำดับจากขั้นตอนที่ 4 ซึ่งผลการแปลงที่ได้จะเป็นแถวลำดับสำหรับเวลาที่ i

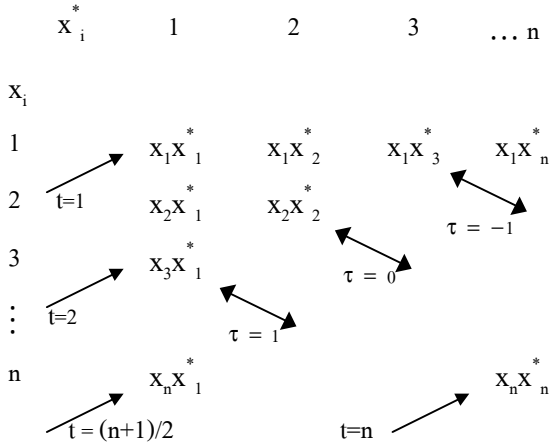
สำหรับขั้นตอนการคำนวณทั้งหมดอาจดูได้ในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างการคำนวณเพื่อให้เข้าใจขั้นตอนการคำนวณง่ายขึ้น โดยใช้ข้อมูลเพียง 5 จุด และกำหนด α เท่ากับ 1

อัลกอริทึมที่สามารถคำนวณได้เร็วนั้นจะต้องอาศัยการประมวลผลแบบขนานดังรูปที่ 5.2 ซึ่งพารามิเตอร์ที่จะต้องกำหนดให้กับอัลกอริทึมนี้ คือ τ_{max} และ $[\mu\text{-}t]_{max}$ โดยมีเงื่อนไขว่า พารามิเตอร์ทั้งสองตัวนี้จะต้องกำหนดให้มีค่าน้อยกว่าจำนวนจุดข้อมูล n และจากตัวอย่างการคำนวณในรูปที่ 5.2 จะสังเกตเห็นว่า ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสองกับ n เป็นดังนี้

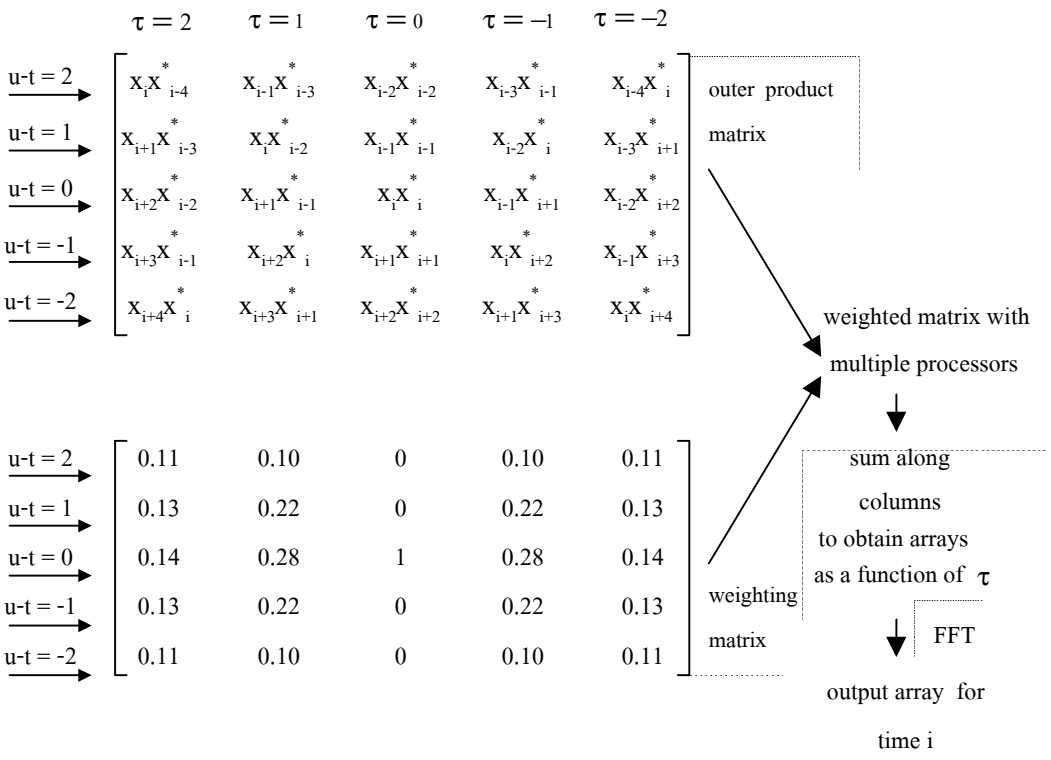
$$\tau_{max} = [\text{ì}\text{-}t]_{max} = \frac{n-1}{2} \qquad (5\text{-}21)$$

จากรูปที่ 5.2 สังเกตได้ว่า เมตริกซ์ถ่วงน้ำหนักจะเป็นเมตริกซ์ที่มีความสมมาตรกัน กล่าวคือ สมาชิกของหลักที่ $\tau = n$ จะเท่ากับแถวที่ $\tau = -n$ นอกจากนี้เมตริกซ์ผลคูณจากด้านนอกก็เป็นเมตริกซ์ที่สมมาตรเช่นกัน เนื่องจากสังยุคเชิงซ้อนของจำนวนจริงใดๆ ก็คือ จำนวนจริงนั้นๆ เช่น $x_5x^*_1 = x_1x^*_5$ ซึ่งเท่ากับ x_5x_1 หรือ x_1x_5 เป็นต้น ซึ่งทำให้ สมาชิกของหลักที่ $\tau = n$ จะเท่ากับ แถวที่

τ = -n เช่นเดียวกับเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก ดังนั้น สามารถที่จะคำนวณเมตริกซ์ทั้งสอง เพียงแถว $\tau = 0$ ถึง τ_{max} ซึ่งทำให้เวลาในการคำนวณลดลงได้อีก



รูปที่ 5.1 เมตริกซ์ผลคูณจากด้านนอก



รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการคำนวณการกระจายของชอย-วิลเลียมส์แบบรวดเร็ว

5.6.2 โปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์อย่างรวดเร็ว

สำหรับโปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์แบบรวดเร็วเพื่อคำนวณระยะทางให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้โปรมแกรมด้วย MATLAB โดยอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ โดยใช้อัลกอริทึมการกระจายของชอย-วิลเลียมส์อย่างรวดเร็วของ Barry

ขั้นตอนที่ 2 แสดงพื้นผิว 3 มิติของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ พร้อมทั้งแสดงคอนทัวร์ของการกระจายดังกล่าว

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจหาระนาบความถี่ที่ทำให้ค่าสัมประสิทธ์ของการกระจายมีค่ามากที่สุด และใช้วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนกับระนาบดังกล่าว เพื่อหาค่า ToF โดยความถี่ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายมากที่สุด คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของอัลทราโซนิกเซนเซอร์นั่นเอง

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณระยะทางด้วยค่า ToF

แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสำหรับวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเพื่อหาระยะทางด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์อย่างรวดเร็วในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 ส่วนรายละเอียดของโปรแกรมได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ.
ส่วนสำคัญของแผนภูมิที่แสดงในรูป 5.3 เป็น ดังนี้

ส่วนที่ 1 การกำหนดค่าเริ่มต้น ซึ่งประกอบไปด้วย τ_{max}, $[\mu\text{-}t]_{max}$ และ α ตัวแปรสองตัวแรกจะกำหนดโดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5-21) สำหรับพารามิเตอร์ α นั้น Choi และ Williams ได้เสนอบทความในปี ค.ศ. 1989 ว่า α ที่มีค่ามาก ($\alpha > 1$) จะเหมาะสำหรับวิเคราะห์สัญญาณที่มีแอมพลิจูดและความถี่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และ α ที่มีค่าน้อย ($\alpha < 1$) จะเหมาะสำหรับวิเคราะห์สัญญาณที่มีแอมพลิจูดและความถี่เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ส่วนช่วงที่เหมาะสมที่ Choi และWilliams ได้นำเสนอ คือ ช่วงตั้งแต่ 0.1 ถึง 10 ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้กำหนดให้ α มีค่าเท่ากับ 1 เหมือนดังในงานที่ปรากฏของ Choi และ Williams ในปีค.ศ. 1989

ส่วนที่ 2 การแปลงฟูริเยร์แบบรวดเร็วในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ใช้คำสั่ง fft ใน Signal Processing toolbox ของโปรแกรม MATLAB

ส่วนที่ 3 ความสัมพันธ์ของความถี่ชักตัวอย่าง (sampling frequency หรือ f_s) กับช่วงความถี่ (Δf_{CWD}) ที่ใช้สำหรับการแสดงพื้นผิว 3 มิติ ของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ และความถี่ที่มากที่สุดของสัญญาณ ($f_{max,CWD}$) ที่สามารถวิเคราะห์หาการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ได้ เป็นดังนี้

$$\Delta f_{CWD} = \frac{f_s}{2n} \quad (5\text{-}22)$$

$$f_{max,CWD} \leq \frac{f_s}{4} \quad (5\text{-}23)$$

เมื่อ

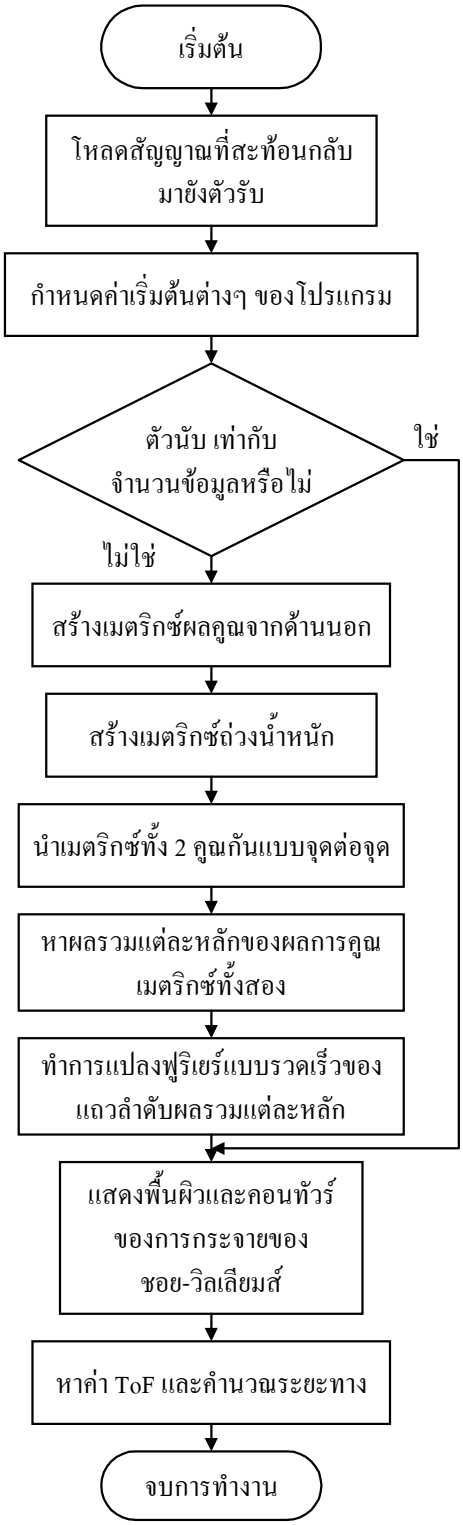
n คือ จำนวนจุดข้อมูล

5.6.3 ผลการทดสอบโปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์อย่างรวดเร็ว

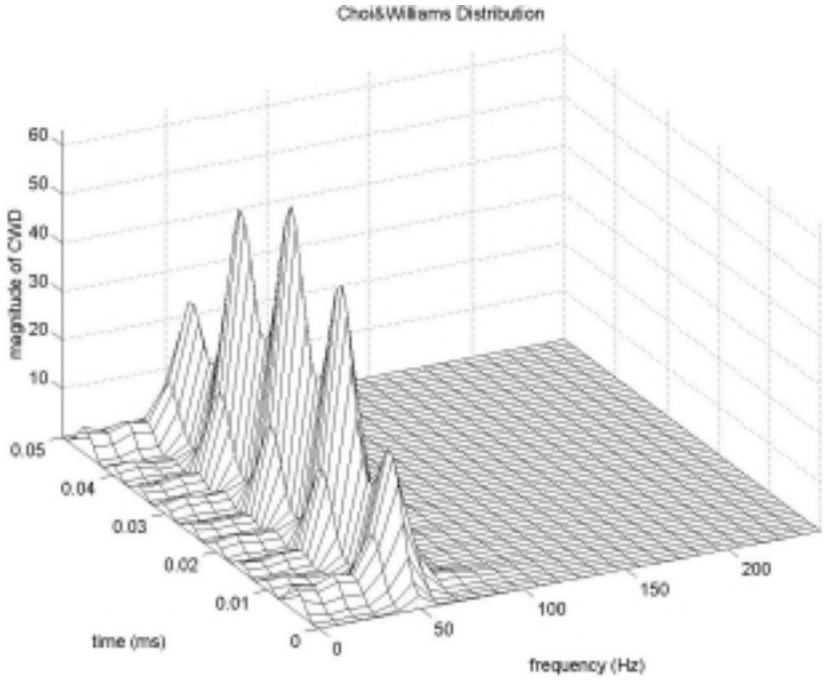
การทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อตีความผลและยืนยันความถูกต้องในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ดำเนินการโดยใช้โปรแกรมดังกล่าวหาการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ของสัญญาณไซน์ความถี่ต่างๆ ได้แก่ 50, 200 และ 290 Hz ซึ่งมี f_s = 1000 Hz โดยพบว่า สัญญาณไซน์ที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ได้แก่ 50 และ 200 Hz นั่นหมายถึง โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถหาการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ได้อย่างถูกต้อง ส่วนการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ของสัญญาณไซน์ความถี่ 290 Hz พบว่าความถี่ของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ไม่ตรงกับความถี่ของสัญญาณเนื่องจากความถี่ดังกล่าวมีค่ามากกว่า $f_{max,CWD}$

นอกจากนี้ยังได้ทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาหาการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ของสัญญาณที่มีความถี่ 50 และ 200 Hz รวมกัน เพื่อพิจารณาว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถแยกองค์ประกอบทางความถี่ของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ได้ถูกต้องหรือไม่ การทดสอบได้แสดงผลการกระจายที่ความถี่ 50 และ 200 Hz ได้อย่างถูกต้อง ผลลัพธ์จากการทดสอบต่างๆ ได้รับการแสดงไว้ด้วยพื้นผิว 3 มิติในรูปที่ 5.4-5.7

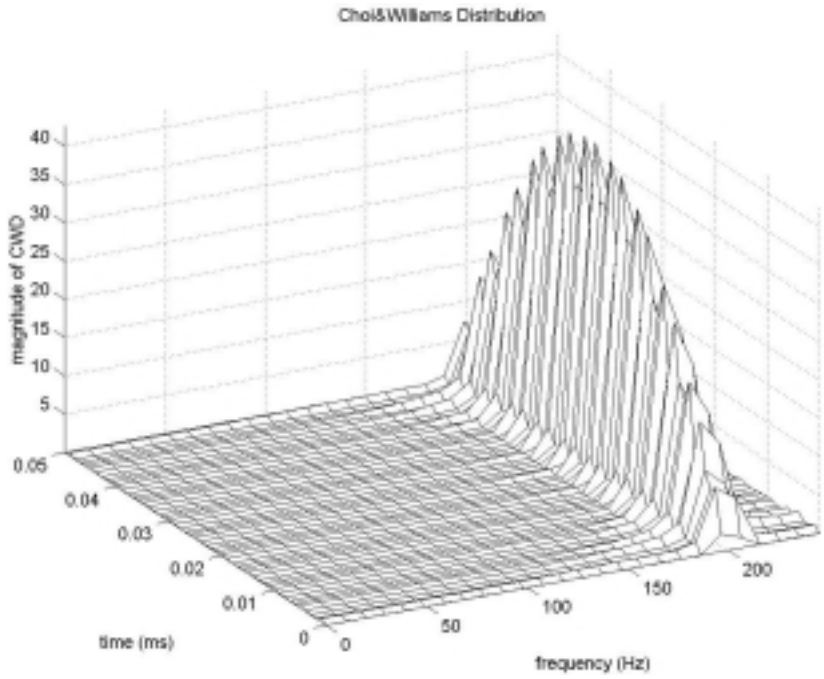
สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ได้แสดงเป็นแผนภาพคอนทัวร์ของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ และระนาบที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของชอย-วิลเลียมส์มากที่สุดไว้ในรูปที่ 5.8-5.13 ซึ่งแผนภาพคอนทัวร์และระนาบดังกล่าวเป็นของระยะทาง 6, 18 และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยพบว่า ระนาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของชอย-วิลเลียมส์สูงสุดเกิดขึ้นที่ความถี่ 39.8 kHz ซึ่งประมาณได้ว่าเป็นความถี่เรโซแนนซ์ของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับนั่นเอง



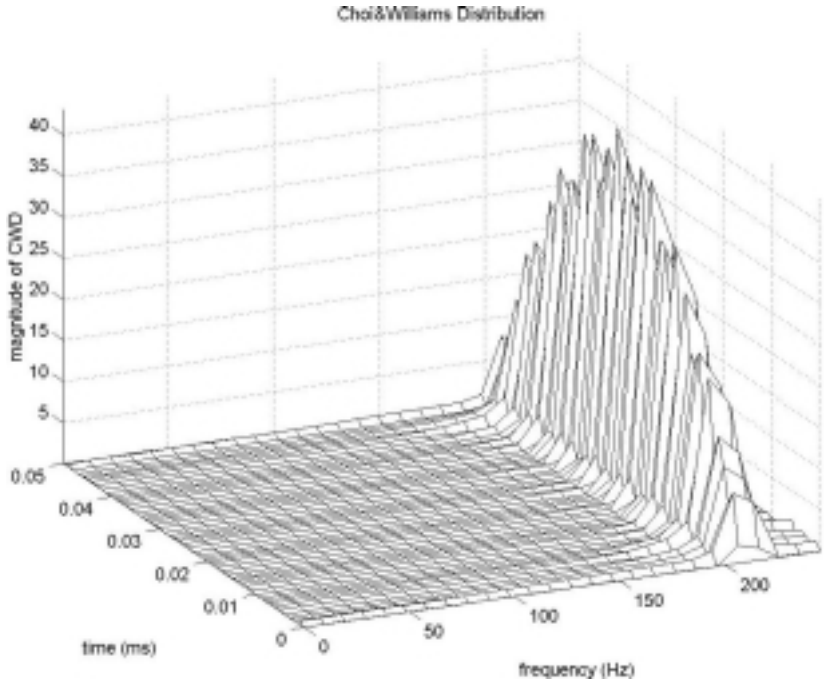
รูปที่ 5.3 แผนภูมิการทำงานของการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์



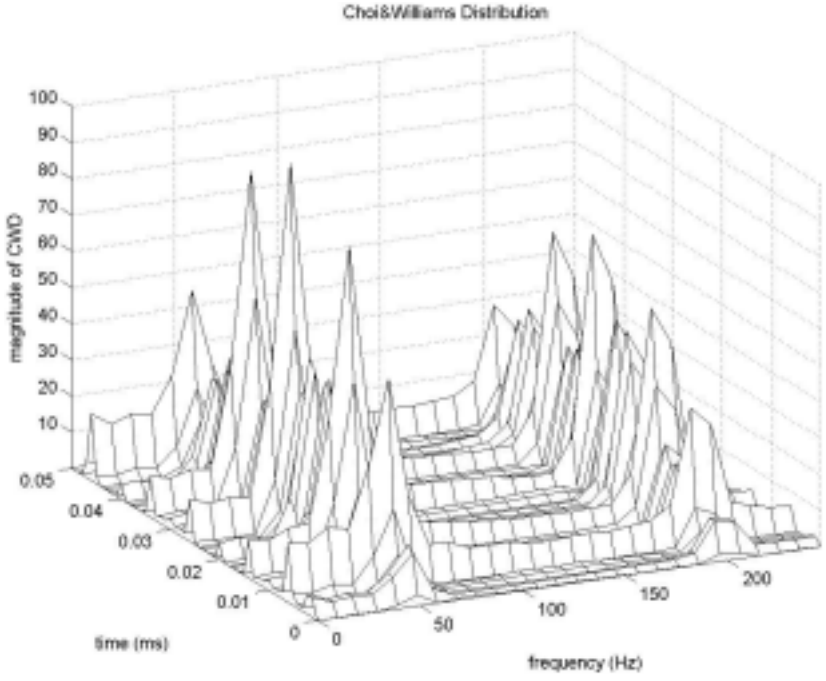
รูปที่ 5.4 CWD ของสัญญาณไซน์ 50 Hz



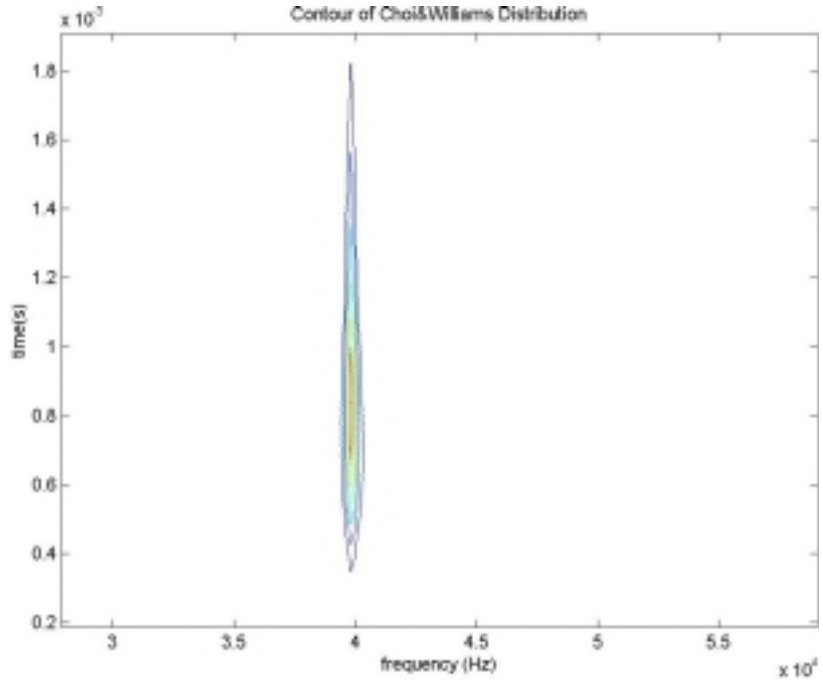
รูปที่ 5.5 CWD ของสัญญาณไซน์ 200 Hz



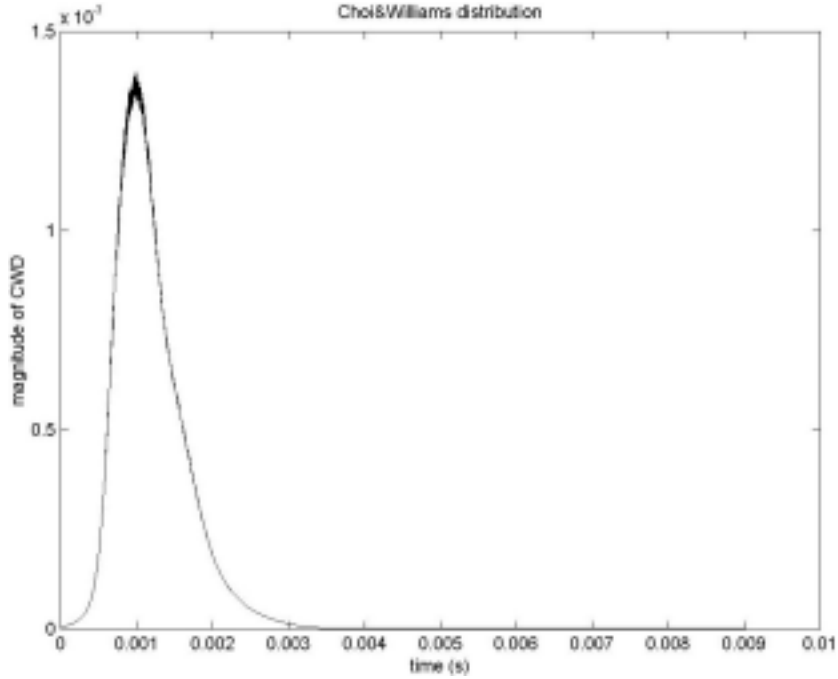
รูปที่ 5.6 CWD ของสัญญาณไซน์ 290 Hz



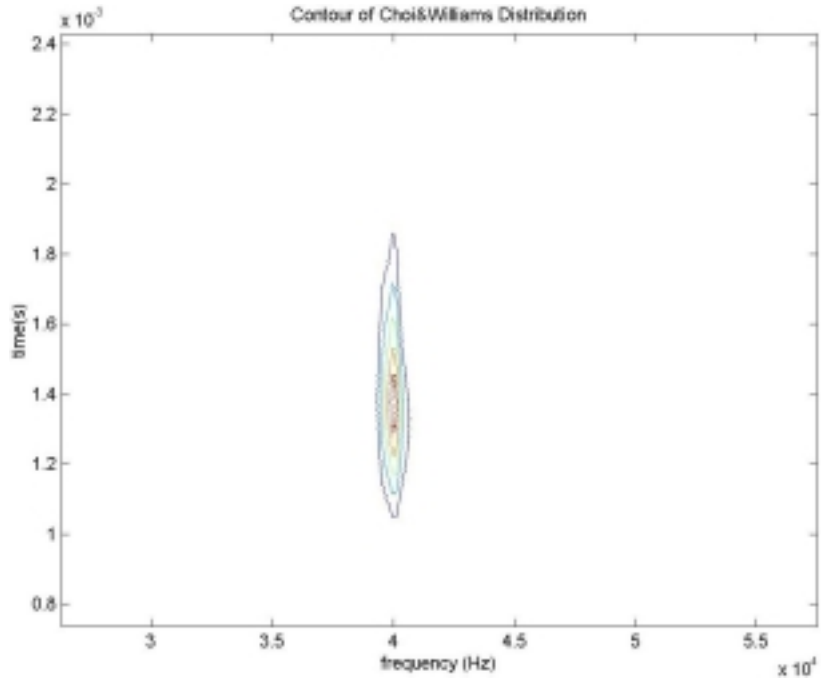
รูปที่ 5.7 CWD ของสัญญาณไซน์ 50 Hz + 200 Hz



