

การติดตามเส้นขอบในภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์

นางสาวเอมอมร สุวิชากร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543
ISBN 974-346-426-3
ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๕1๑4๕๐14๗

BORDER TRACKING OF THYROID ULTRASOUND IMAGES

Miss Aimamorn Suvichakorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000


ISBN 974-346-426-3

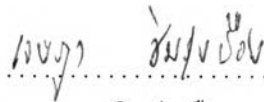
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การติดตามเส้นขอบในภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์
โดย นางสาวเอมอมร สุวิชากร
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.เจษฎา ชินรุ่งเรือง

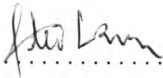
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่ง ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.เจษฎา ชินรุ่งเรือง)


..... กรรมการ
(อาจารย์สุวิทย์ นาคพีระยุทธ)

เอมอมร สุวิชากร : การติดตามเส้นขอบในภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์
(BORDER TRACKING OF THYROID ULTRASOUND IMAGES)
อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร.เจษฎา ชินรุ่งเรือง. 107 หน้า. ISBN 974-346-426-3.

แม้ว่าภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์จะนิยมใช้เพื่อการวินิจฉัยของแพทย์ เพราะมีค่าใช้จ่ายต่ำ และไม่มีอันตราย แต่ภาพดังกล่าวนั้นเข้าใจยาก ทั้งต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญเพื่อคำนวณขนาดของต่อมไทรอยด์ การคำนวณนั้นทำได้สองวิธี วิธีแรกจะเป็นการลากเส้นขอบทั้งหมดโดยผู้เชี่ยวชาญ หรือวิธีที่สองให้ผู้ชำนาญกำหนดจุดคร่าวๆ เพื่อให้คอมพิวเตอร์ประมาณขนาด วิธีแรกใช้เวลานาน ขณะที่การคำนวณขนาดจากจุดเพียงไม่กี่จุดของวิธีที่สองอาจเกิดความผิดพลาด และมีความแปรปรวนระหว่างผู้ใช้สูง ดังนั้นระบบติดตามเส้นขอบที่มีความแม่นยำและใช้เวลาน้อยจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการพัฒนาสองขั้นตอนของระบบติดตามเส้นขอบคือ การใช้วงจรกรองที่ประยุกต์จากวงจรถ่วงของซาวีสกี-โกเลย์หนึ่งมิติ เพื่อลดทอนสัญญาณรบกวน และคำนวณเส้นขอบจากค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรถ่วงดังกล่าว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการบรรจุนาบบพหุนาม อาศัยหลักการความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดของวงจรถ่วงที่เสนอขึ้นใหม่ มีประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนและคงสภาพขอบใกล้เคียงกับวงจรถ่วงมัลติฐานซึ่งนิยมใช้กันในปัจจุบัน แต่ใช้เวลาน้อยกว่ามาก ส่วนวงจรตรวจจับเส้นขอบที่สร้างขึ้นก็ให้เส้นขอบที่ต่อเนื่อง เหมาะแก่การใช้งานกับระบบติดตามเส้นขอบ การพัฒนาดังกล่าวจะเป็นพื้นฐานที่ดีสำหรับการสร้างระบบติดตามเส้นขอบในภาพอัลตราซาวนด์ต่อไป

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า.... ลายมือชื่อนิสิตเอมอมร.....สุวิชากร.....
สาขาวิชา ...วิศวกรรมไฟฟ้า.... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาเจษฎา.....ชินรุ่งเรือง.....
ปีการศึกษา ..2543.....

AIMAMORN SUVICHAKORN : BORDER TRACKING OF THYROID ULTRASOUND IMAGES. THESIS ADVISOR: CHEDSADA CHINRUNGRUENG.
Ph.D. 107 pp. ISBN 974-346-426-3.