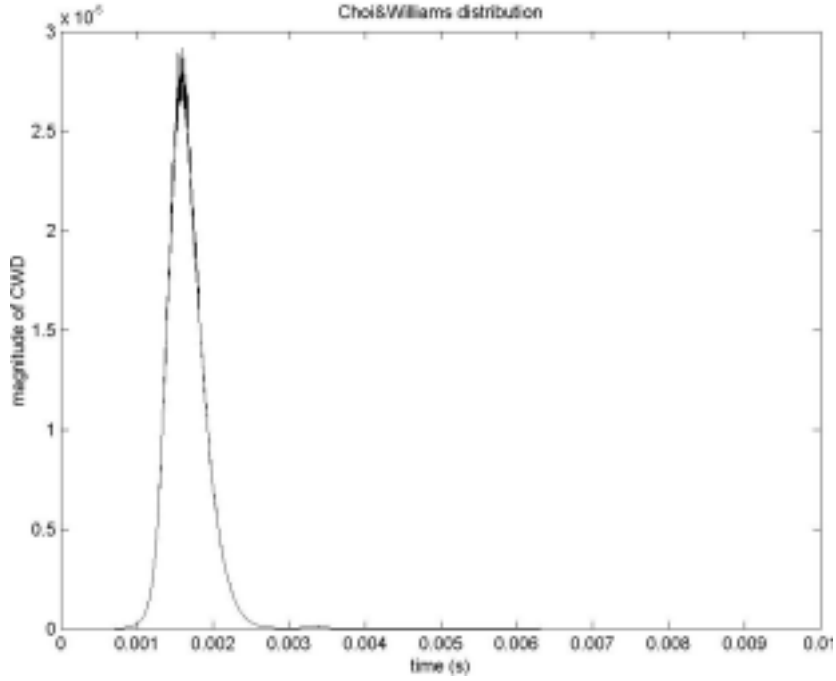
รูปที่ 5.8 แผนภาพคอนทัวร์ของ CWD ของระยะทาง 6 เซนติเมตร



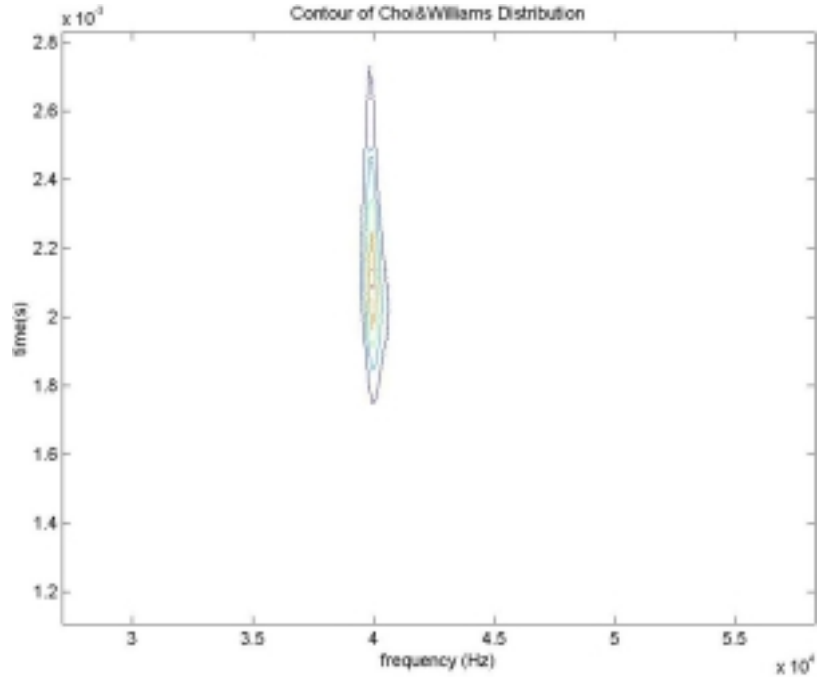
รูปที่ 5.9 ระนาบของ CWD ของระยะทาง 6 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุด อยู่ที่ความถี่ 39.8 kHz



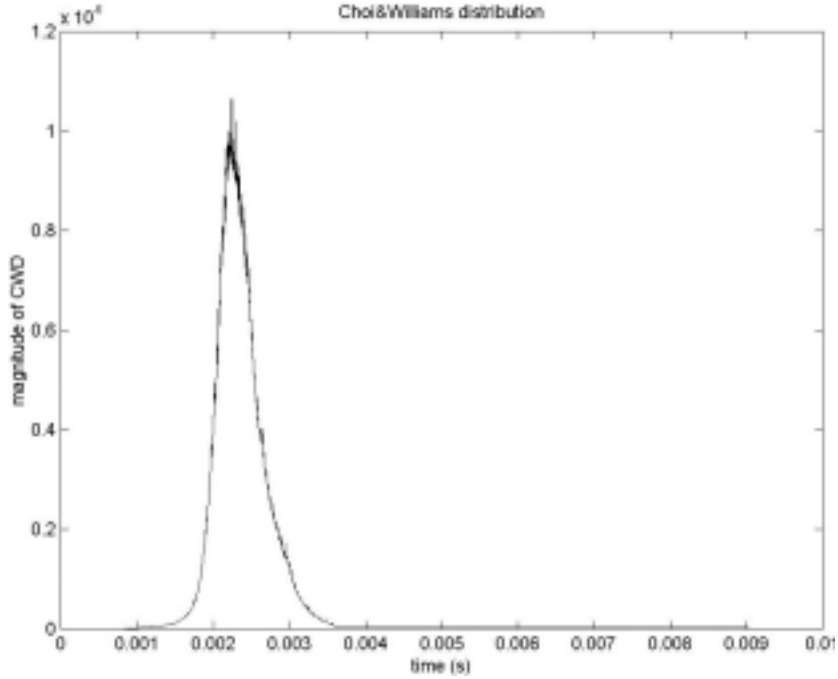
รูปที่ 5.10 แผนภาพคอนทัวร์ของ CWD ของระยะทาง 18 เซนติเมตร



รูปที่ 5.11 ระนาบของ CWD ที่ระยะทาง 18 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุด อยู่ที่ความถี่ 39.8 kHz



รูปที่ 5.12 แผนภาพคอนทัวร์ของ CWD ของระยะทาง 30 เซนติเมตร



รูปที่ 5.13 ระนาบของ CWD ของระยะทาง 30 เซนติเมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุด อยู่ที่ความถี่ 39.8 kHz

5.7 สรุป

ในบทนี้ ได้นำเสนอการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ โดยได้กล่าวถึงรายละเอียดของเทคนิคการกระจายต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย การกระจายทางเวลา-ความถี่ การกระจายของวีกเนอร์-วิลล์ การกระจายกลุ่มโคเฮน การกระจายของชอย-วิลเลียมส์ และการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยอาศัยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ด้วยการคำนวณแบบรวดเร็ว พร้อมด้วยผลทดสอบอัลกอริทึมและโปรแกรมของวิธีการดังกล่าว และจากแผนภาพคอนทัวร์ของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ พบว่า ระนาบที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายที่มีค่ามากที่สุดจะมีความถี่ 39.8 kHz ซึ่งก็คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของอัลทราโซนิกเซนเซอร์ และจะนำเอาระนาบดังกล่าวไปใช้กับวิธีตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดาเพื่อหาค่า ToF สำหรับคำนวณระยะทางต่อไป โดยผลของการวัดระยะทางแสดงไว้ในบทที่ 6

บทที่ 6
ผลและอภิปราย

6.1 บทนำ

การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ทั้งสามวิธีที่ได้อธิบายผ่านมาแล้ว ให้ความแม่นยำในผลการวัดแตกต่างกันไป ซึ่งในบทนี้ได้แสดงการเปรียบเทียบผลการวัดระยะทางของแต่ละวิธี พร้อมทั้งคัดเลือกวิธีที่ดีที่สุดเพื่อทำการชดเชยผลกระทบของอุณหภูมิและทำการปรับเทียบ เนื้อหาของบทนี้จึงกล่าวถึง ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ การอภิปรายเปรียบเทียบผลของทั้งสามวิธี รวมไปถึงการชดเชยผลกระทบของอุณหภูมิและการปรับเทียบ

6.2 ผลการทดสอบการวัดระยะทาง

การทดสอบการวัดระยะทางเป็นการวัดระยะทางในแนวตั้งฉากระหว่างชุดอัลทราโซนิกเซนเซอร์กับวัตถุเป้าหมายซึ่งเป็นวัสดุที่ทำจากพลาสติกขนาด 20x30 เซนติเมตร หนา 50 มิลลิเมตร ที่กำหนดระยะทางที่ทราบค่าแน่นอนเก้าตำแหน่ง กล่าวคือ 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 และ 30 เซนติเมตร ซึ่งแต่ละตำแหน่งได้ทำการเก็บข้อมูลทั้งหมดหกรอบ ซึ่งหมายถึง ขาไป 3 ครั้ง และขากลับ 3 ครั้ง สำหรับผลการวัดระยะทางที่แสดงในบทนี้จะเป็นค่าเฉลี่ยของการเก็บข้อมูลทั้งหกครั้ง ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

6.2.1 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด

การวัดระยะทางด้วยวิธีนี้สามารถตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนได้เองโดยอัตโนมัติ ซึ่งให้ผลของการวัดระยะทางดังตารางที่ 6.1 โดยค่า FSE คือ ค่าความผิดพลาดที่เรียกว่า full-scale error แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\text{FSE} = \text{abs}\frac{(\text{calc.} - \text{meas.})}{\text{full scale}} \times 100 \qquad (6\text{-}1)$$

โดย

calc. คือ ระยะทางที่คำนวณได้

meas. คือ ระยะทางที่ทำการวัด

full scale คือ ระยะที่มากที่สุดที่ทำการวัดในการทดลอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 เซนติเมตร

ส่วนระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนนั้นเป็นเปอร์เซ็นต์ของแอมพลิจูดแต่ละจุดเทียบกับแอมพลิจูดที่มีค่ามากที่สุดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับของแต่ละระยะทาง จากตารางที่ 6.1 พบว่า การวัดระยะทางด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด ให้ FSE น้อยที่สุดอยู่ที่ 0.149% และมากที่สุดอยู่ที่ 1.148% ซึ่งเป็นผลของการวัดระยะทางที่ 15 และ 21 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากจีนเนติกอัลกอริทึมน้อยที่สุดอยู่ที่ 0.00114% และมากที่สุดอยู่ที่ 0.00339% โดยจะสังเกตเห็นว่า ค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนของแต่ละระยะทางจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจาก ค่าระดับดังกล่าวได้จากการค้นหาด้วยจีนเนติกอัลกอริทึมซึ่งมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่จะนำไปสู่การให้ค่า ToF และระยะทางแม่นยำมากที่สุด ดังนั้น ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่า ToF และระยะทางที่แม่นยำที่สุด ของแต่ละระยะทางจึงมีค่าไม่เท่ากัน

ตารางที่ 6.1 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด

ระยะทาง (cm)	ผลการวัดระยะทาง			
	ToF (sec.)	ระยะทาง (cm)	FSE (%)	ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (%)
6	353.314×10^{-6}	6.134	0.447	0.00127
9	523.483×10^{-6}	9.087	0.291	0.00114
12	695.485×10^{-6}	12.073	0.244	0.00128
15	866.632×10^{-6}	15.045	0.149	0.00154
18	1.042×10^{-3}	18.087	0.289	0.00167
21	1.230×10^{-3}	21.344	1.148	0.00264
24	1.392×10^{-3}	24.170	0.568	0.00298
27	1.564×10^{-3}	27.156	0.520	0.00339
30	1.734×10^{-3}	30.103	0.342	0.00305

6.2.2 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต

การวัดระยะทางด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตทั้งสามเวฟเล็ตแม่ กล่าวคือ มอร์เล็ตเวฟเล็ต แมกซิกันแฮทเวฟเล็ต และคอยเฟล็ตเวฟเล็ต แสดงดังตารางที่ 6.2 โดยจะพบว่า มอร์เล็ตเวฟเล็ต ให้ผลการวัดระยะทางแม่นยำที่สุด กล่าวคือ ให้ค่าความผิดพลาดต่ำที่สุดในเวฟเล็ตแม่ทั้งสามชนิด ดังแสดงไว้ในแผนภูมิแท่งรูปที่ 6.1 และค่าความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ 0.222% เกิดขึ้นในกรณีของการใช้มอร์เล็ตเวฟเล็ต ในขณะที่ค่าความผิดพลาดสูงสุดของแมกซิกันแฮทเวฟเล็ตและคอยเฟล็ตเวฟเล็ต มี

ค่าเท่ากับ 0.241% และ 0.243% ตามลำดับ จึงอาจกล่าวได้ว่า มอร์เล็ตเวฟเล็ตให้ผลดีที่สุดต่อการใช้งานวัดระยะทางนี้

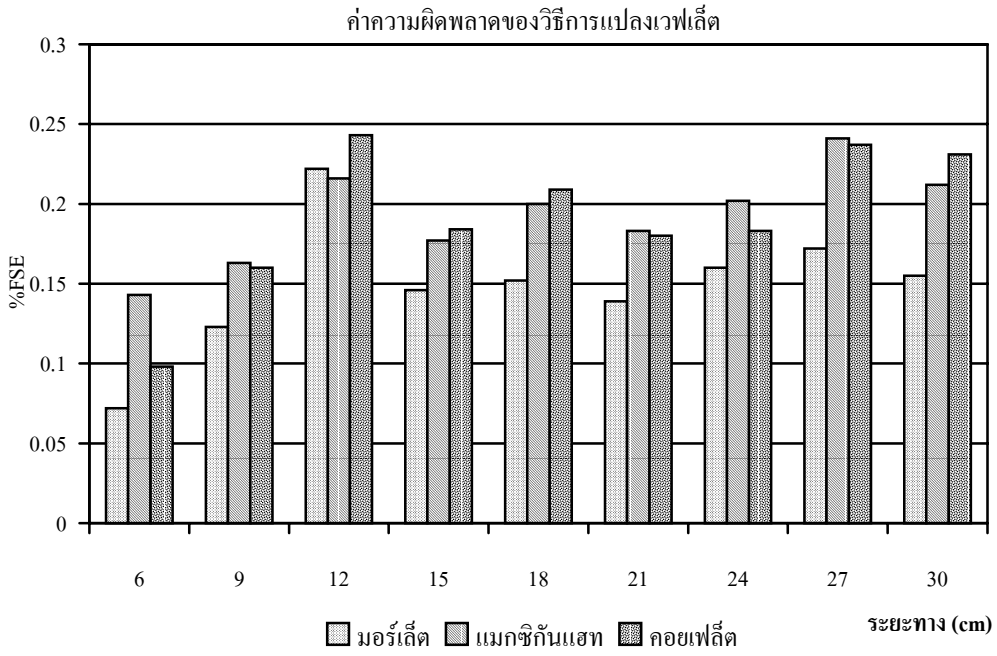
เนื่องจากค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับบางตำแหน่งในช่วงเวลาจาก 0 จนถึง ToF ดังในรูปที่ 3.12 มีค่าเท่ากับ 2 มิลลิโวลต์ ซึ่งเมื่อนำสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับไปทำการแปลงเวฟเล็ตจะพบว่า เปอร์เซ็นต์ของค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ที่มากที่สุดในช่วงบริเวณดังกล่าวมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.381% ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนสำหรับวิธีการแปลงเวฟเล็ตทั้งสามเวฟเล็ตแม่ไว้ที่ 2.5% เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการวัดระยะทาง

ตารางที่ 6.2 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตทั้งสามเวฟเล็ตแม่

ระยะทาง (cm)	เวฟเล็ตแม่	ผลการวัดระยะทาง			
		ToF (sec.)	ระยะทาง (cm)	FSE (%)	ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (%)
6	มอร์เล็ต	346.874×10^{-6}	6.022	0.072	2.5
	แมกซิกันแฮท	348.091×10^{-6}	6.043	0.143	2.5
	คอยเฟล็ต	347.318×10^{-6}	6.029	0.098	2.5
9	มอร์เล็ต	520.557×10^{-6}	9.037	0.123	2.5
	แมกซิกันแฮท	521.256×10^{-6}	9.049	0.163	2.5
	คอยเฟล็ต	521.201×10^{-6}	9.048	0.160	2.5
12	มอร์เล็ต	695.077×10^{-6}	12.067	0.222	2.5
	แมกซิกันแฮท	694.985×10^{-6}	12.065	0.216	2.5
	คอยเฟล็ต	695.441×10^{-6}	12.073	0.243	2.5
15	มอร์เล็ต	866.587×10^{-6}	15.044	0.146	2.5
	แมกซิกันแฮท	867.111×10^{-6}	15.053	0.177	2.5
	คอยเฟล็ต	867.226×10^{-6}	15.055	0.184	2.5
18	มอร์เล็ต	1.040×10^{-3}	18.046	0.152	2.5
	แมกซิกันแฮท	1.040×10^{-3}	18.060	0.200	2.5
	คอยเฟล็ต	1.040×10^{-3}	18.062	0.209	2.5
21	มอร์เล็ต	1.212×10^{-3}	21.042	0.139	2.5
	แมกซิกันแฮท	1.213×10^{-3}	21.055	0.183	2.5
	คอยเฟล็ต	1.212×10^{-3}	21.054	0.180	2.5
24	มอร์เล็ต	1.385×10^{-3}	24.048	0.160	2.5
	แมกซิกันแฮท	1.386×10^{-3}	24.061	0.202	2.5
	คอยเฟล็ต	1.386×10^{-3}	24.055	0.183	2.5

ตารางที่ 6.2 (ต่อ)

ระยะทาง (cm)	เวฟเล็ตแม่	ผลการวัดระยะทาง			
		ToF (sec.)	ระยะทาง (cm)	FSE (%)	ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (%)
27	มอร์เล็ต	1.557×10^{-3}	27.051	0.172	2.5
	แมกซิกันแฮท	1.557×10^{-3}	27.072	0.241	2.5
	คอยเฟล็ต	1.559×10^{-3}	27.071	0.237	2.5
30	มอร์เล็ต	1.731×10^{-3}	30.046	0.155	2.5
	แมกซิกันแฮท	1.732×10^{-3}	30.063	0.212	2.5
	คอยเฟล็ต	1.732×10^{-3}	30.069	0.231	2.5



รูปที่ 6.1 แผนภูมิแสดงค่าความผิดพลาดของการวัดระยะทางด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตทั้งสามเวฟเล็ตแม่

6.2.3 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์

การวัดระยะทางด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ แสดงไว้ในตารางที่ 6.3 โดยพบว่า ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดจำกัดอยู่ที่ 0.095% และมากที่สุดจำกัดอยู่ที่ 0.280% และเนื่องจากวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์นี้ได้มีการใช้วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดาเพื่อหาค่า ToF ดัง

เช่นวิธีการแปลงเวฟเล็ต ซึ่งจะต้องทำการเปรียบเทียบผลการวัดระยะทางกันทั้ง 2 วิธี ดังนั้น จึงต้องกำหนดค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนให้มีค่าเท่ากัน กล่าวคือ 2.5%

6.2.4 ผลการคัดเลือกวิธีการวัดระยะทางที่ดีที่สุด

ผลการวัดระยะทางและแผนภูมิแสดงค่าความผิดพลาดของการวัดระยะทางทั้ง 3 วิธี กล่าวคือ วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด หรือ OT วิธีการแปลงเวฟเล็ตหรือ WT และวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ หรือ CWD แสดงไว้ในตารางที่ 6.4 และรูปที่ 6.2 ตามลำดับ โดยวิธีการแปลงเวฟเล็ตนั้นนำเพียงการแปลงเวฟเล็ตที่ใช้มอร์เล็ตเวฟเล็ตเท่านั้นนำมาเปรียบเทียบ เนื่องจากเวฟเล็ตแม่ดังกล่าวให้ผลดีที่สุดสำหรับวิธีการแปลงเวฟเล็ต

ตารางที่ 6.3 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์

ระยะทาง (cm)	ผลการวัดระยะทาง			
	ToF (sec.)	ระยะทาง (cm)	FSE (%)	ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (%)
6	347.264×10^{-6}	6.028	0.095	2.5
9	522.760×10^{-6}	9.075	0.251	2.5
12	695.620×10^{-6}	12.076	0.253	2.5
15	867.561×10^{-6}	15.061	0.203	2.5
18	1.042×10^{-3}	18.081	0.272	2.5
21	1.212×10^{-3}	21.044	0.147	2.5
24	1.385×10^{-3}	24.050	0.154	2.5
27	1.560×10^{-3}	27.082	0.280	2.5
30	1.731×10^{-3}	30.061	0.205	2.5

ตารางที่ 6.4 ผลการวัดระยะทางทั้งสามวิธี

ระยะทาง (cm)	วิธี	ผลการวัดระยะทาง			
		ToF (sec.)	ระยะทาง (cm)	FSE (%)	ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (%)
6	OT	353.314×10^{-6}	6.134	0.447	0.00127
	WT	346.874×10^{-6}	6.022	0.072	2.5
	CWD	347.264×10^{-6}	6.028	0.095	2.5
9	OT	523.483×10^{-6}	9.087	0.291	0.00114
	WT	520.557×10^{-6}	9.037	0.123	2.5
	CWD	522.760×10^{-6}	9.075	0.251	2.5

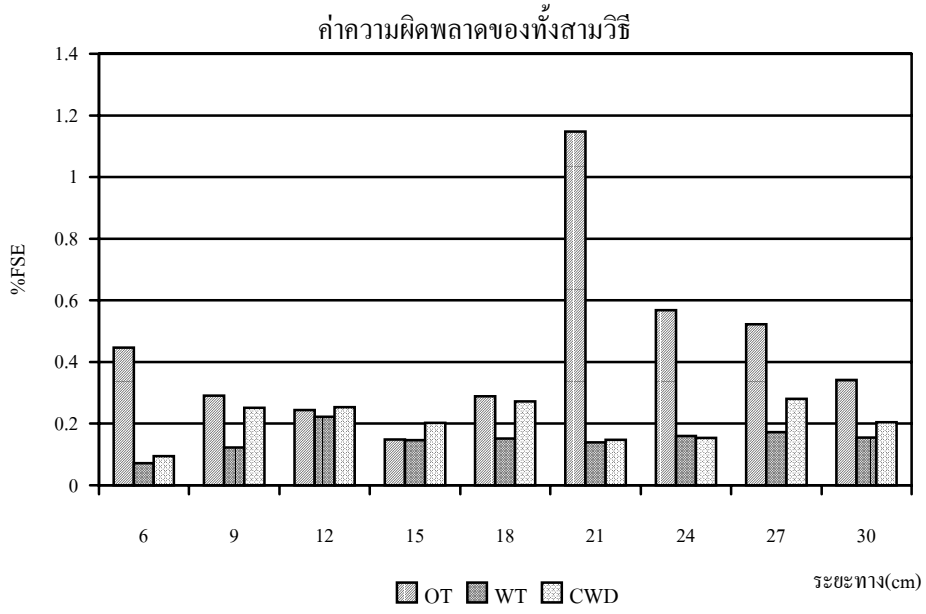
ตารางที่ 6.4 (ต่อ)

ระยะทาง (cm)	วิธี	ผลการวัดระยะทาง			
		ToF (sec.)	ระยะทาง (cm)	FSE (%)	ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (%)
12	OT	695.485×10^{-6}	12.073	0.244	0.00128
	WT	695.077×10^{-6}	12.067	0.222	2.5
	CWD	695.620×10^{-6}	12.076	0.253	2.5
15	OT	866.632×10^{-6}	15.045	0.149	0.00154
	WT	866.587×10^{-6}	15.044	0.146	2.5
	CWD	867.561×10^{-6}	15.061	0.203	2.5
18	OT	1.042×10^{-3}	18.087	0.289	0.00167
	WT	1.040×10^{-3}	18.046	0.152	2.5
	CWD	1.042×10^{-3}	18.081	0.272	2.5
21	OT	1.230×10^{-3}	21.344	1.148	0.00264
	WT	1.212×10^{-3}	21.042	0.139	2.5
	CWD	1.212×10^{-3}	21.044	0.147	2.5
24	OT	1.392×10^{-3}	24.170	0.568	0.00298
	WT	1.385×10^{-3}	24.048	0.160	2.5
	CWD	1.385×10^{-3}	24.050	0.154	2.5
27	OT	1.564×10^{-3}	27.156	0.520	0.00339
	WT	1.557×10^{-3}	27.051	0.172	2.5
	CWD	1.560×10^{-3}	27.082	0.280	2.5
30	OT	1.734×10^{-3}	30.103	0.342	0.00305
	WT	1.731×10^{-3}	30.046	0.155	2.5
	CWD	1.731×10^{-3}	30.061	0.205	2.5