Thyroid ultrasound images are widely used in clinical diagnoses because of their non-invasiveness, low-cost and easy operation. However, size measurement of thyroid must be carried out by medical experts due to the noisy characteristics of the images. To determine the thyroid size, the experts have to manually trace the boundary of thyroid or mark some reference points for rough approximation by computer. While manually tracing is highly time-consuming, rough approximation has low accuracy and is highly operator-dependent. Hence, more accurate and less time-consuming border tracking system is desirable. This thesis investigates two improved border tracking techniques: noise reduction and edge detection. For noise reduction, a filter based on two-dimensional extension of one-dimensional *Savitzky-Golay filter* is proposed. Experimental results indicate that the filter, using a principle of minimum mean square error polynomial surface fitting to image intensity, can achieve *good* noise reduction and edge-preservation on the same level as those of commonly-used median filter, but with far less computation time. For the other improvement, a new edge detector is derived from coefficients of the filter. These two improvements can be a *good base* for developing a more efficient border tracking system.

Department ..Electrical Engineering Student's signature ..A. Suvichakorn.....
Field of study Electrical Engineering Advisor's signature ..C. Chirungrueng.....
Academic year ..2000.....



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.เจษฎา ชินรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้อันมีค่าให้แก่ผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยสามารถเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณอาจารย์ นพ.รามเมศร์ วัชรสินธุ์ ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ รพ. รามาธิบดี มหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์ และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องสาวที่เป็นกำลังใจ ดูแลเอาใจใส่ และพยายามให้ความช่วยเหลืออย่างดี และท้ายที่สุดขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือผู้วิจัยตลอดมา

เอมอมร สุวีชากร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.4 เป้าหมายและขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 การลดทอนสัญญาณรบกวนในภาพอัลตราซาวนด์.....	6
2.1 หลักการของวงจรรองหนึ่งมิติของซาวีสกี-โกเลย์.....	7
2.2 วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์แบบสองมิติ.....	11
2.3 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรรอง.....	12
2.3.1 สัญญาณรบกวนแบบจุดในภาพอัลตราซาวนด์.....	13
2.3.2 ภาพที่ใช้ในการทดสอบ.....	13
2.3.3 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรรอง.....	15
2.4 ผลการทดสอบกับภาพทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....	
เมื่อใช้วงจรรองกับภาพทดสอบ.....	18
2.4.1 ประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรรอง.....	18

2.4.2	ประสิทธิภาพในคงสภาพขอบของวงจรรอง	29
2.4.3	เมื่อใช้วงจรรองร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้	33
2.4.4	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ	46
2.5	ผลการทดสอบกับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์	47
2.5.1	การลดทอนสัญญาณรบกวน	48
2.5.2	เมื่อพิจารณาการใช้งานวงจรรองร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้	55
3	การตรวจจับเส้นขอบในภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์	62
3.1	หลักการคำนวณของวิธีตรวจจับเส้นขอบที่เสนอ	62
3.1.1	การคำนวณค่าเกรเดียนต์ของความเข้ม	62
3.1.2	การนำค่าเกรเดียนต์ที่ได้ไปคำนวณเส้นขอบ	63
3.2	การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรรองตรวจจับเส้นขอบ	66
3.3	ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรรองตรวจจับเส้นขอบ และการวิเคราะห์ผล	67
3.3.1	เมื่อใช้วงจรรองตรวจจับเส้นขอบกับภาพที่ยังไม่มีสัญญาณรบกวน	67
3.3.2	เมื่อใช้วงจรรองตรวจจับเส้นขอบกับภาพที่มีสัญญาณรบกวนแบบเรย์ลี	73
3.3.3	เมื่อใช้วงจรรองตรวจจับเส้นขอบกับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์	75
4	การนำวงจรรองและวงจรรองตรวจจับเส้นขอบไปใช้กับระบบติดตามเส้นขอบ	81
4.1	ขั้นตอนการทำงานของระบบติดตามเส้นขอบ	81
4.2	การทดสอบการใช้งานของระบบติดตามเส้นขอบกับ ภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์	82
4.3	ผลการทดสอบการทำงานของระบบติดตามเส้นขอบ	83
4.3.1	เมื่อระบบติดตามเส้นขอบมีความกว้างหน้าต่างคงตัว เท่ากับ 100 พิกเซล	83
4.3.2	เมื่อระบบติดตามเส้นขอบมีความกว้างหน้าต่างไม่จำกัด	85
5	สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ	89
5.1	สรุปผลการวิจัย	89
5.2	ข้อเสนอแนะ	91
	รายการอ้างอิง	92
	ภาคผนวก	94
	ภาคผนวก ก	94
	ภาคผนวก ข	97
	ภาคผนวก ค	100