จากตารางที่ 6.4 และแผนภูมิในรูปที่ 6.2 เมื่อพิจารณาจากค่าความผิดพลาดจะพบว่า วิธีที่แม่นยำที่สุด คือ วิธีการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ต เนื่องจากมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในสามวิธี และค่าความผิดพลาดมากที่สุดจำกัดอยู่ที่ 0.222%

แม้ว่าวิธีการแปลงเวฟเล็ตจะมีความแม่นยำที่สุด แต่วิธีที่เหลือก็ยังมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป โดยข้อดีของวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด คือ สามารถตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนได้อย่างอัตโนมัติ แต่ด้วยความซับซ้อนของจีนเนติกอัลกอริทึมจึงทำให้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างนาน อีกทั้งยังไม่อ่อนตัว เนื่องจากปัญหาที่กล่าวมาในบทที่ 3 กล่าวคือ จะต้องใช้ฟังก์ชันหน้าต่างมาคูณกับสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ ซึ่งถ้ากำหนดช่วงของฟังก์ชันหน้าต่างที่มีแอม

พลิจูดเท่ากับ 0 ไม่เหมาะสม การวัดระยะทางก็อาจมีความแม่นยำลดลง ซึ่งนับว่าเป็นจุดอ่อนหรือข้อเสียของวิธีดังกล่าว



รูปที่ 6.2 แผนภูมิแสดงค่าความผิดพลาดของการวัดระยะทางทั้งสามวิธี

สำหรับการหาระยะทางด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ตและวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์จะมีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ จะต้องหาการแปลงหรือการกระจายของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับก่อน แล้วจึงใช้วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดากับระนาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงหรือการกระจายมากที่สุด ซึ่งระนาบที่ได้จากวิธีของชอย-วิลเลียมส์จะมีความเหมาะสมกว่า เพราะมีความต่อเนื่องทั้งระนาบ ในขณะที่ระนาบจากวิธีการแปลงเวฟเล็ตบางช่วงมีค่าสัมประสิทธิ์ลดลงอย่างรวดเร็วอันอาจเกิดเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของช่วงปลายทั้งสองข้างของเวฟเล็ตแม่ นอกจากนี้ถ้ากำหนดให้ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนลงให้น้อยกว่า 2.5% ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์น่าจะมีความแม่นยำมากขึ้น แต่ข้อเสียที่สำคัญอีกประการหนึ่งของวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ คือ การประมวลผลใช้เวลาที่ยาวนานแม้ว่าจะอาศัยการคำนวณอย่างรวดเร็วแล้วก็ตาม เนื่องจากอัลกอริทึมที่คำนวณอย่างรวดเร็วนั้นอาศัยการคำนวณแบบเมตริกซ์และการประมวลผลแบบขนาน แต่อัลกอริทึมของวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยเพียงการคำนวณแบบเมตริกซ์โดยโปรแกรม MATLAB ซึ่งใช้การคำนวณแบบลูปแทน

การประมวลผลแบบขนาน จึงทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลยาวนาน

6.3 การชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิ

ผลการวัดระยะทางเมื่อนำชุดอัลทราโซนิกเซนเซอร์ไปทดลองวัดระยะทางภายนอกสภาวะควบคุมเปรียบเทียบกับในสภาวะควบคุมที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 6.5 ซึ่งผลการวัดระยะทางดังกล่าวได้จากวิธีการแปลงเวฟเล็ตโดยใช้มอร์เล็ตเวฟเล็ต

ตารางที่ 6.5 ผลการวัดระยะทางภายนอกสภาวะควบคุม

ระยะทาง (cm)	ToF (sec)		อุณหภูมิ (ºC)	ระยะทางนอกสภาวะควบคุม (cm)	Δt (sec)
	ในสภาวะควบคุม	นอกสภาวะควบคุม			
6	346.874×10^{-6}	345.153×10^{-6}	33	5.992	1.721×10^{-6}
9	520.557×10^{-6}	515.886×10^{-6}	33	8.956	4.671×10^{-6}
12	695.077×10^{-6}	687.164×10^{-6}	34	11.929	7.913×10^{-6}
15	866.587×10^{-6}	854.969×10^{-6}	35	14.842	11.618×10^{-6}
18	1.040×10^{-3}	1.025×10^{-3}	35	17.794	$0.015. \times 10^{-3}$
21	1.212×10^{-3}	1.197×10^{-3}	35	20.800	0.015×10^{-3}
24	1.385×10^{-3}	1.375×10^{-3}	35	23.870	0.010×10^{-3}
27	1.558×10^{-3}	1.537×10^{-3}	35	26.682	0.021×10^{-3}
30	1.731×10^{-3}	1.707×10^{-3}	35	29.634	0.024×10^{-3}

จากตารางจะพบว่า ระยะทางภายนอกสภาวะควบคุมจะมีค่าน้อยกว่าระยะทางจริง เนื่องจากนอกสภาวะควบคุม อุณหภูมิสภาพแวดล้อมสูงกว่าในสภาวะควบคุมคลื่นเหนือเสียงจึงเดินทางได้เร็วขึ้น ดังมีรายละเอียดข้อมูลแสดงไว้ในตารางที่ 6.2 ถ้านำค่าอุณหภูมิดังกล่าวไปใช้ประกอบคำนวณระยะทาง จะทำให้ได้ผลการคำนวณระยะทางแม่นยำมากขึ้น ในการใช้งานจริงมีความจำเป็นที่จะต้องวัดอุณหภูมิอยู่ตลอดเวลา ถ้าการประยุกต์นั้นต้องการความแม่นยำสูง ในที่นี้จะได้แสดงแนวทางการชดเชยผลของอุณหภูมิในขั้นต้น ที่ดำเนินการแบบออฟไลน์ (off-line) ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลในสภาวะควบคุมที่ทราบอุณหภูมิแน่นอน โดยอาจใช้แนวทางปรับชดเชยดังนี้

1. พิจารณาความสัมพันธ์ของข้อมูลชุดนอกสภาวะควบคุม โดยกำหนดให้แกน x เป็น ToF และแกน y เป็นระยะทาง จะพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$Y_{out} = m \times ToF + c \qquad (6\text{-}1)$$

เมื่อ

Y_{out} คือ ระยะทางที่คำนวณจาก ToF นอกสภาวะควบคุมโดยคำนวณได้จากสมการที่(2-12)

m คือ ความชันของสมการเส้นตรง

c คือ จุดตัดบนแกน y

เนื่องจากจำนวนข้อมูลจำกัดและจากการกระจายของข้อมูลที่นำมาเขียนขึ้นเป็นกราฟดังรูป 6.3 เห็นได้ว่าข้อมูลนั้นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง จึงใช้การประมาณความชันแบบธรรมดาตามเทคนิคของการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งความชันของสมการเส้นตรงดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 1.736 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ -2.190×10^{-6} ดังนั้นอาจเขียนแสดงสมการที่ (6-1) ได้ใหม่ว่า

$$Y_{out} = (1.735\times10^{4})\times \mathrm{ToF} - 2.190\times10^{-6} \qquad (6\text{-}2)$$

เนื่องจากระยะทางที่คำนวณโดยอาศัยสมการที่ (2-12) มีหน่วยเป็นเมตร และความเร็วมีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที แต่ระยะทางที่ใช้อ้างอิงในการชดเชยอุณหภูมิมีหน่วยเป็นเซนติเมตร ดังนั้นเมื่อทำการแปลงหน่วยระยะทางให้เป็นเซนติเมตร จะต้องนำ 10^4 มาคูณ ทำให้ความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลนอกสภาวะควบคุมเป็นดังสมการที่ (6-2)

2. พิจารณากราฟความสัมพันธ์ของระยะทางที่ควรจะเป็นจริง Y_{in} ซึ่งจะใช้เป็นสมการที่ใช้อ้างอิง โดยระยะทางที่ควรจะเป็นจริง คือ ระยะทางจริงในแต่ละตำแหน่งที่วัดนั่นเอง โดยมีความชันและจุดตัดแกน y เป็น 1.757 และ -6.437×10^{-6} ตามลำดับ ดังนั้นสมการที่ใช้อ้างอิงเป็นดังนี้

$$Y_{in} = (1.757\times10^{4})\times \mathrm{ToF} - 6.437\times10^{-6} \qquad (6\text{-}3)$$

3. หาสมการของความผิดพลาด เพื่อที่จะนำมาใช้ในการปรับแก้ระยะทาง โดยที่

$$\begin{aligned} \text{error} &= Y_{out} - Y_{in} \\ &= (1.736\times10^{4}\times \mathrm{ToF} - 2.190\times10^{-6}) - \\ &\quad (1.757\times10^{4}\times \mathrm{ToF} - 6.437\times10^{-6}) \\ \text{error} &= -(0.021\times10^{2}\times \mathrm{ToF}) + 4.247\times10^{-6} \quad \text{เซนติเมตร} \end{aligned}$$

4. สมการที่แสดงระยะทางที่มีการชดเชยอุณหภูมิแล้วเป็นดังนี้

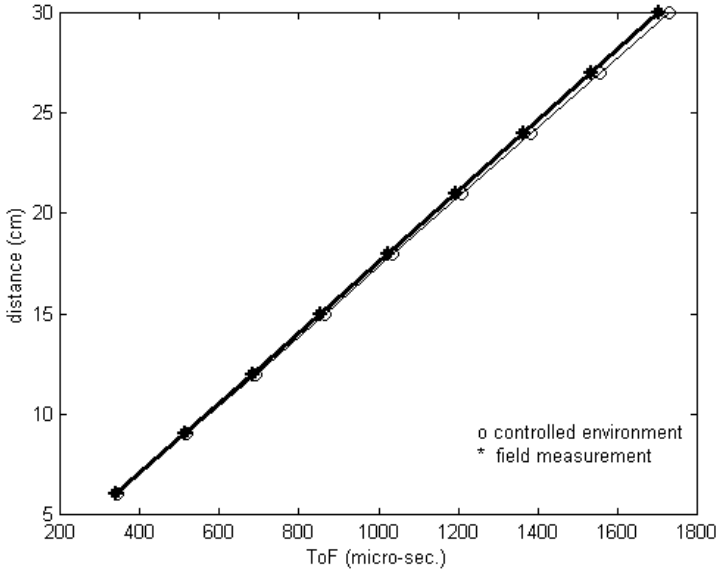
$$Y = Y_{control} - error$$

$$= (173.6 + 0.021 \times 10^{4}) \times ToF - 4.247 \times 10^{-6} \quad (6\text{-}4)$$

เมื่อ

$Y_{control}$คือ ระยะทางที่คำนวณจากอุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและ ToF ของทั้งภายใน (controlled environment) และภายนอกสภาวะควบคุม (field measurement) และระยะทางในกรณีภายนอกสภาวะควบคุมที่ได้รับการปรับแก้แล้วพร้อมด้วยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.3 และตารางที่ 6.6 ตามลำดับ โดยจากตารางจะพบว่า ระยะทางที่ได้ปรับแก้แล้วมีความแม่นยำมากขึ้น โดยค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดอยู่ที่ 0.017% และมากที่สุดอยู่ที่ 0.529%



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะทางและ ToF ทั้งภายในและภายนอกสภาวะควบคุม

ตารางที่ 6.6 ผลการวัดระยะทางที่ได้รับการปรับแก้แล้ว

ระยะทาง (cm)	ระยะทางนอกสภาวะควบคุม (cm)	ระยะทางเมื่อปรับแก้แล้ว (cm)	%FSE
6	5.992	6.064	0.214
9	8.956	9.064	0.214
12	11.929	12.073	0.245

ตารางที่ 6.6 (ต่อ)

ระยะทาง (cm)	ระยะทางนอกสภาวะควบคุม (cm)	ระยะทางเมื่อปรับแก้แล้ว (cm)	%FSE
15	14.842	15.022	0.073
18	17.794	18.009	0.031
21	20.800	21.031	0.104
24	23.870	24.159	0.529
27	26.682	27.005	0.017
30	29.634	29.992	0.027

6.4 การปรับเทียบ

การปรับเทียบเพื่อตรวจสอบถึงความเที่ยงตรงและแม่นยำในการวัด อันได้แก่ ฮิสเทอร์รีซีส ความเป็นเชิงเส้น ความแม่นยำ และความสามารถในการวัดซ้ำๆ ซึ่งดำเนินการดังต่อไปนี้

- *ฮิสเทอร์รีซีส* ระยะทางขาไปและขากลับที่ได้จากวิธีการแปลงเวฟเล็ตแสดงได้ในตารางที่ 6.6 และกราฟฮิสเทอร์รีซีสของการวัดระยะทางทั้งขาไปและขากลับในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้แสดงได้ในรูปที่ 6.4

จากรูปที่ 6.4 จะพบว่า การวัดระยะทางทั้งขาไปและขากลับแทบจะทับกันสนิท นั่นคือ ไม่ปรากฏฮิสเทอร์รีซีส ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าระยะทางในตารางที่ 6.7 จะสังเกตได้ว่า ระยะทางคลาดเคลื่อนกันในหน่วยมิลลิเมตรเท่านั้น ซึ่งทำให้การวัดทั้งขาไปและขากลับแทบจะทับกันสนิท โดยค่า %FSE ของฮิสเทอร์รีซีสที่มากที่สุดเกิดขึ้นที่ระยะทาง 9 เซนติเมตร ซึ่งมีค่า

$$\text{hysteresis} = \frac{9.051 - 9.037}{30} \times 100 \quad \% \qquad (6\text{-}5)$$

$$= 0.047 \quad \%$$

- *ความเป็นเชิงเส้น* สมการเส้นตรงที่แสดงความเป็นเชิงเส้นของการวัดระยะทางในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ อาจหาได้จากการหาค่าเฉลี่ยระหว่างระยะทางขาไปและขากลับ ซึ่งสมการเส้นตรงมีค่า ดังนี้

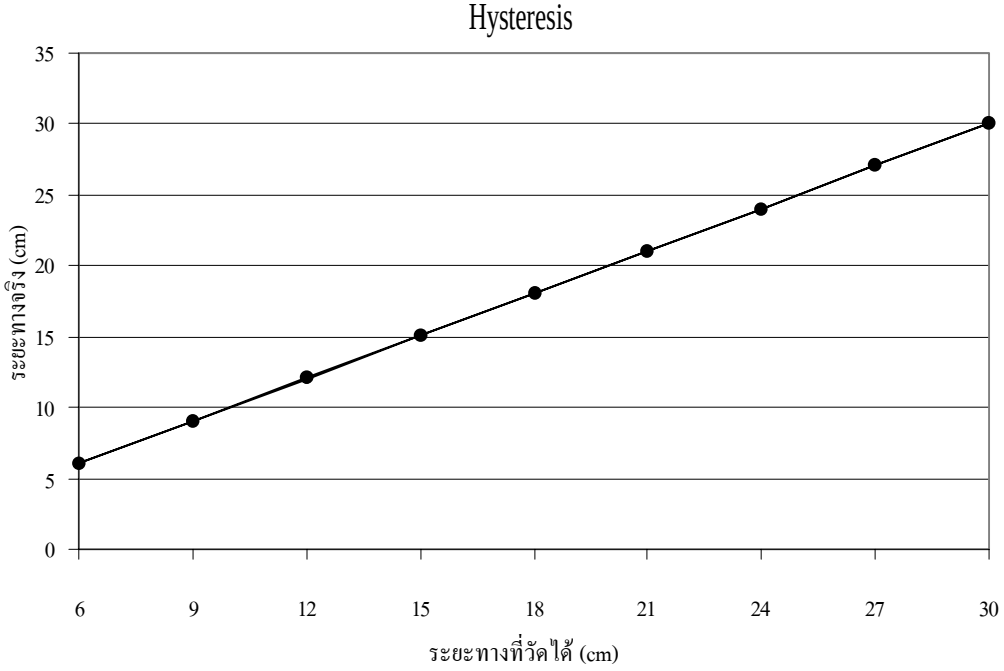
$$\text{ระยะทางจริง} = (0.999 \times \text{ระยะทางที่วัดได้}) - 0.040 \qquad (6\text{-}6)$$

$$\cong \text{ระยะทางที่วัดได้} - 0.040$$

โดยเปอร์เซ็นต์ความเป็นเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 0.023 % และ – 0.015% หรือประมาณ ± 0.02 %

ตารางที่ 6.7 ระยะทางทั้งขาไปและขากลับจากวิธีการแปลงเวฟเล็ต

ระยะทางจริง (cm)	ระยะทางขาไป (cm)	ระยะทางขากลับ (cm)
6	6.022	6.031
9	9.037	9.051
12	12.067	12.058
15	15.044	15.049
18	18.046	18.053
21	21.042	21.055
24	24.048	24.046
27	27.051	27.049
30	30.046	30.045



รูปที่ 6.4 ฮิสเทอร์รีซีส (ไม่ปรากฏ)

- *ความแม่นยำ* หรือ %FSE ของการวัดระยะทางทั้งขาไปและขากลับเฉลี่ยอยู่ที่ 0.149% และ 0.162 % ตามลำดับ

- *ความสามารถในการวัดซ้ำๆ* สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่ามากที่สุด (maximum) และค่าน้อยที่สุด (minimum) ของการวัดระยะทางแต่ละตำแหน่งดังนี้

$$\text{repeatability} = \frac{\text{maximum} - \text{minimum}}{\text{full scale}} \times 100 \qquad (6\text{-}7)$$

เมื่อ

full scale คือ ค่าที่มากที่สุดของการวัดซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 เซนติเมตร

โดยผลการวัดระยะทางทั้ง 6 ครั้ง แสดงไว้ในตารางที่ 6.8 และความสามารถในการวัดซ้ำๆ ของแต่ละระยะทาง แสดงไว้ในตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.8 ผลการวัดระยะทางทั้งหกครั้ง

ระยะทาง (cm)	ผลการวัดระยะทาง (cm)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
6	6.020	6.015	0.101	6.028	6.034	6.032
9	9.048	9.040	0.075	9.062	9.051	9.039
12	12.053	12.070	0.257	12.055	12.078	12.040
15	15.040	15.066	0.086	15.051	15.057	15.038
18	18.049	18.056	0.106	18.055	18.062	18.041
21	21.053	21.042	0.101	21.053	21.062	21.050
24	24.042	24.068	0.114	24.057	24.035	24.047
27	27.041	27.055	0.195	27.055	27.042	27.051
30	30.038	30.045	0.186	30.037	30.054	30.044

ตารางที่ 6.9 ความสามารถในการวัดซ้ำๆ ของการวัดระยะทางในแต่ละตำแหน่ง

ระยะทาง (cm)	ความสามารถในการวัดซ้ำๆ (%)
6	0.063
9	0.133
12	0.127
15	0.133
18	0.100
21	0.107
24	0.113
27	0.057
30	0.063

6.4 สรุป

วิทยานิพนธ์บทที่ 6 นี้ ได้นำเสนอผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการสามวิธี กล่าวคือ วิธีตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด วิธีการแปลงเวฟเล็ต และวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ การปรับชดเชยผลกระทบของอุณหภูมิ พร้อมทั้งการปรับเทียบ โดยการวัดระยะทางแต่ละวิธีจะมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปดังที่ได้อภิปรายมาแล้วข้างต้น สำหรับวิธีที่มีความแม่นยำมากที่สุดเมื่อพิจารณาจากค่าความผิดพลาด ได้แก่ วิธีการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่ด้วยการแปลงเวฟเล็ต โดยใช้มอร์เล็ตเวฟเล็ตเป็นเวฟเล็ตแม่ จึงนำผลการวัดระยะทางจากวิธีนี้มาทำการปรับชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิ และปรับเทียบ

บทที่ 7
สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เป็นการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยอาศัยการวิเคราะห์เชิงเวลา-ความถี่ เพื่อให้ผลการวัดระยะทางมีความแม่นยำมากที่สุด โดยได้ดำเนินการศึกษาออกแบบและสร้างระบบวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ ซึ่งระยะทางที่วัดได้นั้นจะได้จากการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์สัญญาณสามวิธีเพื่อเปรียบเทียบผล ได้แก่ วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด โดยนำเอาจีนเนติกอัลกอริทึมซึ่งเป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาช่วยค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด สำหรับวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ที่ได้นำเสนอเป็นวิธีที่สองคือ วิธีการแปลงเวฟเล็ต โดยเป็นการทำสหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับและเวฟเล็ตแม่ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เปรียบเทียบผลการวัดระยะทางด้วยเวฟเล็ตแม่สามชนิด กล่าวคือ มอร์เล็ตเวฟเล็ต แมกซิกันแฮทเวฟเล็ต และคอยเฟล็ตเวฟเล็ต ส่วนวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่อีกวิธีหนึ่งที่ได้นำเสนอคือ วิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิและการปรับเทียบอีกด้วย

7.2 สรุป

การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งไว้ทุกประการ โดยมีผลการวิจัยดังนี้ ความผิดพลาดน้อยที่สุดของการวัดระยะทางภายในสภาวะควบคุมอุณหภูมิที่ 27 องศาเซลเซียส ด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด วิธีการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ต แมกซิกันแฮทเวฟเล็ต คอยเฟล็ตเวฟเล็ต และวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ จำกัดอยู่ที่ 0.149% 0.072% 0.143% 0.098% และ 0.095% ตามลำดับ ส่วนค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของทั้งสามวิธีจำกัดอยู่ที่ 1.148% 0.222% 0.216% 0.243% และ 0.280% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าผิดพลาดจะพบว่า วิธีที่แม่นยำที่สุด คือ วิธีการแปลงเวฟเล็ตด้วยมอร์เล็ตเวฟเล็ต ส่วนวิธีอื่นก็ยังมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปตามที่ได้อภิปรายไว้ในบทที่ 6 และเมื่อทำการปรับชดเชยผลกระทบของอุณหภูมิของการวัดระยะทางนอกสภาวะควบคุม พบว่า ระยะทางที่ได้ทำการปรับแก้แล้วมีความแม่นยำขึ้นโดยค่าผิดพลาดน้อยที่สุดจำกัดอยู่ที่ 0.017% และค่าผิดพลาดมากที่สุดจำกัดอยู่ที่ 0.529% และเมื่อทำ

การปรับเทียบเพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรงและความแม่นยำในการวัด ได้ผลคือ เปอร์เซ็นต์ฮิสเทอร์รีซีสที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.047% เปอร์เซ็นต์ความเป็นเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ 0.023% และ –0.015% ความแม่นยำอยู่ที่ 0.149% สำหรับการวัดระยะทางขาไป และ 0.162% สำหรับการวัดระยะทางขากลับ และความสามารถในการวัดซ้ำๆ สูงสุดมีค่า 0.133%

7.3 ข้อเสนอแนะ

1. การวิเคราะห์ด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์อาจโปรแกรมด้วยภาษาอื่น อย่างเช่น ภาษาซี Visual C++ ตลอดจนใช้การประมวลผลขนาน เพื่อแก้ปัญหาการประมวลผลช้า

2. อาจประยุกต์เอาวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุดกับวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ เข้าด้วยกัน เนื่องจากระนาบของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์จะค่อนข้างต่อเนื่องและเริ่มต้นจากศูนย์ซึ่งสามารถใช้วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุดได้ อีกทั้งยังสามารถตั้งระดับจุดเริ่มเปลี่ยนได้เองโดยอัตโนมัติ ซึ่งผลการวัดระยะทางน่าจะแม่นยำมากขึ้น แต่ทั้งนี้ประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลต้องมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากทั้งสองวิธีดังกล่าวใช้เวลาในการประมวลผลนาน หรืออาจใช้การโปรแกรมด้วยภาษาอื่น

3. อาจปรับปรุงวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ สำหรับการพัฒนาขึ้นเป็นอุปกรณ์วัดระยะทางแม่นยำสูง ใช้งานในเวลาจริง (real-time) ซึ่งอาจดำเนินการโดยต่อชุดวัดระยะทางเข้ากับการ์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ที่โปรแกรมอัลกอริทึมการวัดระยะทางด้วยวิธีการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ไว้ เพื่อคำนวณค่า ToF และระยะทาง สำหรับหลักการสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือ จะต้องเลือกใช้การ์ดที่สามารถประมวลผลแบบขนานได้ อีกทั้งยังต้องปรับปรุงโปรแกรมเพื่อให้การคำนวณรวดเร็ว

เอกสารอ้างอิง

ชูศักดิ์ เวชแพศย์. (2525). **หลักการและเครื่องอุลตร้าซาวด์ในทางการแพทย์.** คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล. มหาวิทยาลัยมหิดล.

ณัฐนันท์ ทัดพิทักษ์กุล. (2544). การบีบอัดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตแบบดีสครีท. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ทนง โชติสรยุทธ์. (2524). เทคนิคการใช้งานอุลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์สำหรับนักทดลอง. ใน ทะนง โชติสรยุทธ์ (บรรณาธิการ). **เซมิคอนดักเตอร์อิเลคทรอนิคส์.** (หน้า 58-73). กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดเคยูชั่น.

สราวุฒิ สุจิตจร. (2545). **การวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย.** นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2545).จีนเนติกอัลกอริทึม ตอนที่ 1. **วารสารเทคโนโลยีสุรนารี** 9(1): 69-83.

Andria, G., Attivissimo, F. and Lanzolla, A. (1998). Digital measuring techniques for high accuracy ultrasonic sensor application. **Proc. IEEE Conf. Instrumentation and Measurement Technology .** 2:1056-1061.

Andria, G., Attivissimo, F. and Giaquinto, N. (1999). Digital methods for very accurate ultrasonic sensor measurments. **Proc. IEEE Conf. Instrumentation and Measurement Technology.** 3: 1687-1692.

Angrisani, L., Daponte, P. and D'Apuzzo, M. (1996). Detection of echo from multilayer structures by using the wavelet transform. **Proc. IEEE Conf. Instrumentation and Measurement Technology.** 2: 895-900.

Arce, J., Llata, J. R., Sarabia, E. G. and Oria, J. P. (1998). Automatic fault detection using ultrasonic techniques: expert system vs signal processing. **Proc. IEEE Conf. ISIE'98. Industrial Electronics.** 2: 558-563.

Asher, R. C. (1997). **Ultrasonic sensor.** London: Institute of Physics Publishing.

Aydin, N. and Markus, H. S. (2001). Time-scale analysis of quadrature doppler ultrasound signals. **Proc. IEE. Science Measurement and Technology.** 148(1): 15-22

Barry, D. T. (1992). Fast calculation of the Choi-Williams time-frequency distribution. **IEEE Trans. Signal Processing.** 40(2): 450-455

Blitz, J. (1967). **Fundamentals of ultrasonics.** (2nd ed.). London: Butterworths.

Chipperfield, A. J., Fleming, P. J. and Pohlheim, H. (1994). A Genetic Algorithm Toolbox for MATLAB. In **Proceedings International Conference on System Engineering**, Coventry, UK.

Choi, H.-I. and Williams, W. J. (1989). Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels. **IEEE Trans. Acoustic, Speech and Signal Processing.** 37(6): 862-871.

Cohen, L. (1989). Time-frequency distribution: a review. **Proc. IEEE.** 77 (7): 941-981.

Donald, P. M. (1999). **Choosing an ultrasonic sensor for proximity or distance measurement part1 : acoustic considerations** [On-line]. Available : http://www.sensormag.com/articles/0299/acou09/main.shtml

Gueuning, F., Varlan, M., Eugene, C. and Dupuis, P. (1996). Accurate distance measurement by an autonomous ultrasonic system combining time-of-flight and phase-shift methods. **Proc. IEEE Conf. Instrumentation and Measurement Technology .** 1: 399-404.

Halliday, D. and Resnick, R. (1978). **Physic.** (3rd ed). New York: John wiley and Sons.

Man, K. F., Tang, K. S. , Kwong, S. and Halang, W. A. (1997). **Genetic Algorithms for Control and Signal Processing**. London: Springer-Verlag.

Malik, M. A. and Saniie, J. (1993). Generalized time-frequency representation of ultrasonic signals. **Proc. IEEE Ultrasonic Symposium.** 2: 691-695.

Malik, M. A. and Saniie, J. (1997). Evaluation of exponential product kernel for quadratic time-frequency distributions applied to ultrasonic signals. **Proc. IEEE Ultrasonic Symposium.** 1: 643-648.

Michalodimitrakis, N. and Laopoulos, Th. (2001). On the use of wavelet transform in ultrasonic measurement system. **Proc. IEEE Conf. Instrumentation and Measurment Technology.** 1: 589-594.

Michel, M., Yves, M., Georges, O. and Jean, M. P. (1996). **Wavelet toolbox for use with matlab.** New York: The MathWorks.

Rioul, O. and Vetterli, M. (1991).Wavelets and signal processing. **IEEE Signal Processing Magazine.** 8(4) : 14-38.

Parrilla, M. , Anaya, J. J. and Fritsch, C. (1991). Digital signal processing techniques for high accuracy ultrasonic range measurements. **IEEE Trans. Instrumentation and Measurement.** 40(4) : 759-763.

Sheng, Y. (1996). Wavelet transform. In A. D. Poularikas (ed). **The transforms and applications handbook.** (pp747-827). Florida: CRC Press.

Shie, Q. and Dapang, C. (1996). **Joint time-frequency analysis : method and applications.** New Jersey: PTR Prentic Hall.

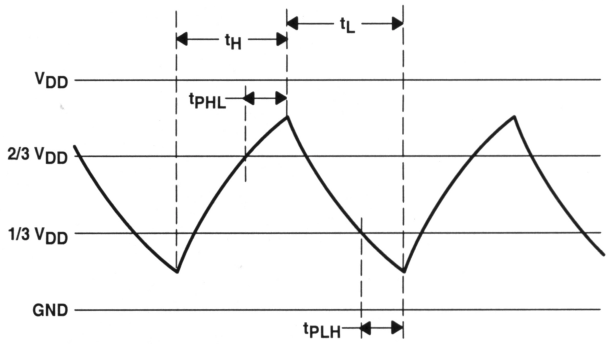
Youngjoon , H. and Hernsoo, H. (1999). Localization and classification of target surfaces using two pairs of ultrasonic sensors. **Proc. IEEE Int. Conf. Robotics & Automation.** 1: 637-643.

ภาคผนวก ก.

การทำงานของวงจรกำเนิดความถี่

วงจรรูปที่ 2.10 มีการทำงานดังรูปที่ ก.1 อธิบายได้ดังนี้ ตัวต้านทาน R_a และ R_b ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานไทม์มิ่ง ตัวเก็บประจุ C ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุไทม์มิ่ง เมื่อวงจรได้รับแรงดันไบอัสจากแหล่งจ่าย ตัวเก็บประจุ C จะสะสมประจุผ่านตัวต้านทาง R_a และ R_b จนกระทั่งเมื่อแรงดันตกคร่อมมีค่าเป็น $\frac{2}{3}V_{DD}$ จะทำให้วงจรเปรียบเทียบบน (upper comparator) กระตุ้นวงจรฟลิปฟลอปซึ่งอยู่ภายในตัวไอซีซึ่งมีผลให้ตัวเก็บประจุเริ่มคายประจุผ่านตัวต้านทาน R_b แรงดันตกคร่อม C ก็จะลดลงจนเมื่อมีค่าเป็น $\frac{1}{3}V_{DD}$ วงจรเปรียบเทียบล่าง (lower comparator) ในไอซีจะกระตุ้นและเริ่มการทำงาน ของวงจรในรอบใหม่ต่อไป

การเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ ก.1 การเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุต

ตัวเก็บประจุจะทำการสะสมประจุและคายประจุสลับกันไปอย่างสม่ำเสมอ ทำให้แรงดันตกคร่อม C มีค่าระหว่าง $\frac{2}{3}V_{DD}$ และ $\frac{1}{3}V_{DD}$ ตามลำดับ แรงดันที่เอาต์พุตของวงจรจะมีค่าสูงในขณะที่ C ทำการสะสมประจุ ซึ่งถ้าให้ t_H คือ ช่วงเวลาที่เอาต์พุตมีแรงดันสูง ดังนั้น

$$t_H = C(R_a + R_b)\ln\frac{\left(V_{DD} - \frac{2}{3}V_{DD}\right)}{\left(V_{DD} - \frac{1}{3}V_{DD}\right)} \quad (1)$$

หรือ

$$t_H = 0.693(R_a + R_b)C \quad \text{วินาที} \tag{2}$$

และแรงดันที่เอาต์พุตจะมีค่าต่ำในขณะที่ C คายประจุ ถ้ากำหนดให้ t_L คือ ช่วงเวลาที่เอาต์พุตมีแรงดันต่ำ ดังนั้น

$$t_L = 0.693CR_b \quad \text{วินาที} \tag{3}$$

ช่วงเวลารวมสำหรับการสะสมและคายประจุ คือ

$$\begin{aligned} T &= t_H + t_L \\ &= 0.693(R_a + 2R_b)C \quad \text{วินาที} \end{aligned} \tag{4}$$

ซึ่ง ค่า T ก็คือ ช่วงเวลาหนึ่งช่วงคลื่นของสัญญาณพัลส์ ดังนั้น ความถี่ของพัลส์เอาต์พุต คือ

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{T} \\ &= \frac{1.443}{(R_a + 2R_b)C} \end{aligned} \tag{5}$$

แต่ละค่าของ $(R_a + 2R_b)$ และ C จะให้ค่าความถี่ของพัลส์ที่เอาต์พุตต่างๆกัน และจากนิยามของช่วงเวลางาน (duty cycle) ที่ว่า ช่วงเวลางาน คือ อัตราส่วนของช่วงเวลาที่เอาต์พุตมีแรงดันสูงกับช่วงเวลาทั้งหมดของพัลส์ 1 ลูกคลื่น โดยสามารถ เขียนแทนด้วย D ดังนี้

$$\begin{aligned} D &= \frac{t_H}{T} \\ &= \frac{(R_a + R_b)}{(R_a + 2R_b)} \end{aligned} \tag{6}$$

จะเห็นได้ว่าความต้านทานของ R_a และ R_b จะเป็นตัวกำหนดค่าช่วงเวลางาน โดยพัลส์ที่ดีจะมีค่าช่วงเวลางานประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาวงจรภาคส่งที่ได้ทำการออกแบบซึ่งเป็นวงจรอะสเตเบิลไวเบรเตอร์ที่ผลิตพัลส์เอาพุตที่มีความถี่ 40 kHz ซึ่งเป็นความถี่ย่านอัลทราโซนิก โดยวงจรที่ออกแบบเป็นดังนี้

$$R_a = 1 \ k\Omega$$

$$R_b = 15 \ k\Omega + 4.7 \ k\Omega$$

ตัวต้านทาน 4.7 kΩ เป็นโพเทนชิออมิเตอร์ (potentiometer) เพื่อใช้ในการปรับแต่งให้ วงจรสามารถกำเนิดพัลส์ความถี่ 40 kHz ได้ใกล้เคียงที่สุด และกำหนดให้ตัวเก็บประจุ C มีค่าเท่ากับ 0.001 μF ถ้าให้ปรับโพเทนชิออมิเตอร์ ให้มีค่าประมาณ 2.5 kΩ ดังนั้นจากสมการที่ (4) สามารถหาความถี่และช่วงเวลางาน Dได้ดังนี้

$$f = \frac{1.443}{(R_a + 2R_b)C}$$

$$= \frac{1.443}{(1+35)\,0.001}$$

$$= 40.083 \quad kHz$$

$$D = \frac{(R_a + R_b)}{(R_a + 2R_b)}$$

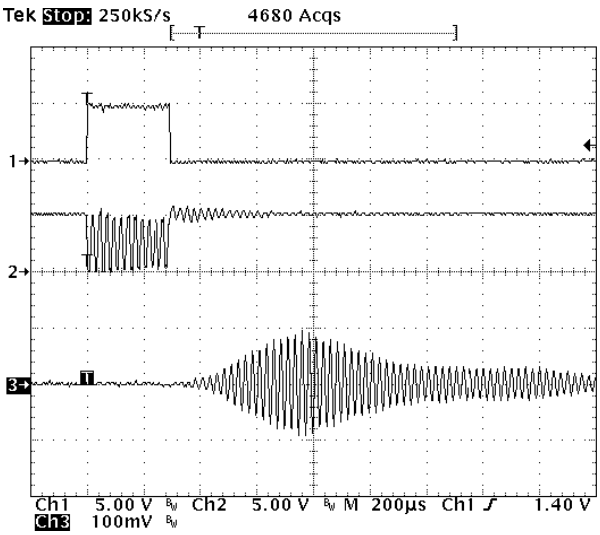
$$= \frac{(1+17.5)}{(1+35)} \times 100$$

$$= 51.4 \quad \%$$

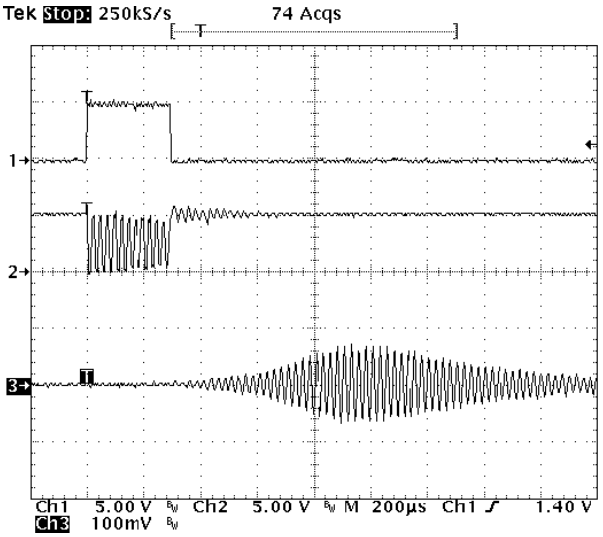
ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบการแก้การแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับ

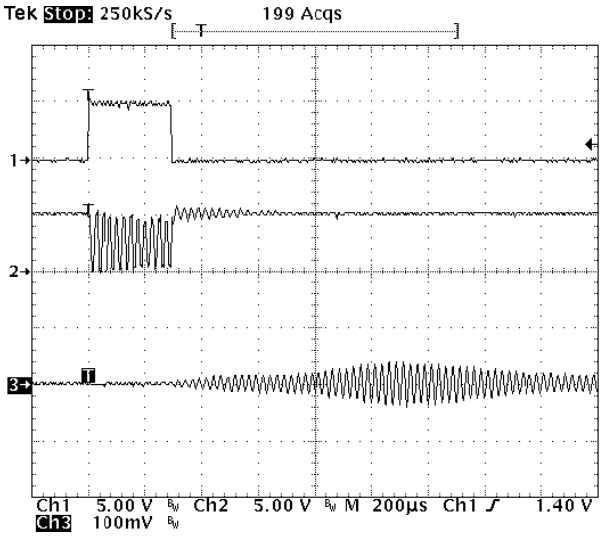
รูปสัญญาณของการวัดระยะทางที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นดังนี้



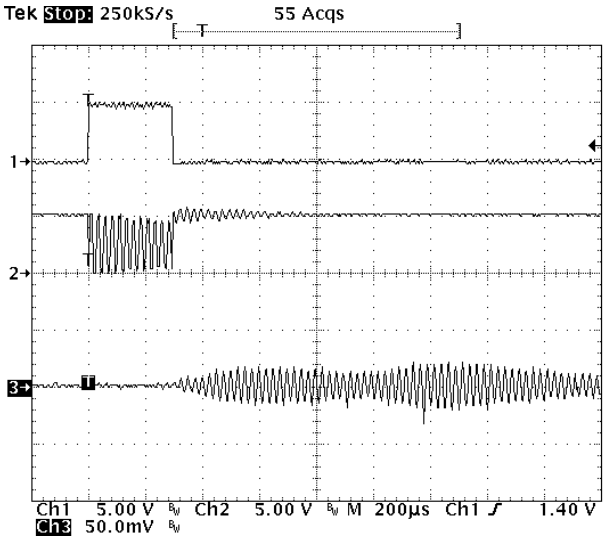
รูปที่ ข.1 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับ เมื่อวัดระยะทาง 6 เซนติเมตร



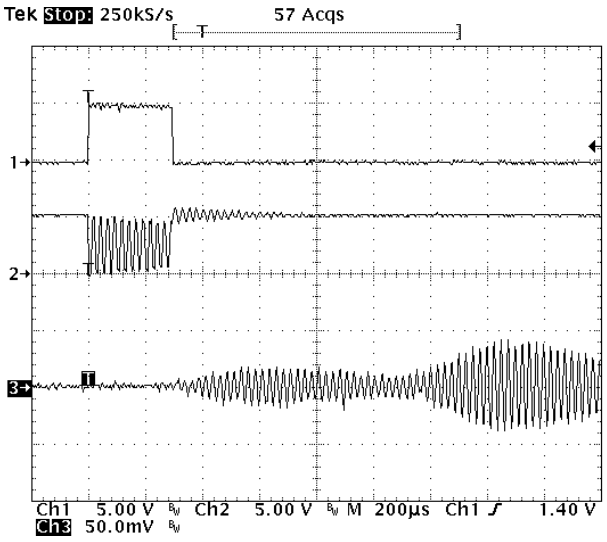
รูปที่ ข.2 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับ เมื่อวัดระยะทาง 9 เซนติเมตร



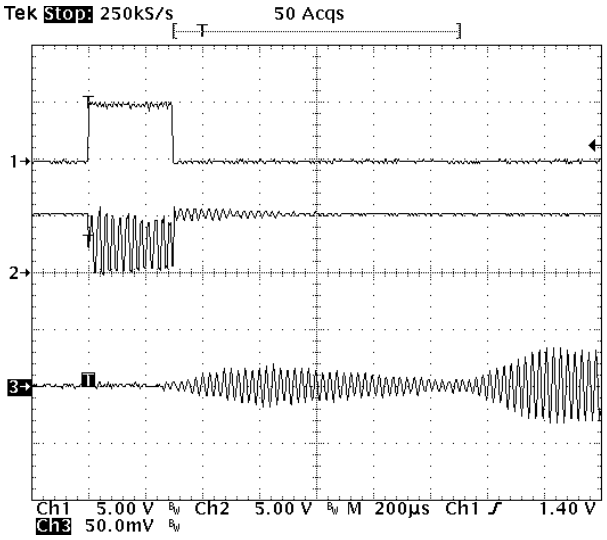
รูปที่ ข.3 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับ เมื่อวัดระยะทาง 12 เซนติเมตร



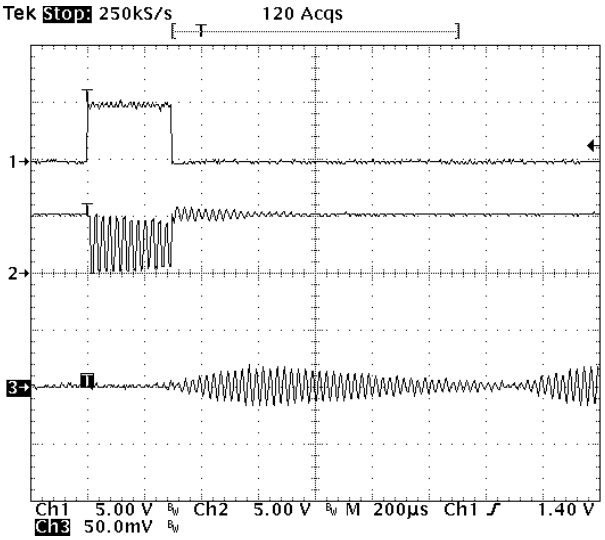
รูปที่ ข.4 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับ เมื่อวัดระยะทาง 15 เซนติเมตร



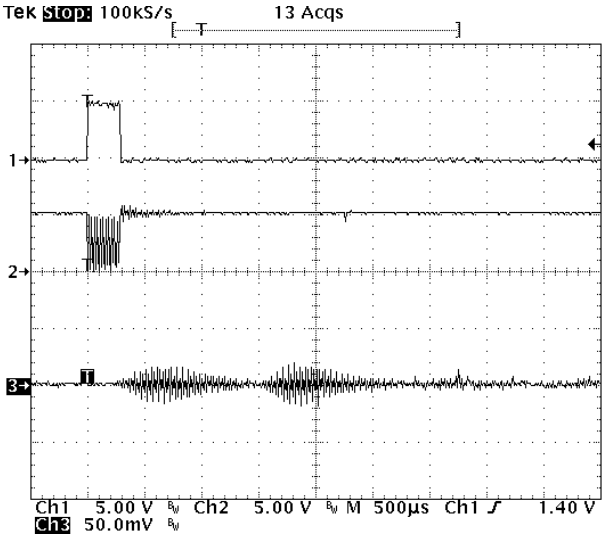
รูปที่ ข.5 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับ เมื่อวัดระยะทาง 18 เซนติเมตร



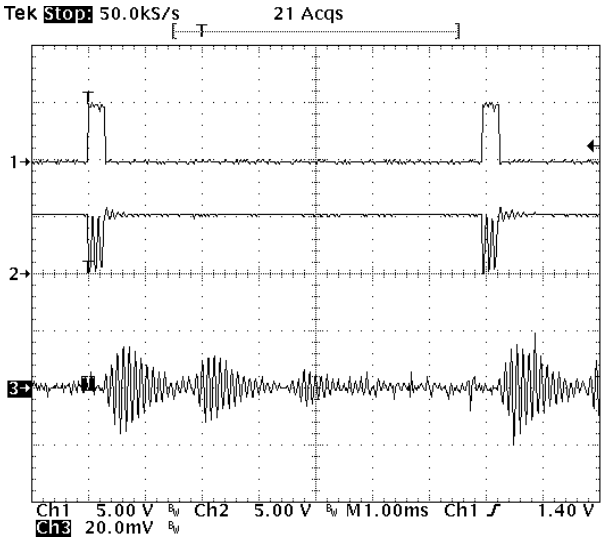
รูปที่ ข.6 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับ เมื่อวัดระยะทาง 21 เซนติเมตร



รูปที่ ข.7 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับ เมื่อวัดระยะทาง 24 เซนติเมตร



รูปที่ ข.8 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับ เมื่อวัดระยะทาง 27 เซนติเมตร



รูปที่ ข.9 รูปสัญญาณของการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับ
เมื่อวัดระยะทาง 30 เซนติเมตร

จากรูปที่ ข.1 – ข.9 จะสังเกตเห็นว่า การแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับจะเริ่มเกิดขึ้นที่ประมาณ 200 ไมโครวินาที โดยจะเกิดขึ้นตลอดไม่ว่าจะทำการวัดระยะทางที่ตำแหน่งใดๆ ซึ่งรูปร่างสัญญาณแทรกสอดจะเห็นได้ชัดเจนดังรูปที่ ข.6 และ ข.7 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับที่เกิดการแทรกสอดนั้นไม่สามารถที่จะนำไปประมวลผลสัญญาณได้ ดังนั้น จึงจำเป็นจะต้องหาวิธีแก้ปัญหาดังกล่าว

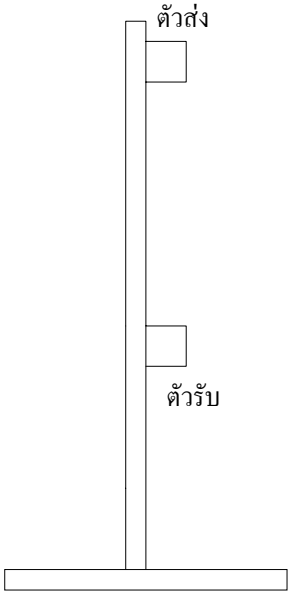
วิธีการแก้ปัญหาการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับที่ได้นำเสนอในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มีสองวิธี ใหญ่ๆ ดังนี้

1. ติดตั้งตัวส่งและตัวรับให้อยู่คนละตำแหน่งกัน
2. ติดตั้งตัวส่งและตัวรับให้ประชิดกันแต่นำเอาวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดซับและสะท้อนคลื่นกั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ โดยวัสดุที่นำมาใช้กั้นได้แก่ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นสังกะสี แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม วัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากพลาสติกแข็ง และฉนวนใยแก้ว