ប្រវត្តិដូរិច្ច 107

สารบัญญัตราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างระบบติดตามเส้นขอบแต่ละชนิด	85
ตารางที่ ข.1 ครั้งแรกของเมทริกซ์ $\{(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}(\mathbf{A}^T \vec{e}_{m+M+1})\}_1$ ที่ใช้คำนวณข้อมูลขาออก (a_0) ของวงจรรองชาวิสกี-โกเลย์หนึ่งมิติอันดับสอง	96
ตารางที่ ข.2 ครั้งแรกของเมทริกซ์ $\{(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}(\mathbf{A}^T \vec{e}_{m+M+1})\}_1$ ที่ใช้คำนวณข้อมูลขาออก (a_0) ของวงจรรองชาวิสกี-โกเลย์หนึ่งมิติอันดับสี่	96

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ชุดภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์	2
รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนและการ คงสภาพขอบระหว่างวงจรกรองซาว์สกี-โกเลย์หนึ่งมิติกับวงจรกรองเฉลี่ย เมื่อ แกนนอนในรูปมีหน่วยเป็นพิกเซล	9
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนและการ คงสภาพขอบระหว่างวงจรกรองซาว์สกี-โกเลย์หนึ่งมิติกับวงจรกรองเฉลี่ย เมื่อ สัญญาณเข้าถูกลดทอนขนาด	10
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างภาพที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของวงจรกรอง	14
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างภาพทดสอบที่ใส่สัญญาณรบกวนแล้ว	16
รูปที่ 2.5 บริเวณที่ใช้คำนวณค่า RMSE และภาพทดสอบที่มีความชันต่ำ	17
รูปที่ 2.6 ค่า RMSE ของวงจรกรองแต่ละชนิดตามขนาดหน้าต่าง	19
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างค่าความเข้มของภาพหลังจากผ่านวงจรกรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่าง ขนาด 31x31 พิกเซล	20
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างค่าความเข้มของภาพหลังจากผ่านวงจรกรองแต่ละชนิดเมื่อใช้ขนาด หน้าต่างที่ให้ค่า RMSE ต่ำสุด	21
รูปที่ 2.9 รูปที่ 2.4 (ข) หลังจากผ่านวงจรกรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างเท่ากับ 25x25 พิกเซล	23
รูปที่ 2.10 รูปที่ 2.4 (ค) หลังจากผ่านวงจรกรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างเท่ากับ 11x11 พิกเซล	24
รูปที่ 2.11 รูปที่ 2.4 (ง) หลังจากผ่านวงจรกรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างเท่ากับ 15x15 พิกเซล	25
รูปที่ 2.12 รูปที่ 2.4 (จ) หลังจากผ่านวงจรกรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างเท่ากับ 15x15 พิกเซล	26
รูปที่ 2.13 รูปที่ 2.4 (ฉ) หลังจากผ่านวงจรกรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างเท่ากับ 23x23 พิกเซล	27
รูปที่ 2.14 ค่าความชันเส้นขอบเมื่อใช้วงจรกรองแต่ละชนิดกับภาพที่มีความชันเส้นขอบ ต่าง ๆ กันขณะที่ยังไม่มีสัญญาณรบกวน	30