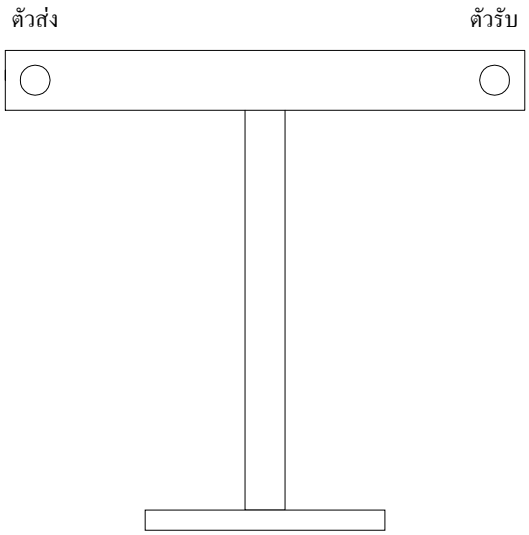
ซึ่งผลการทดสอบของแต่ละวิธีเป็นดังนี้

- ***ผลการทดสอบเมื่อติดตั้งตังส่งและตัวรับอยู่คนละตำแหน่งกัน***

การติดตั้งตัวส่งและตัวรับให้อยู่ห่างกันตามแนวตั้งและแนวนอน แสดงได้ดังนี้

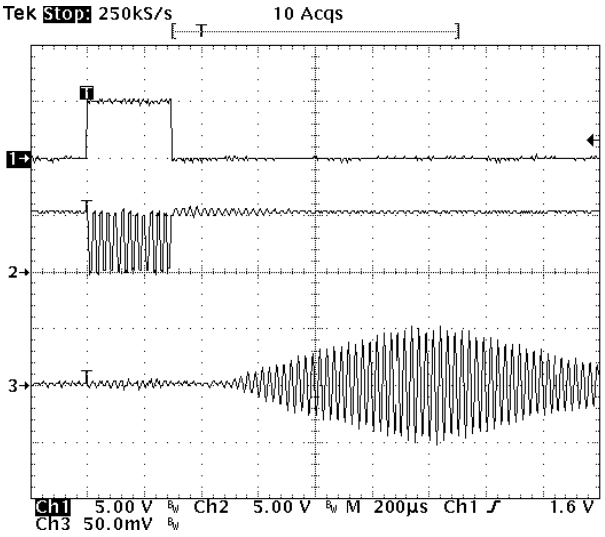


รูปที่ ข.10 ตัวส่งและตัวรับตามแนวตั้ง

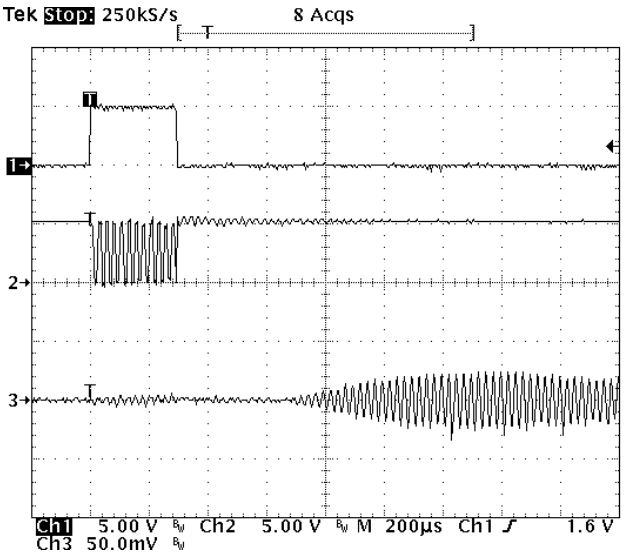


รูปที่ ข.11 ตัวส่งและตัวรับอยู่ห่างกันตามแนวนอน

ซึ่งผลการทดสอบเมื่อวัดระยะทาง 6 เซนติเมตร เป็นดังนี้



รูปที่ ข.12 รูปสัญญาณเมื่อวัดระยะทาง 6 เซนติเมตร โดยตัวส่งและตัวรับอยู่ห่างกัน 10 เซนติเมตร ตามแนวตั้ง



รูปที่ ข.13 รูปสัญญาณเมื่อวัดระยะทาง 6 เซนติเมตร โดยตัวส่งและตัวรับอยู่ห่างกัน 10 เซนติเมตร ตามแนวนอน

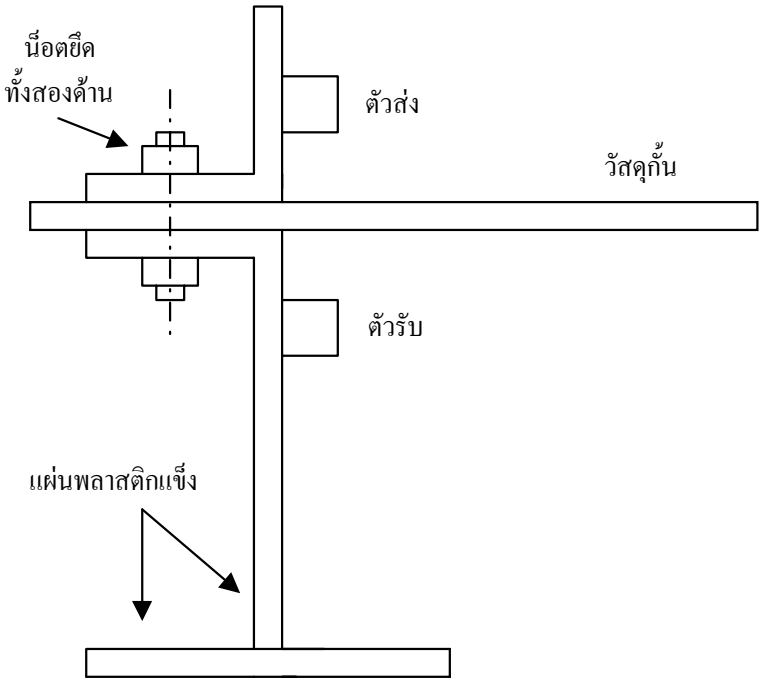
จากรูปที่ ข.12 และ ข.13 พบว่า ช่วงแรกจนถึงเริ่มมีสัญญาณสะท้อนกลับมายังตัวรับจะมีพัลส์ความถี่ 40 kHz เกิดขึ้น โดยแยกออกไปเป็นสองช่วง กล่าวคือ ช่วงแรกเป็นช่วงตั้งแต่ 0 ถึงสิ้นสุดสัญญาณเบริสต์ โดยอาจเป็นสัญญาณที่เกิดจากการสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ของไดอะเฟรมของตัวส่งซึ่งทำให้แผ่นปริ๊นซ์ที่ให้ทำเป็นฐานสั่นด้วยความถี่ดังกล่าว จึงทำให้ตัวรับสั่นด้วยความถี่นี้ในช่วงที่ทำการกระตุ้นตัวส่ง ส่วนช่วงที่สอง คือ ตั้งแต่สิ้นสุดสัญญาณเบริสต์จนถึง ToF ซึ่งพบว่ายังเกิดการแทรกสอดระหว่างตัวส่งและตัวรับในช่วงเวลาดังกล่าว

ดังนั้น วิธีนี้ไม่สามารถแก้ปัญหาการแทรกสอดได้หมด แม้ว่าการแทรกสอดจะเกิดขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับก็ตาม อีกทั้งในการวัดระยะทางควรจะให้สัญญาณที่สะท้อนเดินทางกลับมาในทิศทางที่ตั้งฉากมากที่สุด วิธีนี้จึงไม่เหมาะสำหรับการแก้ปัญหาการแทรกสอด

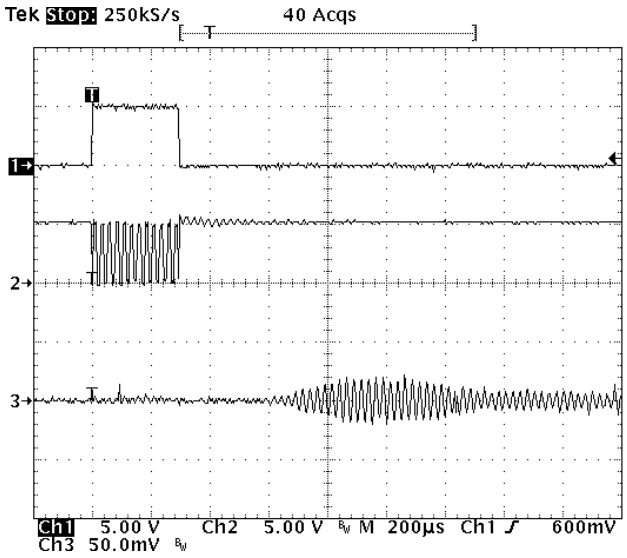
- ***ผลทดสอบเมื่อติดตั้งตัวส่งและตัวรับให้ประชิดกันแต่นำเอาวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดซับและสะท้อนคลื่นกั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ***

สำหรับวัสดุที่นำมาทดสอบมีสองกลุ่ม กล่าวคือ กลุ่มแรก ประกอบด้วย แผ่นอลูมิเนียม แผ่นสังกะสี และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนกลุ่มที่สอง ประกอบด้วย วัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากพลาสติกแข็ง และฉนวนใยแก้ว โดยแผ่นโลหะทั้งสามชนิดในกลุ่มแรกนั้นตัดให้มีขนาดกว้างคูณยาว ดังนี้ 7x5.5, 7.5x5.5 และ 8x5.5 เซนติเมตร สาเหตุที่จำกัดความยาวไว้เพียง 5.5 เซนติเมตร เนื่องจากระบบวัดระยะทางจะต้องวัดระยะทางที่ 6 เซนติเมตรได้ ส่วนวัสดุในกลุ่มหลังนั้นใช้ครอบทั้งตัวส่งและตัวรับโดยนำวัสดุที่กั้นออก ซึ่งวัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากพลาสติกแข็งมีขนาดความสูงเป็น 3.7 เซนติเมตร ส่วนฉนวนใยแก้วมีสองขนาด กล่าวคือ 4 และ 5 เซนติเมตร สำหรับการติดตั้งตัวส่งและตัวรับพร้อมทั้งวัสดุกั้นแสดงได้ดังรูปที่ ข.14

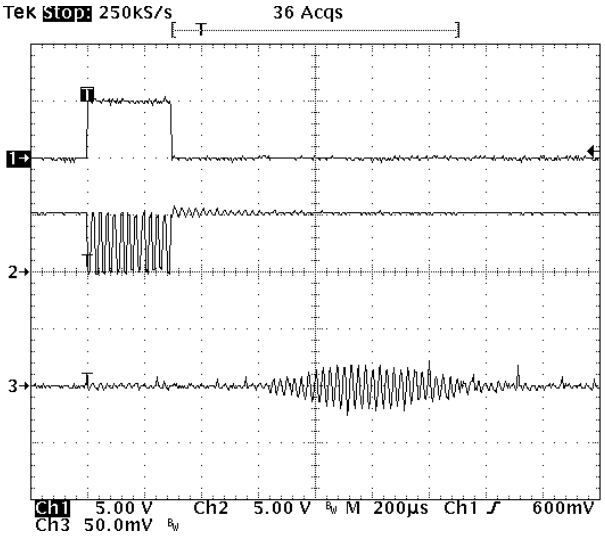
ในการทดสอบวัดระยะทางของกลุ่มแรกนั้น ทดสอบวัดระยะทางที่ 10 เซนติเมตร ส่วนในกลุ่มหลังทดสอบวัดระยะทางที่ 6 เซนติเมตร ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังนี้



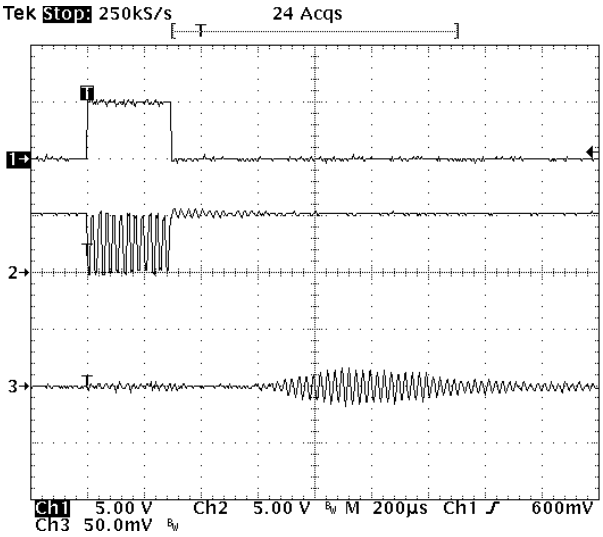
รูปที่ ข.14 การติดตั้งตัวส่งและตัวรับพร้อมทั้งวัสดุกั้น



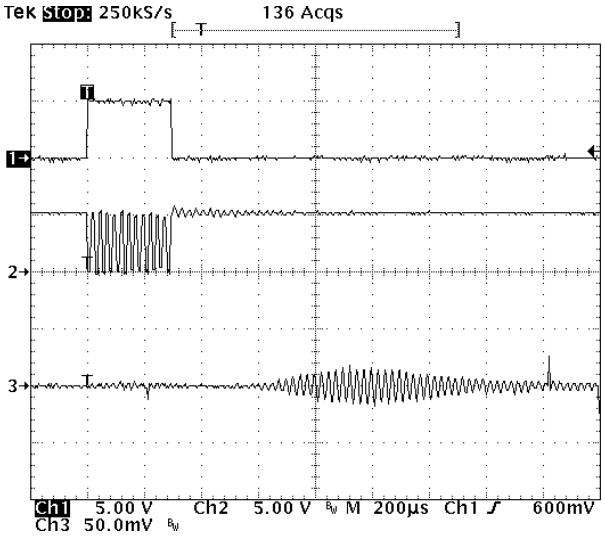
รูปที่ ข.15 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นอลูมิเนียมขนาด 7x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ



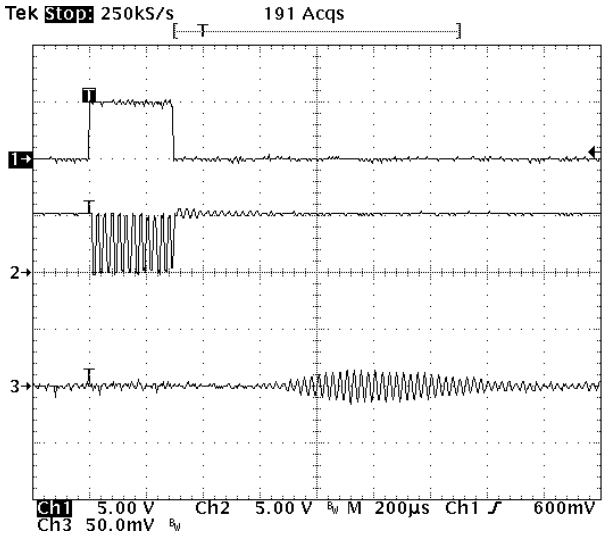
รูปที่ ข.16 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นอลูมิเนียมขนาด 7.5x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ



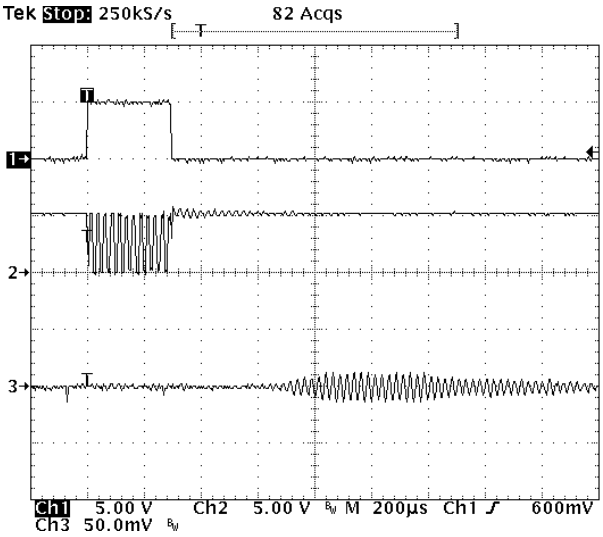
รูปที่ ข.17 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นอลูมิเนียมขนาด 8x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ



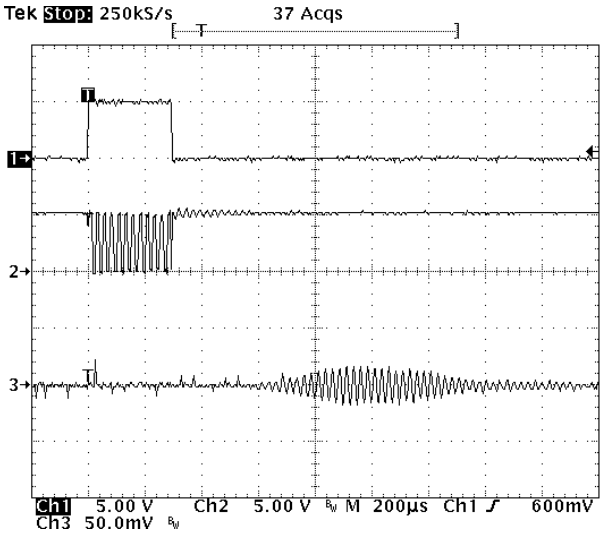
รูปที่ ข.18 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นสังกะสีขนาด 7x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ



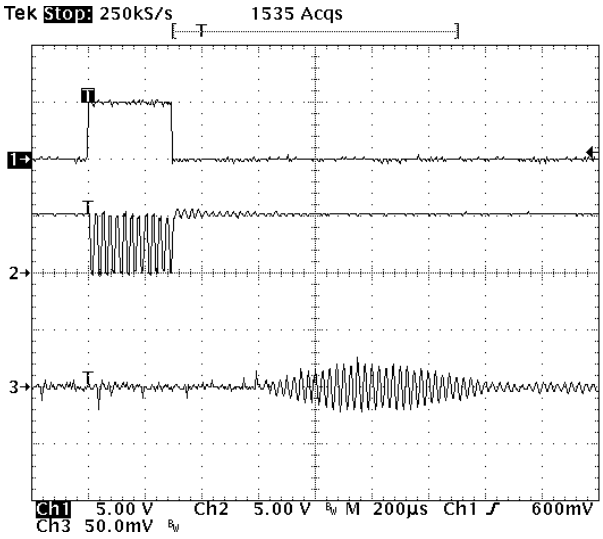
รูปที่ ข.19 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นสังกะสีขนาด 7.5x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ



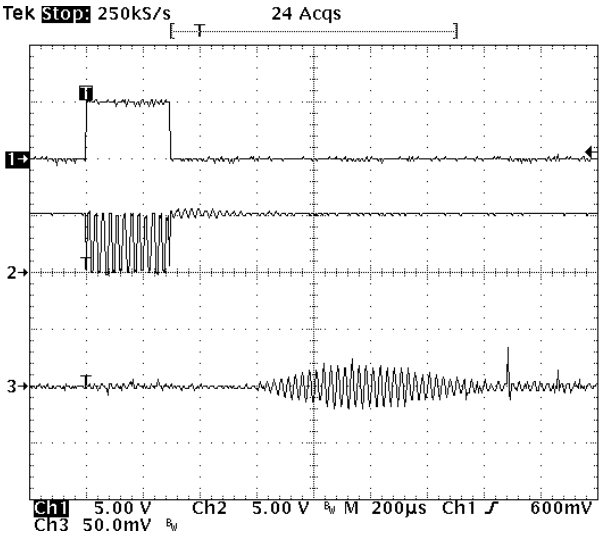
รูปที่ ข.20 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นสังกะสีขนาด 8x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ



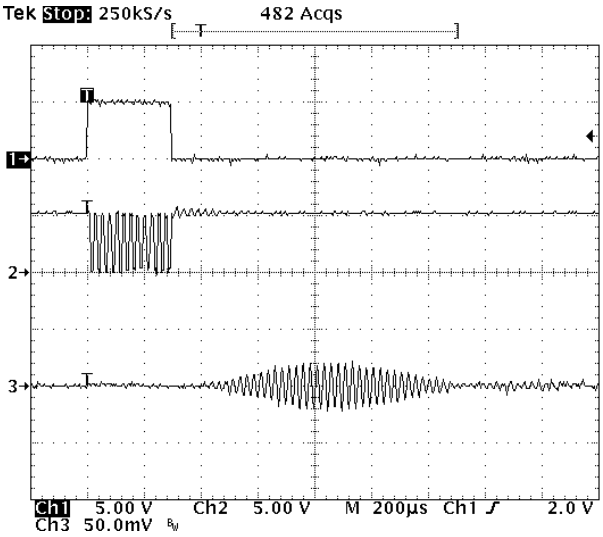
รูปที่ ข.21 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 7x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ



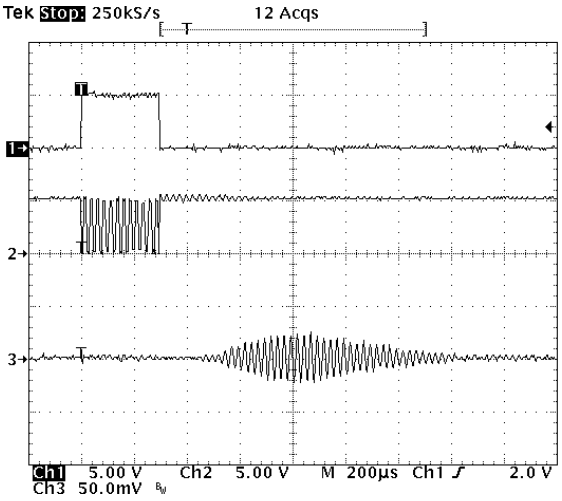
รูปที่ ข.22 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 7.5x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ



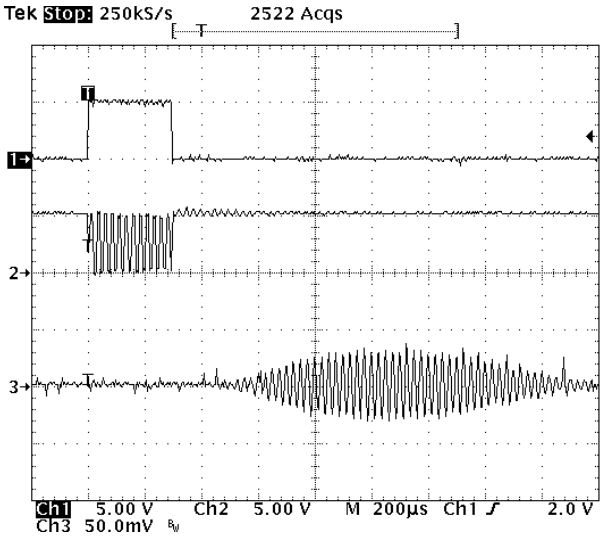
รูปที่ ข.23 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 8x5.5 เซนติเมตร กั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับ



รูปที่ ข.24 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้วัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากพลาสติกแข็งสูง 3.7 เซนติเมตร ครอบตังส่งและตัวรับ



รูปที่ ข.25 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้ฉนวนใยแก้วยาว 4 เซนติเมตรครอบตัวส่งและตัวรับ



รูปที่ ข.26 สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเมื่อใช้ฉนวนใยแก้วยาว 5 เซนติเมตรครอบตัวส่งและตัวรับ

จากรูปที่ ข.15–ข.23 จะสังเกตเห็นว่า การใช้วัสดุโลหะทั้งสามชนิดกั้นระหว่างตัวส่งและตัวรับยังเกิดการแทรกสอดในสัญญาณอยู่ เนื่องจากวัสดุโลหะกั้นนั้นสามารถลดการแทรกสอดที่เกิดจากคลื่นที่ออกมาจากด้านล่างของตัวส่ง แต่คลื่นเหนือเสียงที่ออกจากด้านข้างของตัวส่งมิได้ถูกกั้น จึงยังเกิดการแทรกสอดขึ้นได้ สำหรับผลการแก้การแทรกสอดด้วยวัสดุกลุ่มที่สอง ดังรูป ข.24-ข.26 จะพบว่า วัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากพลาสติกแข็งสามารถแก้การแทรกสอดได้ดี ในขณะที่ฉนวนใยแก้วยังเกิดการแทรกสอดในสัญญาณอยู่เล็กน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุโลหะสามชนิด ซึ่งอาจเนื่องมาจากวัสดุดังกล่าวมีลักษณะเป็นทรงกระบอกจึงทำให้ช่วยกั้นคลื่นเหนือเสียงบริเวณด้านข้างและด้านล่างมิให้เดินทางมายังตัวรับได้โดยตรง

ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ใช้วัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกในการแก้ปัญหาการแทรกสอดในสัญญาณระหว่างตัวส่งและตัวรับ

ภาคผนวก ค.

โปรแกรม MATLAB สำหรับการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ โดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด

```
##########################################################################################################
%โปรแกรม MATLAB สำหรับการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด
%โดย ทิวาวรรณ  เนตรผง  สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า,  มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
##########################################################################################################
**********************************
%initial
**********************************
%จีนเนติกอัลกอริทึม
clear all;
NIND = 90;                                          //กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น
MAXGEN = 1000;                                      /กำหนดจำนวนรอบในการทำงาน
NVAR = 1;                                           //กำหนดจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหา
preci = 13;                                         //กำหนดจำนวนบิตของโครโมโซม
GGAP = 0.9;                                         //กำหนค่าร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์
Pc=0.7;                                             //กำหนดค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์
Pm=0.01;                                            //กำหนดค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชัน
//โหลดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัดระยะทางซึ่งอยู่ในไฟล์ชื่อ f01_1.mat
load f06_1;
t3=data_time = f06_1(:,1);                          //ข้อมูลแกนเวลา
a3=data_amplitude = f06_1(:,2);                     //ข้อมูลแกนแอมพลิจูด
//นำฟังก์ชันหน้าต่างมาคูณกับข้อมูล
data_amplitude(1:19) = 0;
//หาค่าสูงสุดของข้อมูล
data_max = max(data_amplitude);
//คำนวณเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลแต่ละจุดเมื่อเทียบกับค่าสูงสุดของข้อมูล
[size_data column_data]= size(data_amplitude);
[size_time column_time]= size(data_time);
for count_data=1:size_data
  percent_data(count_data,1)= data_amplitude(count_data,1)*100/data_max;
  time_percent(count_data,1)=data_time(count_data,1);
end
//หาตำแหน่งขอบเขตล่างของจีนเนติกอัลกอริทึม
o=1;
for n=2:size_data
  if percent_data(n-1,1)==0 & percent_data(n,1)>0
    position(o,1) = n-1;
    o=o+1;
  end
end
```

```
**********************************
%main program
**********************************
//เริ่มต้นโปรแกรม
//การกำหนดโครงสร้างของกลุ่มประชากร
FieldD = [preci(1); 0; percent_data(position(1,1)+1,1); 1; 0; 0; 0];
//การสร้างประชากรเริ่มต้นด้วยวิธีการสุ่ม
s_preci=sum(preci);
Chrom = crtbp(NIND,s_preci);                    //สร้างประชากรเริ่มต้นให้แก่จีนเนติกอัลกอริทึม
gen = 0;
phen = bs2rv(Chrom,FieldD);                     //ถอดรหัสโครโมโซมให้อยู่ในรูปฟีโนไทป์
error=objective_ultrasonuc(phen,t3,a3);         //ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
//การตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานของจีนเนติกอัลกอริทึม ว่าทำงานครบตามจำนวนรอบที่กำหนดหรือไม่
while gen < MAXGEN,
//การคำนวณค่าความเหมาะสม
FitnV = ranking(error);                         //การคำนวณค่าความเหมาะสมด้วยวิธีการจัดอันดับ
//การคัดเลือกโครโมโซม
SelCh = select('sus', Chrom, FitnV, GGAP);      //การคัดเลือกโครโมโซมเพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์
//การทำครอสโอเวอร์
SelCh = recombin('xovsp',SelCh,Pc);
//การทำมิวเทชัน
SelCh = mut(SelCh,Pm);
phen1 = bs2rv(SelCh,FieldD);                    //ถอดรหัสโครโมโซมให้อยู่ในรูปฟีโนไทป์ของประชากรลูกหลาน
error_1 = objective_ultrasonic(phen1,t3,a3);    //ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
gen = gen+1;                                    //เพิ่มค่าจำนวนรอบในการทำงาน
[error_min,index] = min(error_1)                //การหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุด
//การแทนที่
[Chrom error]=reins(Chrom,SelCh,1,1,error,error_1);  //การแทนที่ประชากรเดิมด้วยประชากรลูกหลาน
end
//แสดงค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ได้จากจีนเนติกอัลกอริทึม
Threshold_level = phen1(index,1);               //ค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด
//การหาค่า ToF โดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยน
o=1;r3=1;
for r3=1:size_data
  if percent_data(1,r3)>Threshold_level         //การหาตำแหน่งของข้อมูลที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
    position(o,1) = r3;                         //ตำแหน่งของข้อมูลที่มีค่ามากกว่าค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
    o=o+1;
  end
end
```

```
//ประมาณค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลบริเวณค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
x1=percent_data(1,position(1,1)-1);          //ข้อมูล ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                               เปลี่ยน ลงมาหนึ่งตำแหน่ง
x2=percent_data(1,position(1,1)-0);          //ข้อมูล ณ ตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
x3=percent_data(1,position(1,1)+1);          //ข้อมูล ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                               เปลี่ยน ขึ้นไปหนึ่งตำแหน่ง
time1=t3(position(1,1)-1,1);                 //เวลา ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                               เปลี่ยน ลงมาหนึ่งตำแหน่ง
time2=t3(position(1,1),1);                   //เวลา ณ ตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
time3=t3(position(1,1)+1,1);                 //เวลา ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                               เปลี่ยน ขึ้นไปหนึ่งตำแหน่ง
y_amplitude=[x1  x2  x3]';
x_time=[time1 time2 time3]';
P=polyfit(x_time,y_amplitude,1);             //การหาสมการเส้นตรงของช่วงข้อมูลบริเวณค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
amplitude=Threshold_level;                   //การตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
ToF = (amplitude-P(1,2))/P(1,1)-21.6*10^-6   //การหาค่า ToF ซึ่งต้องลบด้วยค่า delay time ของแนนด์เกต
real_distance = 0.06;                        //ระยะทางที่ทำการวัด
v=331+(0.6*27)                               //การหาค่าความเร็วของคลื่นเหนือเสียง
Distance= v*ToF/2                            //การคำนวณระยะทาง
error = abs((Distance-real_distance)/0.30)*100   //การคำนวณค่าความผิดพลาดของระยะทาง
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function error=objective_gen(chromosome,t3,a3)   //การประกาศฟังก์ชัน objective_gen
[n_individual,n_var]= size(chromosome);
distance = 0.06;                             //ระยะทางที่ทำการวัด
data_amplitude = a3;                         //ข้อมูลแกนแอมพลิจูด
data_time = t3;                              //ข้อมูลแกนเวลา
//นำฟังก์ชันหน้าต่างมาคูณกับข้อมูล
data_amplitude(1:19) = 0;
//หาค่าสูงสุดของข้อมูล
data_max = max(data_amplitude);
//คำนวณเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลแต่ละจุดเมื่อเทียบกับค่าสูงสุดของข้อมูล
[size_data column_data]= size(data_amplitude);
[size_time column_time]= size(data_time);
for count_data=1:size_data
  percent_data(count_data,1)= data_amplitude(count_data,1)*100/data_max;
  time_percent(count_data,1)=data_time(count_data,1);
end
```

```
//การหาค่า ToF โดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของโครโมโซมแต่ละตัวที่ได้จากจีนเนติกอัลกอริทึม
for i=1:n_individual
    o=1;r3=1;
    for r3=1:size_data
        if percent_data(1,r3)>Chromosome(i,1);          //การหาตำแหน่งของข้อมูลที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
          position(o,1) = r3;                           //ตำแหน่งของข้อมูลที่มีค่ามากกว่าค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
          o=o+1;
        end
    end
    //ประมาณค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลบริเวณค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
    x1=percent_data(1,position(1,1)-1);             //ข้อมูล ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                                      เปลี่ยน ลงมาหนึ่งตำแหน่ง
    x2=percent_data(1,position(1,1)-0);             //ข้อมูล ณ ตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
    x3=percent_data(1,position(1,1)+1);             //ข้อมูล ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                                      เปลี่ยน ขึ้นไปมาหนึ่งตำแหน่ง
    time1=t3(position(1,1)-1,1);                    //เวลา ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                                      เปลี่ยน ลงมาหนึ่งตำแหน่ง
    time2=t3(position(1,1),1);                      //เวลา ณ ตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
    time3=t3(position(1,1)+1,1);                    //เวลา ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                                      เปลี่ยนขึ้นไปหนึ่งตำแหน่ง
    y_amplitude=[x1  x2  x3]';
    x_time=[time1 time2 time3]';
    P=polyfit(x_time,y_amplitude,1);                //การหาสมการเส้นตรงของช่วงข้อมูลบริเวณค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
    amplitude=Chromosome(i,1);                      //การตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
    ToF(i,1) = (amplitude-P(1,2))/P(1,1)-21.6*10^-6;  //การหาค่า ToF ซึ่งต้องลบด้วยค่า delay time ของแนนด์เกต
    real_distance(i,1)= 0.06;                       //ระยะทางที่ทำการวัด
    v(i,1)=331+(0.6*27);                            //การหาค่าความเร็วของคลื่นเหนือเสียง
    Distance(i,1) = v(i,1)*ToF(i,1)/2;              //การคำนวณระยะทาง
end
error = abs((Distance-real_distance)/0.30)*100;     //การคำนวณค่าผิดพลาดของการวัดระยะทาง
return
```

ภาคผนวก ง.

โปรแกรม MATLAB สำหรับการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ โดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการแปลงเวฟเล็ต

```
##########################################################################################################
%โปรแกรม MATLAB สำหรับการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วย
  การแปลงเวฟเล็ต
%โดย ทิวาวรรณ  เนตรผง  สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า,  มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
##########################################################################################################
************************************
%initial
************************************
clear all;
//โหลดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัดระยะทางซึ่งอยู่ในไฟล์ชื่อ f01_1.mat
load f06_1;
t3= f06_1(:,1);                                          //ข้อมูลแกนเวลา
a3= f06_1(:,2);                                          //ข้อมูลแกนแอมพลิจูด
scale=1:64;                                              //กำหนดค่าการสเกล
************************************
%main program
************************************
c=cwt(a3,scale,'morl','plot');                           //การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ต (กรณีมอร์เล็ตเวฟเล็ต)
%c=cwt(a3,scale,'coif1','plot');                         //การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ต (กรณีคอยเฟล็ตเวฟเล็ต)
%c=cwt(a3,scale,'mexh','plot');                          //การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ต (กรณีแมกซิกันแฮทเวฟ
                                                          เล็ต)
//การแสดงพื้นผิวสามมิติของการแปลงเวฟเล็ต
figure(1)
mesh(t3,scale,c2)
title('Wavelet transform with Morlet');                  //กำหนดชื่อพื้นผิวของการแปลงเวฟเล็ต(กรณีมอร์เล็ตเวฟเล็ต)
%title('Wavelet transform with Maxican hat');            //กำหนดชื่อพื้นผิวของการแปลงเวฟเล็ต(กรณีแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต)
%title('Wavelet transform with Coiflet');                //กำหนดชื่อพื้นผิวของการแปลงเวฟเล็ต(กรณีคอยเฟล็ตเวฟเล็ต)
xlabel('time (s)'); ylabel('scale');
zlabel('magnitude of coefficient');
axis tight
colormap([0 0 0]);
//การหาระนาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมากที่สุด
r1=1;
c1=1;
[row column]=size(c2);
c_max = max(max(c2));                                    //การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตมากที่สุด
for r1=1:row
  for c1=1:column
    if c2(r1,c1)== c_max
```

```
        index_row = r1;
        index_column = c1;
      end
    end
end
//การหาเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลแต่ละตำแหน่งเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตที่มากที่สุด
r_2=1;
c_2=1;
for r_2=1:row
  for c_2=1:column
    percent_data(r_2,c_2)= c2(r_2,c_2)*100/c_max;
  end
end
//แสดงระนาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตที่มากที่สุด
figure(2)
plot(t3,c2(index_row,:),'-k');
title('Wavelet transform with Morlet');                    //กำหนดชื่อพื้นผิวของการแปลงเวฟเล็ต(กรณีมอร์เล็ตเวฟเล็ต)
%title('Wavelet transform with Maxican hat');              //กำหนดชื่อพื้นผิวของการแปลงเวฟเล็ต(กรณีแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต)
%title('Wavelet transform with Coiflet');                  //กำหนดชื่อพื้นผิวของการแปลงเวฟเล็ต(กรณีคอยเฟล็ตเวฟเล็ต)
xlabel('time(s)'); ylabel('magnitude of coefficient');
axis tight
data_plot=percent_data(index_row,:);
d_t=data_plot(1,1:index_column);
//แสดงระนาบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเล็ตที่มากที่สุดของข้อมูลแต่ละจุดที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์
figure(3)
plot(t3,data_plot,'-k');
title('Wavelet transform with Morlet');                    //กำหนดชื่อพื้นผิวของการแปลงเวฟเล็ต(กรณีมอร์เล็ตเวฟเล็ต)
%title('Wavelet transform with Maxican hat');              //กำหนดชื่อพื้นผิวของการแปลงเวฟเล็ต(กรณีแมกซิกันแฮทเวฟเล็ต)
%title('Wavelet transform with Coiflet');                  //กำหนดชื่อพื้นผิวของการแปลงเวฟเล็ต(กรณีคอยเฟล็ตเวฟเล็ต)
xlabel('time(s)'); ylabel('magnitude of coefficient');
axis tight
//การหาค่า ToF ด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยน
o=1;
r3=1;
for r3=1:index_column
  if data_plot(1,r3)>2.4                                   //ตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ 2.4%
    position(o,1) = r3;
    o=o+1;
  end
```

```
end
//ประมาณค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลบริเวณค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
x1=percent_data(1,position(1,1)-1);          //ข้อมูล ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                              เปลี่ยน ลงมาหนึ่งตำแหน่ง
x2=percent_data(1,position(1,1)-0);          //ข้อมูล ณ ตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
x3=percent_data(1,position(1,1)+1);          //ข้อมูล ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                              เปลี่ยนขึ้นไปหนึ่งตำแหน่ง
time1=t3(position(1,1)-1,1);                 //เวลา ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                              เปลี่ยน ลงมาหนึ่งตำแหน่ง
time2=t3(position(1,1),1);                   //เวลา ณ ตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
time3=t3(position(1,1)+1,1);                 //เวลา ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                              เปลี่ยนขึ้นไปหนึ่งตำแหน่ง
y_amplitude=[x1  x2  x3]';
x_time=[time1 time2 time3]';
P=polyfit(x_time,y_amplitude,1);             //การหาสมการเส้นตรงของช่วงข้อมูลบริเวณค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
amplitude=Threshold_level;                   //การตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
ToF = (amplitude-P(1,2))/P(1,1)-21.6*10^-6   //การหาค่า ToF ซึ่งต้องลบด้วยค่า delay time ของแนนด์เกต
real_distance = 0.06;                        //ระยะทางที่ทำการวัด
v=331+(0.6*27)                               //การหาค่าความเร็วของคลื่นเหนือเสียง
Distance= v*ToF/2                            //การคำนวณระยะทาง
error = abs((Distance-real_distance)/0.30)*100   //การคำนวณค่าความผิดพลาดของระยะทาง
```

ภาคผนวก จ.

โปรแกรม MATLAB สำหรับการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ โดยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณด้วยการกระจายของชอย-วิลเลียมส์

```
##########################################################################################################
%โปรแกรม MATLAB สำหรับการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา-ความถี่ด้วย
  การกระจายของชอย-วิลเลียมส์
%โดย ทิวาวรรณ เนตรผง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
##########################################################################################################
************************************
%initial
************************************
clear all;
//โหลดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัดระยะทางซึ่งอยู่ในไฟล์ชื่อ f01_1.mat
load f06_1;
t3= f06_1(:,1);                                          //ข้อมูลแกนเวลา
a3= f06_1(:,2);                                          //ข้อมูลแกนแอมพลิจูด
scale=1:64;                                              //กำหนดค่าการสเกล
************************************
%main program
************************************
//การคำนวณเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก
x=a3';                                                   //การกำหนดข้อมูลในการประมวลผล
r_min=-((length(x)-1)/2);                                //กำหนดค่า -τmax
r_max=(length(x)-1)/2;                                   //กำหนดค่า +τmax
stop_1=r_max+1;
stop_2=r_max+1;
weigth_matrix=zeros(length(x),length(x));                //การจองพื้นที่สำหรับเก็บค่าเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก
zigma=1;
u_n_max=(length(x)-1)/2;//กำหนดค่า (u-n)max
  for row =1:length(x)
    for column =1:stop_1
      if r_max==0
        weigth_matrix(row,column)=0;
      else
        div=1/sqrt((4*pi*r_max^2)/zigma);
        power=-(u_n_max)^2/((4*r_max^2)/zigma);
        weigth_matrix(row,column)=div*exp(power);        //คำนวณสมาชิกแต่ละตัวของเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก
      end
      r_max=r_max-1;
    end
    r_max=r_max+stop_2;
    u_n_max=u_n_max-1;
```

```
  end
weigth_matrix((length(x)+1)/2,(length(x)+1)/2)=1;
//การสร้างเมตริกซ์ผลคูณจากภายนอก
stop_1=r_max+1;
stop_2=r_max+1;
for i=1:length(x)/2;                                    //หาสมาชิกของเมตริกซ์ผลคูณจากภายนอกหลักที่ +τ_max ถึง หลักที่ τ = 0
  r_max=(length(x)-1)/2;
  outer_product_real=zeros(length(x),length(x));        //การจองพื้นที่สำหรับเก็บค่าเมตริกซ์ผลคูณจากภายนอกพจน์ค่าจริง
  index=0;
  outer_product_conj=zeros(length(x),length(x));        //การจองพื้นที่สำหรับเก็บค่าเมตริกซ์ผลคูณจากภายนอกพจน์ค่าสังยุค
  index_conj=(-length(x))+1;
  for row=1:length(x)
    for column=1:stop_1
      //การคำนวณสมาชิกของเมตริกซ์ผลคูณจากภายนอกพจน์ค่าจริง
      if (i+index)>0 & (i+index)<=length(x)
        outer_product_real(row,column)=x(1,i+index);
      end
      //การคำนวณสมาชิกของเมตริกซ์ผลคูณจากภายนอกในพจน์สังยุค
      if (i+index_conj)>0 & (i+index_conj)<=length(x)
        outer_product_conj(row,column)=x(1,i+index_conj);
      end
      //การคำนวณค่าสมาชิกของเมตริกซ์ผลคูณจากภายนอกโดยนำพจน์ค่าจริงคูณกับพจน์สังยุค
      outer_product(row,column)=outer_product_real(row,column)*outer_product_conj(row,column);
      //การคูณกันจุดต่อจุดระหว่างเมตริกซ์ผลคูณจากภายนอกและเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก
      result(row,column)=outer_product(row,column)*weigth_matrix(row,column);
      index=index-1;
      index_conj=index_conj+1;
    end
    index=index+stop_2+1;
    index_conj=index_conj-stop_2+1;
  end
  //การหาผลบวกแต่ละหลักของผลคูณระหว่างเมตริกซ์ผลคูณจากภายนอกและเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก ตั้งแต่หลัก +τ_max ถึง หลักที่ τ = 0
  for column=1:stop_1
    output(1,column)=sum(result(:,column));
  end
 //การหาผลรวมแต่ละหลักของผลคูณระหว่างเมตริกซ์ผลคูณจากภายนอกและเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก ตั้งแต่หลัก +τ_max ถึง หลักที่ –τ_max
  for column = stop_2+1:length(x)
    output(1,column)=output(1,r_max);
```

```
    r_max=r_max-1;
  end
array_output_f06_1_1(i,:)=output;                    //แถวลำดับที่เป็นฟังก์ชันของ τ
y(i,:)=fft(array_output(i,:));                       //การหาการแปลงฟูริเยร์แบบรวดเร็วของแถวลำดับที่เป็นฟังก์ชันของ
                                                      τ
Pyy(i,:) = y(i,:).*conj(y(i,:));                     //ค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์
end
//การหาค่ามากที่สุดของสเปกตรัมกำลัง
P=(Pyy(:,1:451));
P_max = max(max(P));                                 //ค่ามากที่สุดของค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์
[row column]=size(P);
//การหาตำแหน่งของค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์ที่มากที่สุด
for r1=1:row
  for c1=1:column
    if P(r1,c1)== P_max
      index_row = r1;
      index_column = c1;
    end
  end
end
//การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์เมื่อเทียบกับค่าสูงสุด
data=P(:,index_column);
[r2 c2]=size(data);
for r=1:r2
   percent_data(r,1)= data(r,1)*100/P_max;
end
//แสดงพื้นผิวสามมิติของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์
t=t3';
f=125000*(0:450)/901;                                //ช่วงความถี่ในการแสดงค่า
figure(1)
mesh(f,t,P)
title('Choi&Williams Distribution');
ylabel('time (s)'); xlabel('frequency (Hz)');
zlabel('magnitude of CWD');
axis tight;
//การแสดงแผนภาพคอนทัวร์ของการกระจายของชอย-วิลเลียมส์
figure(4)
contour(f,t,P);
title('Contour of Choi&Williams Distribution');
```

```
xlabel('frequency (Hz)');
ylabel('time(s)');
//การแสดงระนาบของความถี่ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าการกระจายของชอย-วิลเลียมส์มากที่สุด
figure(5)
plot(t,percent_data,'-k')
xlabel('time (s)');
ylabel('magnitude of CWD');
title('Choi&Williams distribution')

//การหาค่า ToF ด้วยวิธีตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยน
r3=1;
for r3=1:length(data_plot)
  if data_plot(r3,1)>2.4                          //ตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ 2.4%
    position(o,1) = r3;
    o=o+1;
  end
end
//ประมาณค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลบริเวณค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
x1=percent_data(1,position(1,1)-2);               //ข้อมูล ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                                    เปลี่ยน ลงมาสองตำแหน่ง
x2=percent_data(1,position(1,1)-1);               //ข้อมูล ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                                    เปลี่ยน ลงมาหนึ่งตำแหน่ง
x3=percent_data(1,position(1,1)-0);               //ข้อมูล ณ ตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
x4=percent_data(1,position(1,1)+1);               //ข้อมูล ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                                    เปลี่ยน ขึ้นไปหนึ่งตำแหน่ง
x5=percent_data(1,position(1,1)+2);               //ข้อมูล ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                                    เปลี่ยน ขึ้นไปสองตำแหน่ง

time1=t3(position(1,1)-2,1);                      //เวลา ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                                    เปลี่ยน ลงมาสองตำแหน่ง
time2=t3(position(1,1)-1,1);                      //เวลา ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                                    เปลี่ยน ลงมาหนึ่งตำแหน่ง
time3=t3(position(1,1),1);                        //เวลา ณ ตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
time4=t3(position(1,1)+1,1);                      //เวลา ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                                    เปลี่ยนขึ้นไปหนึ่งตำแหน่ง
time5=t3(position(1,1)+1,1);                      //เวลา ณ ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่มีค่ามากกว่าระดับจุดเริ่ม
                                                    เปลี่ยนขึ้นไปสองตำแหน่ง
y_amplitude=[x1  x2  x3]';
x_time=[time1 time2 time3]';
```

```
P=polyfit(x_time,y_amplitude,1);                    //การหาสมการเส้นตรงของช่วงข้อมูลบริเวณค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
amplitude=2.4;                                      //การตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยน
ToF = (amplitude-P(1,2))/P(1,1)-21.6*10^-6          //การหาค่า ToF ซึ่งต้องลบด้วยค่า delay time ของแนนด์เกต
real_distance = 0.06;                               //ระยะทางที่ทำการวัด
v=331+(0.6*27)                                      //การหาค่าความเร็วของคลื่นเหนือเสียง
Distance= v*ToF/2                                   //การคำนวณระยะทาง
error = abs((Distance-real_distance)/0.30)*100      //การคำนวณค่าความผิดพลาดของระยะทาง
```

ภาคผนวก ฉ.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

1. “Ultrasonic Distance Measurement based on Digital Signal Processing” Proc. ROVISP 2003 International Conference on Robotics, Vision, Information and Signal processing, 22-24 January 2003

2. “จีนเนติกอัลกอริทึมสำหรับการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกโดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25, ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 21-22 พฤศจิกายน 2545.

3. “การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยอาศัยเทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล”, การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทยครั้งที่ 3, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 18-19 กรกฎาคม 2545.

Ultrasonic Distance Measurement based on Digital Signal Processing

Arthit Srikaew[1], Kitti Attakitmongcol[2], Sarawut Sujitjorn[3] and Tiwawan Netpong[4]

Signal and Image Processing Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand
[1]Tel: +66-44-224-405, Fax: +66-44-224-220, E-mail: ra@ccs.sut.ac.th
[2]Tel: +66-44-224-367, Fax: +66-44-224-220, E-mail: kitti@ccs.sut.ac.th

Control and Automation Research Group, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand
[3]Tel: +66-44-224-400, Fax: +66-44-224-220, E-mail: sarawut@ccs.sut.ac.th
[4]Tel: +66-44-223-392, Fax: +66-44-223-394, E-mail: tiwawan_n@hotmail.com

Abstract

This article presents digital signal processing techniques for a high-accuracy ultrasonic distance measurement. Two techniques are proposed including an optimum threshold technique using genetic algorithm and a time-frequency domain technique using wavelet transform. The objective of both techniques is to precisely calculate distance from ultrasonic sensors with minimum error. The algorithm of the proposed techniques has been developed and experimentally used with 40-kHz ultrasonic sensors. Details of the experiment are described and the performance comparisons of both techniques are discussed.

Keywords:

ultrasonic distance measurement, time of flight, optimum threshold, genetic algorithm, wavelet transform

Introduction

Ultrasonic sensors are widely used for distance measurement in industrial robotic and automatic system because it is not expensive and very simple to use [1]. The fundamental concept of distance measurement with ultrasonic sensors is to calculate a "time of flight" or "ToF" [2] which is the time that the ultrasonic wave travels from a transmitter through the media and echoes back to a receiver. The distance can then be computed as follow:

$$s = \frac{v \times ToF}{2} \quad (1)$$

where s is a measured distance and v is a velocity of ultrasonic.

Obviously, the accuracy of distance measurement depends on two key elements: ultrasonic velocity and ToF. There are many factors that affect the velocity of ultrasonic which directly involves the media that the ultrasonic travels through. These include types, physical and chemical structures, temperature and humidity of the media [3-4]. While these effects on ultrasonic velocity can be compensated in order to achieve a high accuracy of ultrasonic velocity measurement, the ToF can have a considerably greater impact on distance measurement. Typically, there are two technologies that provide the accurate calculation of ToF: analog and digital technology [5]. By using analog technology, high-efficiency transmitters and receivers can be designed and built. This, however, requires high precision and expensive components. Such a system is also not flexible. The more flexible system using digital technology relies merely on techniques of signal processing. The precision of measurement can be adjusted upon the digital signal processing technique which yields a much lower cost for the system.

One simple technique to compute ToF is a threshold method [6]. Mainly, this technique is to find a threshold level on the echo wave. Once the amplitude of the echo wave is above this threshold level, the total time is then measured as the ToF. However, the echo wave practically arrives at the receiver before the threshold level is reached. This can give a greater value of ToF and yield a greater distance measurement than it should normally be [7]. In order to compensate for this erroneous, the optimum threshold value can be effectively used. In additions, a poor resolution of measurement from suddenly attenuated echo wave can cause another problem to the distance measurement.