รูปที่ 2.15	ค่าความชันเส้นขอบเมื่อใช้วงจรรองแต่ละชนิดกับภาพที่มีความชันเส้นขอบต่าง ๆ กันเมื่อมีสัญญาณรบกวนแบบเรย์ลีขนาด $\rho = 0.1$	31
รูปที่ 2.16	ตัวอย่างความเข้มของรูปที่ 2.4 (ข) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างเท่ากับ 25x25 พิกเซล	32
รูปที่ 2.17	เส้นขอบของภาพทดสอบที่คำนวณได้จากวงจรรวจจับเส้นขอบแค่นี้	34
รูปที่ 2.18	เส้นขอบที่คำนวณได้จากรูปที่ 2.4 (ก) ที่ผ่านวงจรรองมาตรฐานเมื่อใช้วงจรรวจจับเส้นขอบแค่นี้	35
รูปที่ 2.19	เส้นขอบที่คำนวณได้จากรูปที่ 2.4 (ก) ที่ผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์	36
รูปที่ 2.20	เส้นขอบที่คำนวณได้จากรูปที่ 2.4 (ก) ที่ผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง	37
รูปที่ 2.21	เส้นขอบที่คำนวณได้จากรูปที่ 2.4 (ก) ที่ผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่	38
รูปที่ 2.22	เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรรวจจับเส้นขอบแค่นี้กับรูปที่ 2.4 (ข) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดขนาด 25x25 พิกเซล	40
รูปที่ 2.23	เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรรวจจับเส้นขอบแค่นี้กับรูปที่ 2.4 (ค) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดขนาด 11x11 พิกเซล	41
รูปที่ 2.24	เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรรวจจับเส้นขอบแค่นี้กับรูปที่ 2.4 (ง) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดขนาด 15x15 พิกเซล	42
รูปที่ 2.25	เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรรวจจับเส้นขอบแค่นี้กับรูปที่ 2.4 (จ) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดขนาด 15x15 พิกเซล	43
รูปที่ 2.26	เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรรวจจับเส้นขอบแค่นี้กับรูปที่ 2.4 (ฉ) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดขนาด 23x23 พิกเซล	44
รูปที่ 2.27	เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวงจรรองแต่ละชนิดตามขนาดหน้าต่าง	46
รูปที่ 2.28	ภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์ เส้นสีขาวซึ่งลากโดยผู้เชี่ยวชาญแสดงตำแหน่งของต่อมไทรอยด์	47
รูปที่ 2.29	ตัวอย่างความเข้มที่ขอบด้านล่างของต่อมไทรอยด์	49
รูปที่ 2.30	ภาพต่อมไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรรองมาตรฐาน	49
รูปที่ 2.31	ภาพต่อมไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์	50
รูปที่ 2.32	ภาพต่อมไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง	51
รูปที่ 2.33	ภาพต่อมไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่	52
รูปที่ 2.34	ภาพต่อมไทรอยด์ (ข) หลังจากผ่านวงจรรองขนาดหน้าต่าง 27x27 พิกเซล	53
รูปที่ 2.35	ภาพต่อมไทรอยด์ (ค) หลังจากผ่านวงจรรองขนาดหน้าต่าง 15x15 พิกเซล	54
รูปที่ 2.36	ภาพต่อมไทรอยด์ (ง) หลังจากผ่านวงจรรองขนาดหน้าต่าง 27x27 พิกเซล	54
รูปที่ 2.37	เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรรองมาตรฐานเมื่อใช้วงจรรวจจับเส้นขอบแค่นี้	56