From the limitations mentioned above, this article presents techniques for an ultrasonic distance measurement by using digital signal processing approach to precisely compute the ToF. Two techniques are proposed including an optimum threshold technique using genetic algorithm and a time-frequency domain technique using wavelet transform. The objective of both techniques is to measure distance using an ultrasonic sensor with minimum error.

Approach and Method

Processing technique

Optimum threshold technique

This optimum threshold technique is to find the amplitude changing level of the echo wave. Once the amplitude of the echo wave is above this level, the total measured time is the ToF. In addition, the genetic algorithm has been applied to find the optimum amplitude changing level such that the distance error is minimized.

- *Genetic Algorithm (GA)*

GA is one of efficient search methods based on the principle of natural selection [8]. It has been successfully applied as a tool for optimization problems in broad fields such as engineering, economic, etc. GA can provide approximate solutions for multivariable optimization problems. In order to apply GA appropriately, the problem must be firstly converted to a criterion function called "fitness function". This function represents the performance of the system. The higher the fitness value, the better the performance. GA cycle consists of three main procedures namely selection, genetic operation, and replacement, respectively. Generally, at the first step GA starts a random selection of population from the population set. Then the fitness evaluation is invoked. The retained population must pass the minimum requirement of the fitness evaluation while the rest is discarded. By using genetic operations; crossover and mutation, these retained members are then parenting to produce offspring. All the parents and offspring have to go through the process of fitness evaluation again and only the strong ones are retained. These strong members are then used as replacement to the startup population. Afterward, parenting occurs and the process is repeated until the most fitness member or optimum solution is found. The readers can find more detailed information about GA in [8-9]. A brief summary of the construction of GA is as follows:

1. Define chromosome: For an optimization problem, the parameters to be searched have to be defined as parameter strings. These strings can be coded as binary or real and termed chromosome.
2. Define the fitness function: The fitness function is the performance index of GA to resolve for acceptable solutions. The design of the fitness function can be based on the problem's requirement, e.g. error, convergent rate, etc.
3. Generate initial population: The initial population of N sets are randomly generated with the size of N chosen arbitrarily.
4. Generate next generation or stop: To generate the next generation, GA uses the operations of reproduction, crossover, and mutation. A stop criterion must be defined such as maximum number of generations, acceptable error, etc.

The GA steps are processed to search for the optimum threshold level. For this work, there are 40 chromosomes used. Each chromosome is encoded using the binary string with 13-bit resolution. The optimum threshold value is one of these chromosomes which have the best fitness value. The fitness value is evaluated from the error of distance measurement such that the less error, the better fitness value. The following error calculation is used for the fitness function:

$$\text{error} = \text{abs}\frac{(\text{calc.} - \text{act.})}{\text{full scale}} \tag{2}$$

where calc. is a computed distance
act. is an actual distance
full scale is the maximum measured distance from the experiment.

Time-frequency domain technique

- *Wavelet transform*

The continuous wavelet transform (CWT) is the result of the inner product of the original signal *f(t)* with the shifted and scaled version of the mother wavelet $\psi(t)$. it is mathematically expressed as

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \tag{3}$$

where a is the scale parameter
b is the shift parameter
* denote the complex conjugate and
CWT (a,b) is the wavelet transform coefficient.

The mother wavelet $\psi(t)$ must satisfy the admissibility condition [10]; i.e.

$$\int_{-\infty}^{\infty}\frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega}d\omega < \infty \tag{4}$$

where $\hat{\psi}(\omega)$ is the Fourier Transform of $\psi(t)$.

The procedure to find the ToF of this technique is as follows:

1. Compute the continuous wavelet transform of the echo wave.
2. Choose the wavelet coefficient plane with the scale parameter that has the largest magnitude of the wavelet coefficient.
3. Apply the threshold technique to the coefficients obtain from step 2.

In the first step, the mother wavelet used to compute the CWT should be resemble to the echo wave [11]. In this paper, three mother wavelets are selected for comparison. They are morlet wavelet, Maxican hat wavelet and coiflet wavelet which are shown in Figure 1.

Experiment

Investigation of the goodness of various processing techniques requires some experiments set up as represented by the block diagram in Figure 2. The computer receives the initial data and transfers them to the microprocessor that supervises the process of measurement. The ultrasonic sensor used in the measurements is of piezoelectric type having its resonant frequency at 40 kHz. The target is a

smooth solid material with the dimensions of 20x30 cm. This material is perpendicular to the front surface of the sensor case.

The distances to be measures are 6, 12, 18, 24, and 30 cm. The experiments were conducted under controlled environment of having temperature 27 °C. The microprocessor issues the gating signal to instruct the control circuit that in turn sends exciting pulses to the sensor. Relevant signals can be seen in the Figure 3. The reflected signal or echo signal recorded by an oscilloscope is also shown in the figure. Experiments were repeated many times for each distance measured to ensure repeatability and accuracy. The average results are shown in the following section.

In additions, field experiments were also conducted to assess the temperature effects on practical results. Since the effects are significantly small, they can then be neglected as the results are shown and briefly discussed in the appendix.

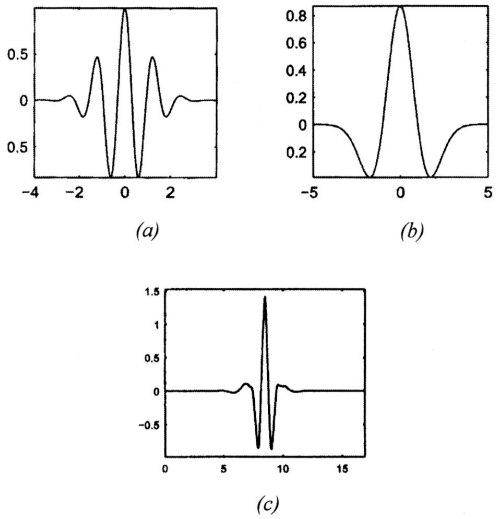


Figure 1 - mother wavelets a) morlet wavelet b) Mexican hat wavelet and c) coiflet wavelet

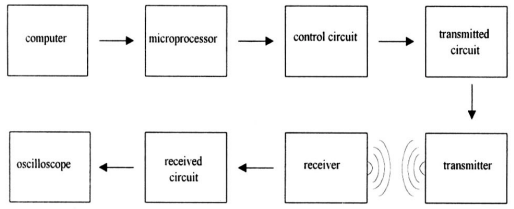


Figure 2 - Block diagram representing the experimental set up

Result

Processing of the echo wave utilizes the optimal threshold and the wavelet transformation methods, respectively. The results obtained from the threshold methods are tabulated in Table 1. The attempt with the later approach employs three types of mother wavelet namely morlet, Maxican hat, and coiflet wavelets. The wavelet approach gives the results shown in Tables 2, 3, and 4, respectively. Furthermore, some of the results of the wavelet transformation method are illustrated as surface plots in Figure 4. Figure 5 shows the maximum envelope that can be extracted from the surface plots. The envelope is particularly useful for processing to obtain the measured distance.

Table 1 - Experimental results obtained from the optimal threshold method

Actual distance (cm)	Measured distance (cm)	Full-scale error (%)	Amplitude changing level (%)
6	6.10	0.33	0.00153
12	12.04	0.13	0.00136
18	18.12	0.40	0.00174
24	24.03	0.10	0.00244
30	30.09	0.30	0.00305

Table 2 - Experimental results obtained from the wavelet method using the morlet mother wavelet

Actual distance (cm)	Measured distance (cm)	Full-scale error (%)	Amplitude changing level (%)
6	6.02	0.07	3
12	12.03	0.10	3
18	18.07	0.23	3.5
24	24.03	0.10	5
30	30.07	0.23	5

Table 3 - Experimental results obtained from the wavelet method using the Maxican hat mother wavelet

Actual distance (cm)	Measured distance (cm)	Full-scale error (%)	Amplitude changing level (%)
6	6.03	0.10	3
12	12.10	0.34	3.5
18	18.08	0.28	3.5
24	24.05	0.16	5
30	30.07	0.25	5

Table 4 - Experimental results obtained from the wavelet method using the coiflet mother wavelet

Actual distance (cm)	Measured distance (cm)	Full-scale error (%)	Amplitude changing level (%)
6	6.04	0.13	3
12	12.05	0.18	3.5
18	18.07	0.23	3.5
24	24.06	0.19	5
30	30.07	0.23	5

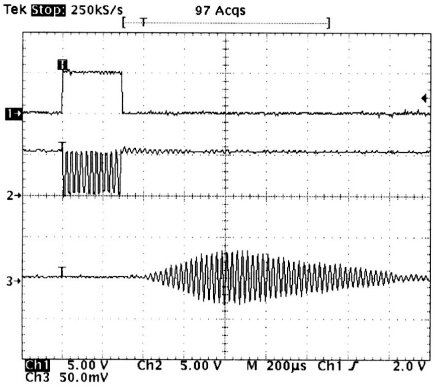
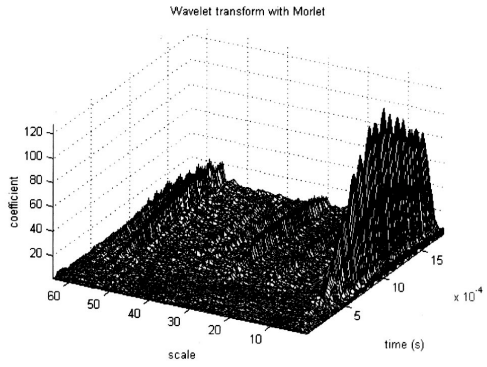


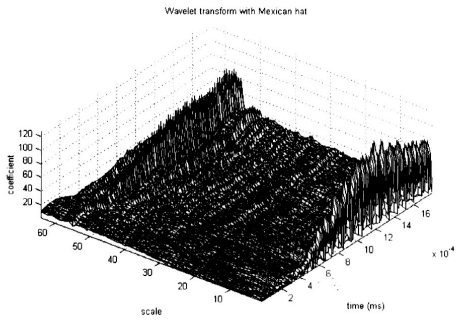
Figure 3 - Recorded signals
Upper: gating signal from microprocessor
Middle: exciting pulse of the sensor
Lower: reflected signal (or echo wave)

Discussion

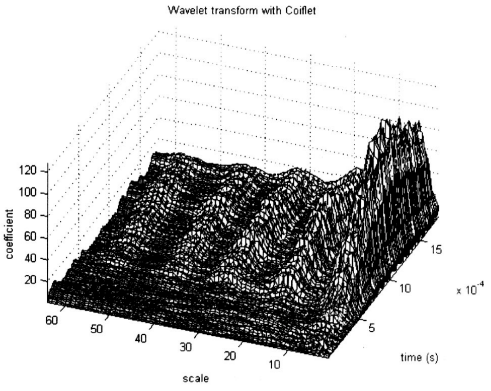
From the experimental results, the optimum threshold approach gives the minimum and maximum full-scale error of 0.10 % and 0.40 %. Compare to the time-frequency domain technique, the minimum full-scale error of morlet, Mexican hat and coiflet wavelets are 0.07 %, 0.10% and 0.13 % and the maximum full-scale error of the corresponding mother wavelets are 0.23 %, 0.34 % and 0.23 %, respectively. By considering the computed distances and the full-scale errors, the results clearly demonstrate that the time-frequency domain technique provides the better distance measurement than the optimum threshold technique even though the threshold level is manually chosen in the time-frequency domain technique. Though, the results from the optimum threshold technique yield the less accuracy of distance measurement, this technique, however, has the advantage of finding the threshold level automatically for any distance measurement. In the computation of ToF for the optimum threshold technique using genetic algorithm, a linear interpolation has been used in this work to interpolate ToF between ranges of



(a)

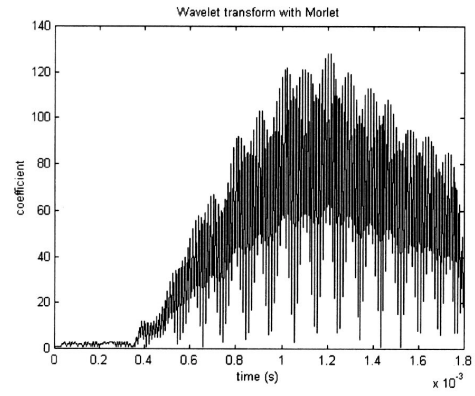


(b)

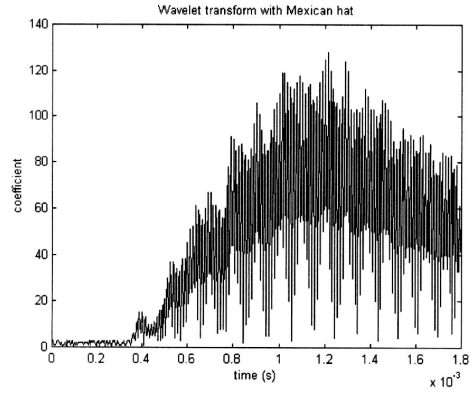


(c)

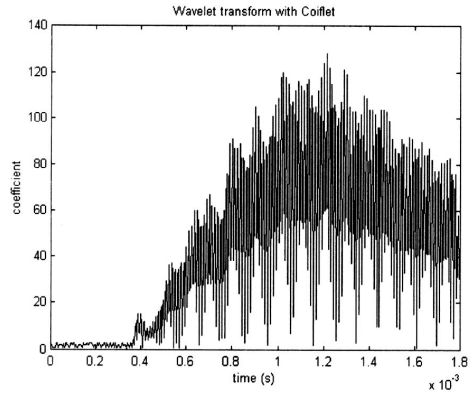
Figure 4 - Surface plots of the results obtained from wavelet method using various mother wavelets a) morlet wavelet, b) Maxican hat wavelet, and c) coiflet wavelet



(a)



(b)



(c)

Figure 5 – Maximum envelope extracted from the surface plot (a) morlet wavelet (b) Maxican hat wavelet and (c) coiflet wavelet

measured distance. Consequently, this can be improved by using the more efficient interpolation such as cubic spline interpolation. The advantage of using genetic algorithm for automatically finding the threshold value can also be applied together with the time-frequency domain technique to achieve the higher accuracy of distance measurement (which should be at least better than manually choosing the threshold value).

Conclusion

Digital signal processing techniques for distance measurement from ultrasonic sensors have been developed. The optimum threshold technique uses genetic algorithm to automatically find the threshold value for any distance measurement. The time-frequency domain technique using wavelet transform yields better results, especially morlet wavelet which gives the best result above all other wavelets used in this work. The results show that the full-scale error is efficiently small which can provide a very accurate distance measurement. Using digital signal processing techniques can greatly improve the performance of ultrasonic distance measurement. In particular, the presented wavelet approach is very promising for a real-time implementation.

Appendix

Field experiments were conducted in the afternoon of July (during the rainy season). The average temperature was 34.5 °C, about 7.5 °C higher than that of controlled environment. Figure A1 illustrates the distance computed from the controlled environment and the field experiments. Both cases exhibit linear relationship between distance and ToF. The straight lines plotted also show small magnitude of differences between the two. Temperature compensation can be done in a simple manner using digital zero-span adjustment, for example.

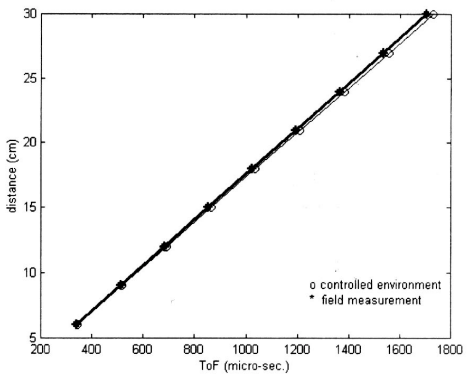


Figure A1 – Distance versus ToF
(temperature elevated case)

Acknowledgement

Financial support from the National Electronics and Computer Technology Center to disseminate the research results is greatly acknowledged.

References

[1] Sabatini, A. and Spinielli, E. 2000. Correlation techniques for digital time of flight measurement by airborne ultrasonic rangefinder. *Proc. IEEE Conf. Intelligent Robots and System* 3:2168-2175.

[2] Youngjoon, H. and Hernsoo, H. 1999. Localization and classification of target using two pairs of ultrasonic sensors. *Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation* 1:637-643.

[3] Asher, R. C. ed. 1997. *Ultrasonic sensor.* Institute of Physics Publishing.

[4] Andria, G.; Attivissimo, F. and Lanzolla, A. 1998. Digital measuring techniques for high accuracy ultrasonic sensor application. *Proc. IEEE Conf. Instrumentation and Measurement Technology* 2:1056-1061.

[5] Andria, G.; Attivissimo, F. and Giaquinto, N. 1999. Digital methods for very accurate ultrasonic sensor measurments. *Proc. IEEE Conf. Instrumentation and Measurement Technology* 3:1687-1692.

[6] Marioli, D.; Narduzzi, C.; Offelli, C.; Petri, D.; Sardini, E. and Taroni, A. 1992. Digital time-of-flight measurement for ultrasonic sensors. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement* 41(1):93-97.

[7] Parrilla, M.; Anaya, J. J. and Fritsch, C. 1991. Digital signal processing techniques for high accuracy ultrasonic range measurements. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement* 40(4):759-763.

[8] Man, K. F.; Tang, K. S. and Kwong, S. 1996. Genetic algorithms: concepts and applications. *IEEE Trans. Industrial Electronics* 43(5):519-534.

[9] Chambers, L. ed. 1995. *Practical Handbook of Genetic Algorithms.*: CRC Press.

[10] Abbate, A.; Koay, J.; Frankel, J.; Schroeder, S. and Das, P. 1994. Application of wavelet transform signal processor to ultrasound. *Proc. IEEE Ultrasonics Symposium* 2: 1147-1152.

[11] Michalodimitrakis, N. and Laopoulos, Th. 2001. On the use of wavelet transform in ultrasonic measurment system. *Proc. IEEE Conf. Instrumentation and Measurment Technology* 1: 589-594.

จีนเนติกอัลกอริทึมสำหรับการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกโดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด
Genetic Algorithm for Ultrasonic-Based Distance Measurement Using Optimum Threshold Technique

ทิวาวรรณ เนตรผง อาทิตย์ ศรีแก้ว และสราวุฒิ สุจิตจร
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000
โทร : (044) 223392 E-mail: tiwawan_n@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลงานวิจัยในการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเหนือเสียง สำหรับวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้จีนเนติกอัลกอริทึมทำการค้นหาระดับจุดเริ่มเปลี่ยนดังกล่าว เพื่อให้ผลการหาค่าเวลาในการเดินทางของคลื่นเหนือเสียง ซึ่งใช้ในการคำนวณหาระยะทางมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด วิธีการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่ได้นำเสนอนี้ได้ทำเป็นอัลกอริทึม โดยในการทดลองวัดระยะทางได้ใช้อัลทราโซนิกเซนเซอร์ที่มีความถี่เรโซแนนซ์ 40 กิโลเฮิรตซ์ เป็นเซนเซอร์ในการวัด สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอนี้จะทำการเปรียบเทียบความแม่นยำกับวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดาทั่วไป

Abstract

This article presents ultrasonic-based distance measurement using the optimum threshold technique. In order to find the optimum threshold level, the artificial intelligence technique called genetic algorithm is applied. This optimum threshold level allows the calculation of "time to flight" or "ToF" to be very accurate. Consequently, the distance measurement based on this ToF can then be calculated with minimum error. In this article, details of the 40-kHz ultrasonic-based measurement system are described. Finally, the experimental results between the regular threshold technique and the optimum threshold technique are discussed and summarized.

Keywords: ultrasonic distance measurement, time of flight, optimum threshold, genetic algorithm

1. บทนำ

ในงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์ อัลทราโซนิกเซนเซอร์มีบทบาทเป็นอย่างมากในการนำมาใช้เป็นเครื่องมือวัดระยะทาง เนื่องจากต้นทุนต่ำ ใช้งานง่ายและทนทาน [1] ซึ่งการวัดระยะทางนั้นมีพื้นฐานมาจากการหาเวลาที่คลื่นเหนือเสียงเดินทางจากเซนเซอร์ตัวส่งผ่านตัวกลาง และสะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับเมื่อกระทบกับวัตถุหรือผิวสัมผัสใดๆ หรือที่เรียกว่า time of flight (ToF) [2] ระยะทางนั้นอาจหาได้จาก

$$s = \frac{v \times ToF}{2} \qquad (1)$$

เมื่อ s คือ ระยะทาง และ v คือ ความเร็วของคลื่นเหนือเสียง จากสมการ (1) จะเห็นว่า ความแม่นยำของการวัดระยะทางจะขึ้นอยู่กับความเร็วของคลื่นเหนือเสียง และ ToF ความเร็วของคลื่นเหนือเสียงที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางนั้นเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของแก๊สที่เป็นตัวกลาง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความชื้น คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของแก๊สหรือของไหลที่เป็นตัวกลาง ความเร็วเสียงในอากาศนั้นจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิซึ่งสามารถที่จะปรับชดเชยให้แม่นยำได้ไม่ยากนัก [3] ส่วน ToF นั้นจะมีผลต่อความแม่นยำในการวัดระยะทางเป็นอย่างมาก ในการหาค่า ToF โดยทั่วไปจะนิยมใช้วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold method) [4] ซึ่งจะวิเคราะห์สัญญาณสะท้อนกลับมาที่เซนเซอร์ตัวรับ โดยจะทำการตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนของแอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับ เมื่อสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับมีแอมพลิจูดมากกว่าค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้ ค่า ToF จะเป็นค่าเวลา ณ จุดที่แอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมีค่ามากกว่าค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้นั่นเอง [5] ในความเป็นจริงแล้วสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับจะเกิดขึ้นก่อนระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งค่าไว้ ทำให้ค่า ToF ที่ได้มีค่ามากกว่าค่า ToF ที่ควรจะเป็น ดังนั้น ระยะทางที่คำนวณได้จึงไม่แม่นยำ

บทความนี้จึงได้นำเสนอวิธีการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด โดยนำเอาจีนเนติกอัลกอริทึมมาช่วยในการค้นหาระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ผลการหาค่า ToF และผลการวัดระยะทางมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เนื่องจากจีนเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถแก้ปัญหาการถูกล็อคด้วยคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นที่ดีที่สุด (local optimum) ได้ ทำให้มั่นใจได้ว่า คำตอบที่ได้ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดในวงกว้าง บทความนี้จะประกอบไปด้วยหัวข้อใหญ่ๆ ทั้งหมด 5 หัวข้อรวมบทนำ หัวข้อที่สองจะกล่าวถึงการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ด้วยวิธีการตั้งค่าจุด

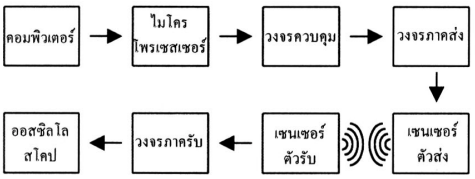
เริ่มเปลี่ยน หัวข้อที่สามจะกล่าวถึงจีนเนติกอัลกอริทึมในการหาค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด และในหัวข้อที่สี่จะกล่าวถึงผลการทดลอง พร้อมทั้งสรุปในหัวข้อที่ห้า

2. การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยน

จากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่า การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์จะอาศัยหลักการทั่วไปของอัลทราโซนิก กล่าวคือ คลื่นเหนือเสียงจะถูกส่งออกไปจากเซนเซอร์ตัวส่ง คลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง เช่น อากาศ หรือของไหลอื่นๆ เมื่อคลื่นที่ถูกส่งออกไปนั้นกระทบผิวสัมผัสหรือวัตถุใดๆ ก็จะสะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับ ดังนั้น การหาค่า ToF จึงวิเคราะห์ได้จากสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับ

2.1 ระบบวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์

ระบบวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้อาจแทนได้ด้วยแผนภาพดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์

สำหรับการทำงานของระบบวัดระยะทางนั้นผู้ใช้จะสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์ซึ่งติดต่อกับไมโครโพรเซสเซอร์ผ่านทางพอร์ทอนุกรม เพื่อสั่งวงจรควบคุมการทำงาน โดยจะสั่งให้เซนเซอร์ตัวส่งส่งคลื่นออกไป เมื่อคลื่นไปกระทบกับหน้าสัมผัสของวัตถุเป้าหมาย คลื่นนั้นก็จะสะท้อนกลับมาที่เซนเซอร์ตัวรับ ซึ่งวงจรภาครับจะต่อกับออสซิลโลสโคปที่ทำหน้าที่บันทึกสัญญาณที่สะท้อนกลับ เพื่อประมวลผลหาค่า ToF และระยะทางต่อไป โดยสัญญาณจากไมโครโพรเซสเซอร์ที่ใช้ควบคุม สัญญาณที่ไปกระตุ้นเซนเซอร์ตัวส่ง และสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับแสดงไว้ในรูปที่ 2

2.2 วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยน

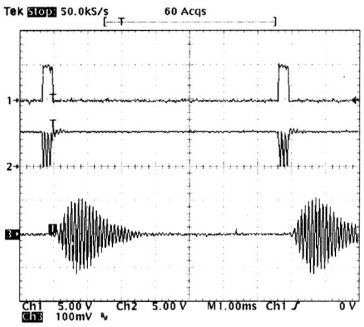
สำหรับหลักการของวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นสามารถอธิบายได้โดยใช้อาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$|w(t)| \geq \alpha \qquad (2)$$

เมื่อ $|w(t)|$ คือ แอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ

α คือ ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน

ในการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับวัดระยะทางด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนนั้น เนื่องจากข้อมูลของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับในแต่ละระยะทางมีแอมพลิจูดไม่เท่ากัน ยิ่งระยะทางที่วัดไกลมากขึ้นแอมพลิจูดก็จะยิ่งลดลง ทำให้ไม่สามารถที่จะตั้งระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เป็นค่าแอมพลิจูดที่แน่นอนค่าเดียวได้ และไม่สามารถที่จะตั้งระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเป็นค่าเดียวสำหรับทุกระยะทางได้ ซึ่งนับว่าเป็นข้อจำกัดของวิธีนี้ ดังนั้น จึงตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เทียบกับค่าแอมพลิจูดสูงสุดในข้อมูลแต่ละชุด และตั้งระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเป็นช่วง คือ 7-20 เปอร์เซ็นต์ของค่าแอมพลิจูดสูงสุด ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาค่าเวลาที่คลื่นเดินทางได้ทุกระยะทางที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 2 สัญญาณของอัลทราโซนิกเซนเซอร์
สัญญาณบน : สัญญาณจากไมโครโพรเซสเซอร์ที่ใช้ควบคุม
สัญญาณกลาง : สัญญาณที่ไปกระตุ้นเซนเซอร์ตัวส่ง
สัญญาณล่าง : สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับ

3. จีนเนติกอัลกอริทึมในการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์

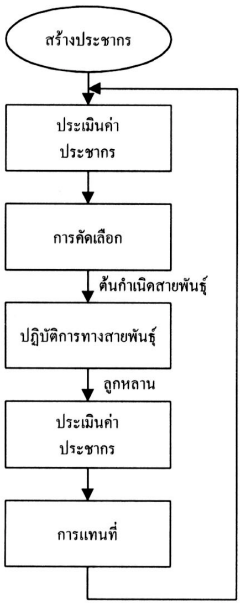
จีนเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm หรือ GA) [5] เป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยอาศัยหลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์ ซึ่งประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ กล่าวคือ การคัดเลือกสายพันธุ์ (selection) ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (genetic operation) และการแทนที่ (replacement) ในงานวิจัยนี้ได้นำจีนเนติกอัลกอริทึมมาใช้ค้นหาระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งทำให้การหาค่า ToF และระยะทางที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

หลักการทำงานของ GA แสดงได้เป็นแผนภูมิดังรูปที่ 3 โดยจะเริ่มที่การสร้างประชากรที่ประกอบไปด้วยกลุ่มของโครโมโซม (chromosome) จากนั้นจะทำการประเมินค่าของกลุ่มโครโมโซมเพื่อให้ได้ค่าความเหมาะสม ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะถูกนำไปในขั้นตอนการคัดเลือก

โครโมโซมที่ดีที่สุดบางกลุ่ม เพื่อนำมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์และสร้างโครโมโซมลูกหลานด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์ แล้วทำการประเมินค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลานอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นโครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมลูกหลานโดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสิน และวนซ้ำกลับไปสู่การคัดเลือก ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ และการแทนที่ จนกว่าจะได้โครโมโซมที่ดีที่สุด

3.1 โครโมโซมประชากรและการเข้ารหัส

โครโมโซมที่เป็นกลุ่มประชากร คือ ตัวแทนของคำตอบของระบบที่ต้องการให้ GA ค้นหา สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ประชากรแต่ละรุ่นประกอบไปด้วยโครโมโซม 40 โครโมโซม ในแต่ละโครโมโซมนั้นจะต้องทำการเข้ารหัสประชากรเพื่อให้ GA สามารถเข้าใจและทำงานด้วยได้ ซึ่งการเข้ารหัสของโครโมโซมในงานวิจัยนี้เป็นแบบเลขฐานสอง (binary string) ที่มีความละเอียด 13 บิต โดยโครโมโซมเหล่านี้จะใช้เป็นตัวแทนของระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน



รูปที่ 3 แผนภูมิการทำงานของ GA

3.2 การประเมินค่าความเหมาะสม

การประเมินค่าความเหมาะสมของงานวิจัยนี้ จะใช้ค่าความผิดพลาดของระยะทางเป็นเครื่องมือในการวัดค่าความเหมาะสม โดยโครโมโซมที่เหมาะสมที่สุดจะต้องมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งฟังก์ชันค่าความเหมาะสมจะใช้จากคำนวณค่าผิดพลาดสัมบูรณ์ของระยะทาง เป็นดังนี้

$$\text{error} = \text{abs}\frac{(\text{calc.} - \text{meas.})}{\text{full scale}} \quad (3)$$

โดย calc. คือ ระยะทางที่คำนวณได้
meas. คือ ระยะทางทำการวัด
full scale คือ ระยะที่มากที่สุดที่ทำการวัดในการทดลอง

3.3 การคัดเลือกสายพันธุ์

การคัดเลือกสายพันธุ์เป็นการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด โครโมโซมที่ถูกคัดเลือกจะถูกนำไปใช้เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อใช้ในการกำเนิดลูกหลานรุ่นถัดไป ในการคัดเลือกจะทำได้โดยพิจารณาค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้นๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจัดอันดับ (ranking selection) โดยโครโมโซมจะถูกเรียงให้มีอันดับ r ตามค่าความเหมาะสม โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่น้อยที่สุดจะมีอันดับ 1 ในขณะที่โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่มากที่สุดจะมีอันดับ N โดยที่ N คือจำนวนโครโมโซมทั้งหมด โอกาสในการถูกคัดเลือกของโครโมโซม P(S) จะมีค่าเท่ากับ

$$P(S) = \frac{r}{E_{avg}} \quad (4)$$

โดย E_{avg} ค่าเฉลี่ยของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมทั้งหมด ซึ่งโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อยที่สุดจะมีโอกาสในการถูกคัดเลือกต่ำที่สุด และโอกาสในการถูกคัดเลือกจะมากขึ้นตามโครโมโซมที่มีลำดับค่าความเหมาะสมมากขึ้น

3.4 ปฏิบัติการทางสายพันธุ์

หลังจากการคัดเลือกจะได้โครโมโซมใหม่มาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ ซึ่งโครโมโซมชุดใหม่จะผ่านการปฏิบัติการทางสายพันธุ์เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นโครโมโซมลูกหลานที่ได้รับส่วนดีจากโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ ปฏิบัติการทางสายพันธุ์จะมีอยู่ 2 วิธีหลักๆ กล่าวคือ

- การทำครอสโอเวอร์ (crossover) เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซมระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไปเพื่อให้ได้เป็นโครโมโซมลูกหลาน การทำครอสโอเวอร์นี้จะมีการกำหนดอัตราการครอสโอเวอร์ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้ความน่าจะเป็น เป็นตัวกำหนด สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดอัตราครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.7
- การทำมิวเทชัน (mutation) เป็นวิธีการแปรผันขึ้นหรือเปลี่ยนแปลงส่วนย่อยของโครโมโซมเดิม ทำให้โครโมโซมนั้นกลายเป็นโครโมโซมใหม่ โดยปกติแล้วการทำมิวเทชันจะมีอัตราที่ค่อนข้างต่ำ ในที่นี้จะใช้อัตราการทำมิวเทชันที่ 0.05

3.5 การแทนที่

หลังจากการคัดเลือกสายพันธุ์และผ่านปฏิบัติการทางสายพันธุ์แล้ว โครโมโซมรุ่นเก่าจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมรุ่นที่ดีกว่าสำหรับการวิวัฒนาการในรุ่นถัดไปโดยใช้วิธีการแทนที่ประชากรเพียงบางส่วน เพื่อรักษาโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีไว้ ซึ่งจะช่วยให้วิวัฒนาการของคำตอบในรุ่นถัดไปดีขึ้นเรื่อยๆ

ในการหาระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนนั้น จะดำเนินตามกระบวนการต่างๆ จนกระทั่งได้โครโมโซมที่เหมาะสมที่สุดตามต้องการ ซึ่งเมื่อทำการถอดรหัสโครโมโซมแล้วจะได้ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด

นอกเหนือจากประสิทธิภาพของ GA ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดแล้ว ในงานวิจัยนี้ยังสามารถออกแบบให้ GA มีความสามารถในการคำนวณเพื่อตั้งระดับจุดเริ่มเปลี่ยนได้เองโดยอัตโนมัติกับทุกระยะทาง ทำให้ไม่จำเป็นต้องกำหนดระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนให้เป็นช่วงเหมือนดังวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดา

4. ผลการทดลอง

ในการวิจัยนี้ได้กำหนดระยะระหว่างชุดอัลทราโซนิกเซนเซอร์และวัตถุที่จะวัดระยะทางซึ่งทำจากแผ่นพลาสติกขนาด 20 x 30 เซนติเมตร ให้มีค่าที่แน่นอน 9 ตำแหน่ง คือ ที่ระยะ 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 และ 30 เซนติเมตร มีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 27 องศาเซลเซียส แล้วบันทึกสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับด้วยออสซิลโลสโคป จากนั้นนำสัญญาณที่บันทึกได้ไปประมวลผลด้วยอัลกอริทึมของวิธีที่ได้นำเสนอข้างต้น โดยผลการทดสอบด้วยวิธีที่ 1 คือ วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดาแสดงไว้ในตารางที่ 1 ส่วนผลการทดสอบด้วยวิธี GA คือ วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดแสดงไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งอาจสังเกตได้ว่า วิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด ให้ความผิดพลาดในการวัดน้อยกว่าวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดาอย่างมาก และให้ค่าผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 0.5 % เท่านั้น

ตารางที่ 1 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยน

ระยะทาง (cm)	ค่า ToF ที่ได้จากวิธีที่ 1 (ms)	ระยะทางจากวิธีที่ 1 (cm)	ความผิดพลาด (%)
6	0.398	6.28	0.93
9	0.543	9.30	1.00
12	0.710	12.20	0.67
15	0.901	15.40	1.33
18	1.063	18.24	0.80
21	1.252	21.56	1.87

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ระยะทาง (cm)	ค่า ToF ที่ได้จากวิธีที่ 1 (ms)	ระยะทางจากวิธีที่ 1 (cm)	ความผิดพลาด (%)
24	1.423	24.55	1.83
27	1.586	27.34	1.13
30	1.765	30.51	1.70

ตารางที่ 2 ผลการวัดระยะทางด้วยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุด

ระยะทาง (cm)	ค่า ToF ที่ได้จากวิธี GA (ms)	ระยะทางจากวิธี GA (cm)	ความผิดพลาด (%)	ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (%)
6	0.351	6.10	0.33	0.00153
9	0.522	9.06	0.20	0.00153
12	0.693	12.04	0.13	0.00136
15	0.866	15.03	0.10	0.00153
18	1.044	18.12	0.40	0.00174
21	1.212	21.04	0.13	0.00305
24	1.384	24.03	0.10	0.00244
27	1.564	27.15	0.50	0.00305
30	1.733	30.09	0.30	0.00305

5. สรุป

จากผลการทดสอบอัลกอริทึมการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดาและวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะสมที่สุดที่ได้นำเอาจีนเนติกอัลกอริทึมมาค้นหาระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยน พบว่า วิธีการที่นำเสนอให้ค่าผิดพลาดน้อยกว่ามาก ซึ่งค่าผิดพลาดสูงสุดจำกัดไว้เพียง 0.5 % เท่านั้น เป็นผลให้ระยะทางที่วัดได้มีความแม่นยำกว่า อีกทั้ง GA ยังสามารถกำหนดระดับค่าเริ่มเปลี่ยนได้โดยอัตโนมัติสำหรับทุกระยะทาง ซึ่งนับว่าเป็นการแก้ข้อจำกัดของวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบธรรมดา และแม้ว่าในการหาระยะทางด้วยวิธีของ GA จะมีข้อเสีย คือ ใช้เวลามากกว่าวิธีธรรมดา แต่ก็คุ้มค่ากับความแม่นยำที่ได้รับ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่เอื้ออำนวยสถานที่ปฏิบัติงานวิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Sabatini, and E. Spinielli "Correlation techniques for digital time of flight measurement by airborne ultrasonic rangefinder" *Proc. IEEE Conf. Intelligent Robots and System,* Vol. 3, 2000, pp. 2168-2175.

[2] D. Marioli, C. Narduzzi, C. Offelli, D. Petri, E. Sardini and A. Taroni "Digital time-of-flight measurement for ultrasonic sensors" *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement,* Vol. 41, No. 1, 1992, pp. 93-97.

[3] G. Andria, F. Attivissimo and A. Lanzolla "Digital methods for very accurate ultrasonic sensor measurments" *Proc. IEEE Conf. Instrumentation and Measurement Technology*, Vol. 3, 1999, pp. 1687-1692.

[4] M. Parrilla, J. J. Anaya and C. Fritsch "Digital signal processing techniques for high accuracy ultrasonic range measurements" *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, Vol. 40, No. 4, 1991, pp. 759-763.

[5] G. N. Edouard and E. N. Tatiana, E. N. "On the uncertainty of time-frequency domain resolutions for ultrasonic velocity evaluation of surface elastic waves" *Proc. 15th World Conference on Non-destructive Testing*, Roma, Italy, October 15-21, 2000.

[6] อาทิตย์ ศรีแก้ว, "จีนเนติกอัลกอริทึม ตอนที่ 1" *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 1, หน้า 69-83, มกราคม-มีนาคม 2545.



นางสาวทิวาวรรณ เนตรผง สำเร็จปริญญาตรีในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2543 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโทที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความสนใจงานวิจัยทางด้านระบบวัดคุม



ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อ พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก Vanderbilt University ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อ พ.ศ. 2540 และ 2543 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความสนใจงานวิจัยทางด้าน computer and robot vision, image processing, neural networks, artificial intelligence และ intelligent system



นาวาอากาศโท สราวุฒิ สุจิตจร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีและปริญญาเอกในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากโรงเรียนนายเรืออากาศ และมหาวิทยาลัยเบอร์มิงแฮม ประเทศอังกฤษ เมื่อ พ.ศ.2527 และ 2530 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์และหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดำเนินงานวิจัยทางด้านระบบควบคุมเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น การดำเนินกระบวนการทางสัญญาณ การอนุรักษ์พลังงาน และการประยุกต์เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์

ชื่อบทความ (ภาษาไทย) การวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์โดยอาศัยเทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

(ภาษาอังกฤษ) Ultrasonic distance measurement based on digital signal processing

กลุ่มสาขาวิจัย วิศวกรรมศาสตร์ (Engineering)

ผู้นำเสนอบทความ ทิวาวรรณ เนตรผง, สราวุฒิ สุจิตจร, รังสรรค์ ทองทา, กิตติ อัตถกิจมงคล และ อาทิตย์ ศรีแก้ว

สถาบันการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทนำ

การวัดระยะทางในงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์ ส่วนใหญ่จะใช้อัลทราโซนิกเซนเซอร์เป็นเครื่องมือวัด เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและใช้งานง่าย [1] โดยการวัดระยะทางนั้นจะมีพื้นฐานมาจากการหาเวลาที่คลื่นเหนือเสียง (ultrasonic wave) เคลื่อนที่จากตัวส่งผ่านตัวกลางและสะท้อนกลับมายังตัวรับหรือที่เรียกว่า Time of Flight (ToF) ในการหาค่า ToF ให้มีความแม่นยำสูงสามารถทำได้สองวิธีใหญ่ๆ คือ การออกแบบระบบส่งและรับคลื่นแบบเทคโนโลยีแอนะลอกให้มีประสิทธิภาพสูง และใช้เทคโนโลยีดิจิตอล สำหรับวิธีแรกนั้นใช้ต้นทุนสูงเพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องจะต้องมีความเที่ยงตรงสูงและมีราคาแพง อีกทั้งยังไม่อ่อนตัว ในส่วนของเทคโนโลยีดิจิตอลซึ่งพึ่งพาเพียงเทคนิคประมวลผลสัญญาณดิจิตอลมีความอ่อนตัวสูงกว่า สามารถปรับความเที่ยงให้สูงได้ตามกระบวนการของการประมวลผลสัญญาณและยังใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่า บทความนี้จึงได้นำเสนอเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับมายังตัวรับเพื่อหาค่าToF สองเทคนิคที่แตกต่างกัน ได้แก่ เทคนิคการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะที่สุดโดยนำวิธีจีนเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm) [2] มาหาค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะที่สุด และเทคนิควิเคราะห์ทางเวลา-ความถี่ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต (wavelet transform) ซึ่งเป็นเทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิตอล เพื่อให้ผลการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเหนือเสียงที่ได้นำเสนอนี้เป็นการพัฒนาอัลกอริทึม และทดสอบด้วย MATLAB ในการตรวจสอบประสิทธิผลของอัลกอริทึมดังกล่าวอาจทำได้โดยเปรียบเทียบความแม่นยำของระยะทางที่วัดได้ระหว่างวิธีการทั้ง สองวิธี

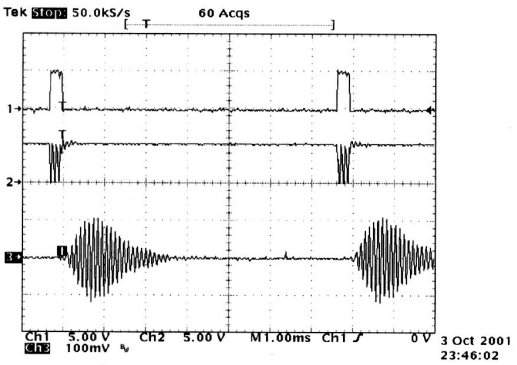
ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้หรืออุปกรณ์และวิธีการ

ระเบียบวิธีวิจัยในบทความนี้ใช้การทดลองวัดระยะทางด้วยชุดอัลทราโซนิกเซนเซอร์และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม MATLAB โดยพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณขึ้นเองเป็นบางส่วนและพึ่งพา Toolbox เป็นบางส่วน

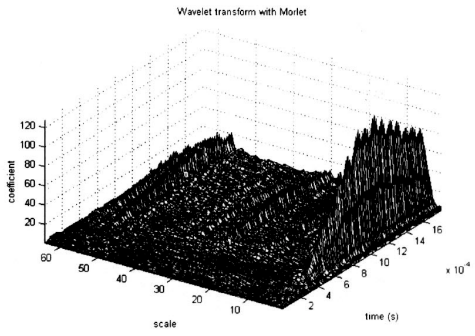
วิธีการวัดระยะทาง อาศัยหลักการทั่วไปของการวัดระยะทางด้วยอัลทราโซนิกเซนเซอร์ กล่าวคือ คลื่นเหนือเสียงจะถูกส่งออกไปจากตัวส่งคลื่น คลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศออกไปกระทบกับผิวสัมผัสหรือวัตถุใดๆ เมื่อคลื่นที่ถูกส่งออกไปนั้นกระทบกับผิวสัมผัสหรือวัตถุใดๆ ก็จะสะท้อนกลับมายังตัวรับคลื่น ระยะทางระหว่างจุดส่งและรับคลื่นกับผิวสัมผัสหรือวัตถุใดๆ ที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นจะขึ้นอยู่กับความเร็วเสียงในอากาศ และ ToF ซึ่งค่า ToF นี้อาจหาได้จากการวิเคราะห์สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับดังรูปที่1 ด้วยเทคนิคดังต่อไปนี้

1. เทคนิคการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนแบบเหมาะที่สุด เป็นการตั้งค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนของแอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ เมื่อสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับมีแอมพลิจูดมากกว่าค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้ ค่า ToF จะเป็นค่าเวลา ณ จุดที่แอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมีค่ามากกว่าค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่ตั้งไว้นั่นเอง และได้นำเอาจีนเนติกอัลกอริทึม ซึ่งเป็นวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ มาใช้ในการหาค่าระดับจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด ที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดระยะทางต่ำที่สุด

2. เทคนิควิเคราะห์ทางเวลา-ความถี่ด้วยวิธีการแปลงเวฟเล็ต การแปลงเวฟเล็ตเป็นการวิเคราะห์สัญญาณที่มีการปรับระดับความละเอียดในการวิเคราะห์ ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ในทุกความถี่ โดยการแปลงเวฟเล็ตมีหลักการ คือ ทำการหาสหสัมพันธ์ (correlation) ของสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับกับเวฟเล็ตแม่ (mother wavelet) [3] ในการเลือกเวฟเล็ตแม่นั้นจะเลือกใช้เวฟเล็ตแม่ที่มีรูปร่างคล้ายคลึงกับสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ ซึ่งบทความนี้ได้เลือกใช้เวฟเล็ตแม่ 3 ชนิด เพื่อเปรียบเทียบผลว่าชนิดใดจะให้ผลดีที่สุด เวฟเล็ตแม่ที่ใช้ คือ morlet wavelet, mexican hat wavelet และ coiflet wavelet แล้วใช้เทคนิคการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนเพื่อหาค่า ToF สำหรับในบทความนี้เวฟเล็ตแม่ที่ใช้วิเคราะห์แล้วได้ผลดีที่สุด คือ morlet wavelet ซึ่งผลการแปลงเวฟเล็ตด้วย morlet wavelet แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 สัญญาณของอัลทราโซนิกเซนเซอร์
สัญญาณบน : สัญญาณจากไมโครโพรเซสเซอร์ที่ไปเปิดเกต
สัญญาณกลาง : สัญญาณที่ไปกระตุ้นตัวส่ง
สัญญาณล่าง : สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับ



รูปที่ 2 ผลการแปลงเวฟเล็ตด้วย morlet wavelet

ผลการวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้กำหนดระยะระหว่างชุดอัลทราโซนิกเซนเซอร์และวัตถุที่จะวัดระยะทางให้มีค่าที่แน่นอน 5 ตำแหน่ง คือ ที่ระยะ 6, 12, 18, 24 และ 30 เซนติเมตร ซึ่งบันทึกสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังตัวรับด้วยออสซิลโลสโคป แล้วนำสัญญาณที่บันทึกได้ไปประมวลผลด้วยเทคนิคที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทั้ง 2 วิธี โดยผลที่ได้เป็นดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการวัดระยะทาง

ระยะทาง (cm)	ระยะทางที่คำนวณได้จากเทคนิคที่ 1 (cm)	ระยะทางที่คำนวณได้จากเทคนิคที่ 2 (cm)	Full-Scale Error (FSE) ของเทคนิคที่ 1 (%)	Full-Scale Error (FSE) ของเทคนิคที่ 2 (%)	ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนจากเทคนิคที่ 1	ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนจากเทคนิคที่ 2
6	6.10	6.02	0.33	0.07	0.00153	3
18	18.12	18.07	0.40	0.23	0.00174	3.5
30	30.09	30.07	0.30	0.23	0.00305	5

อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบการวัดระยะทาง เมื่อพิจารณาระยะทางที่คำนวณได้และค่า FSE จะพบว่า เทคนิคที่สองได้ผลการวัดระยะทางที่แม่นยำกว่าเทคนิคที่หนึ่ง อีกทั้งระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนของเทคนิคที่สอง เป็นการกำหนดค่าขึ้นเองจากการสังเกตผลการแปลงเวฟเล็ตยังให้ผลที่ดีกว่าเทคนิคที่หนึ่งอย่างชัดเจน

ข้อเสนอแนะ สำหรับการหาค่า ToF เทคนิคที่หนึ่ง เมื่อได้ระดับค่าจุดเริ่มเปลี่ยนจากจีนเนติกอัลกอริทึมแล้วคำนวณ ToF จากการประมาณในช่วง (interpolation) แบบเส้นตรง ดังนั้น ถ้าหากเปลี่ยนการประมาณในช่วงให้เป็นแบบอื่นที่เหมาะสม อาจจะให้ผลการคำนวณที่แม่นยำขึ้น ส่วนในเทคนิคที่สองถ้านำจีนเนติกอัลกอริทึมหาค่าระดับเริ่มเปลี่ยนให้เหมาะสมผลที่ได้จะแม่นยำมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1]. Sabatini, A. and Spinielli, E. (1994). Correlation techniques for digital time of flight measurement by airborne ultrasonic rangefinder. **Proc. IEEE Conf. Intelligent Robots and System**. 3: 2168-2175.

[2]. อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2545). จีนเนติกอัลกอริทึม ตอนที่ 1. **วารสารเทคโนโลยีสุรนารี**. 9(1).

[3]. Abbate, A., Koay, J., Frankel, J., Schroeder, S. and Das, P. (1994). Application of wavelet transform signal processor to ultrasound. **Proc. IEEE Ultrasonics Symposium.** 2: 1147-1152.

คำสำคัญ คลื่นเหนือเสียง, การวัดระยะทาง, การแปลงเวฟเล็ต

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ 105/187 ศิริรัตน์อพาร์ทเมนต์ ห้อง 205 ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

อีเมล์ tiwawan_n@hotmail.com โทรศัพท์ 044-223392

ประวัติผู้เขียน

นางสาวทิวาวรรณ เนตรผง เกิดเมื่อวันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ. 2520 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดเลย สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2543 เคยสอนวิชาปฏิบัติการ วิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะศึกษาระดับ ปริญญาโทที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 3 บทความ ดังที่ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ฉ.