รูปที่ 2.38	เส้นขอบของภาพไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับ ศูนย์เมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้	57
รูปที่ 2.39	เส้นขอบของภาพไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับ สองเมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้	58
รูปที่ 2.40	เส้นขอบของภาพไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่ เมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้	59
รูปที่ 2.41	เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ข) หลังจากผ่านวงจรกรองขนาดหน้าต่าง 27x27 พิกเซลเมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้	60
รูปที่ 2.42	เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ค) หลังจากผ่านวงจรกรองขนาดหน้าต่าง 15x15 พิกเซลเมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้	61
รูปที่ 2.43	เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ง) หลังจากผ่านวงจรกรองขนาดหน้าต่าง 27x27 พิกเซลเมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้	61
รูปที่ 3.1	(ก) ภาพที่ตำแหน่งขอบ (ข) ค่าความเข้ม (ค) ขนาดเกรเดียนต์และ (ง) ขนาดอนุพันธ์อันดับที่สองที่ตำแหน่งขอบ	64
รูปที่ 3.2	ตัวอย่างขนาดเกรเดียนต์และค่าอนุพันธ์อันดับสองของความเข้มเมื่อใช้หน้าต่าง กว้างและแคบ	68
รูปที่ 3.3	เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบชนิดต่างๆ กับรูปที่ 2.2 (ค)	69
รูปที่ 3.4	เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบชนิดต่างๆ กับรูปที่ 2.2 (ง)	70
รูปที่ 3.5	เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบชนิดต่างๆ กับภาพเม็ดเลือดแดง	71
รูปที่ 3.6	เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบชนิดต่างๆ กับภาพเกรนอะลูมิเนียม	72
รูปที่ 3.7	เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบชนิดต่างๆ กับภาพเกรนอะลูมิเนียม ที่ใส่สัญญาณรบกวนแล้ว และผ่านวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองขนาด 23x23 พิกเซล	74
รูปที่ 3.8	เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ก) ที่ผ่านวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับ สองขนาดหน้าต่าง 27x27 พิกเซล	76
รูปที่ 3.9	เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ข) ที่ผ่านวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับ สองขนาดหน้าต่าง 27x27 พิกเซล	77
รูปที่ 3.10	เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ค) ที่ผ่านวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับ สองขนาดหน้าต่าง 15x15 พิกเซล	78
รูปที่ 3.11	เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ง) ที่ผ่านวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับ สองขนาดหน้าต่าง 27x27 พิกเซล	79
รูปที่ 4.1	เส้นขอบที่ได้จากระบบติดตามเส้นขอบเมื่อไม่ได้ใช้วงจรกรอง	84
รูปที่ 4.2	เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ก) เมื่อใช้ระบบติดตามเส้นขอบความกว้าง หน้าต่าง 100 พิกเซล	84

รูปที่ 4.3	เส้นขอบที่ได้จากระบบติดตามเส้นขอบเมื่อไม่ได้ใช้วงจรรอง	86
รูปที่ 4.4	เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ก) เมื่อใช้ระบบติดตามเส้นขอบไม่จำกัด ขนาดหน้าต่าง	86
รูปที่ 4.5	ตัวอย่างเส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ที่มีตำแหน่งคลาดเคลื่อนไป	88
รูปที่ 4.6	เส้นขอบของรูปที่ 4.4 (ค) เมื่อทำให้เรียบขึ้นด้วยวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์ หนึ่งมิติ	88
รูปที่ ข.1	ผลตอบเชิงความถี่ของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์หนึ่งมิติ	97
รูปที่ ค.1	สัมประสิทธิ์และผลตอบเชิงความถี่ของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติอันดับ สอง เมื่อหน้าต่างกว้าง 15 พิกเซล	99
รูปที่ ค.2	สัมประสิทธิ์และผลตอบเชิงความถี่ของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติอันดับ สอง เมื่อหน้าต่างกว้าง 25 พิกเซล	100
รูปที่ ค.3	สัมประสิทธิ์และผลตอบเชิงความถี่ของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติอันดับ สอง เมื่อหน้าต่างกว้าง 35 พิกเซล	101
รูปที่ ค.4	สัมประสิทธิ์และผลตอบเชิงความถี่ของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติอันดับ สี่ เมื่อหน้าต่างกว้าง 15 พิกเซล	102
รูปที่ ค.5	สัมประสิทธิ์และผลตอบเชิงความถี่ของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติอันดับ สี่ เมื่อหน้าต่างกว้าง 25 พิกเซล	103
รูปที่ ค.6	สัมประสิทธิ์และผลตอบเชิงความถี่ของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติอันดับ สี่ เมื่อหน้าต่างกว้าง 35 พิกเซล	104