

## บทที่ 4

# การนำวงจรกรองและวงจรตรวจจับเส้นขอบไปใช้กับ ระบบติดตามเส้นขอบ

ในบทนี้เป็นตัวอย่างการนำไปใช้งานจริง ของระบบติดตามเส้นขอบที่ได้รับการพัฒนาขึ้น จากเทคนิค pre-emptive เดิม โดยรวมเอาวงจรกรองสัญญาณรบกวนจากบทที่ 2 และวงจรตรวจจับเส้นขอบจากบทที่ 3 มาทำงานร่วมกันในระบบติดตามเส้นขอบ การทดลองเริ่มจากการพิจารณาระบบตรวจจับเส้นขอบเมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้เพียงอย่างเดียว เมื่อใช้วงจรกรองมีพื้นฐานร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้ อันเป็นวิธีที่ใช้ในเทคนิค pre-emptive เดิม เมื่อใช้วงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์ร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้ และเมื่อใช้วงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์ร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบจากบทที่ 3

ขั้นตอนการทำงานของระบบติดตามเส้นขอบที่ใช้ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1 ส่วนขั้นตอนการทดสอบระบบดังกล่าวได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2 สำหรับผลการทดสอบการทำงานของระบบเมื่อใช้วงจรกรอง และวงจรตรวจจับเส้นขอบทั้ง 4 กรณี พร้อมทั้งการวิเคราะห์ผลอยู่ในหัวข้อที่ 4.3 ตามลำดับ

### 4.1 ขั้นตอนการทำงานของระบบติดตามเส้นขอบ

ระบบติดตามเส้นขอบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิค *pre-emptive* [12] ซึ่งทำงานร่วมกับผู้ใช้ โดยให้ผู้ใช้กำหนดจุดขอบเริ่มต้นให้ แล้ววงจรตรวจจับเส้นขอบคำนวณเส้นขอบล่วงหน้าให้ระยะสั้นๆ แต่เพิ่มเงื่อนไขว่าถ้าในระหว่างระยะนั้นมีเส้นขอบที่ไม่ต่อเนื่อง ระบบจะเชื่อมต่อเส้นขอบให้โดยใช้เส้นทาง ตามแนวความชันของเส้นขอบที่คำนวณได้ก่อนหน้า เมื่อครบกำหนดระยะที่ตั้งไว้ คอมพิวเตอร์จะหยุดเพื่อรอรับคำสั่งจากผู้ใช้ หากผู้ใช้พอใจกับเส้นขอบ

ที่ได้ จะจุดตรงปลายเส้นขอบที่คอมพิวเตอร์คำนวณไว้ แต่หากไม่พอใจ ผู้ใช้ต้องกำหนดจุดใหม่ ที่ตำแหน่งเส้นขอบที่คอมพิวเตอร์เริ่มทำงานผิดพลาด ระยะเวลาหน้าต่างที่วงจรตรวจจับเส้นขอบที่ใช้ในเทคนิค *pre-emptive* เท่ากับ 20 พิกเซล สำหรับวงจรตรวจจับเส้นขอบจากบทที่ 3 นั้น เนื่องจากการใช้ค่าเกรเดียนต์แล้วทำทีนึ่งนั้น แม้ว่าจะให้ผลขอบที่ชัดเจนและต่อเนื่อง แต่ไม่เหมาะกับการทำงานของระบบติดตามเส้นขอบที่ทำงานร่วมกับผู้ใช้ เพราะต้องรอให้คำนวณเส้นขอบครบเสียก่อนจึงจะทำทีนึ่งได้ ดังนั้นจึงเลือกทดสอบเฉพาะวงจรตรวจจับเส้นขอบที่ใช้ค่าเกรเดียนต์ กับค่าอนุพันธ์อันดับที่สองของความเข้มในทิศทางตั้งฉากกับขอบ และค่าลาปลาเซียน แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานกับเวลาที่ใช้ และลักษณะเส้นขอบที่ได้

## 4.2 การทดสอบการใช้งานของระบบติดตามเส้นขอบกับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์

การทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทดสอบความเป็นไปได้ของการใช้งานของระบบติดตามเส้นขอบ กับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์ เมื่อใช้วงจรกรองขจัดสัญญาณรบกวนออกไป ระยะเวลาที่วงจรตรวจจับเส้นขอบ ยังคำนวณเส้นขอบได้ดีนั้นเพิ่มขึ้น ในการพิจารณาจึงเพิ่มระยะที่ใช้เป็น 100 พิกเซล แล้วพิจารณาผลที่ได้ เมื่อใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนและวงจรตรวจจับเส้นขอบแต่ละกรณี

โดยขั้นแรกใช้หน้าต่างที่มีความกว้าง 100 พิกเซล ให้ผู้ใช้กำหนดจุดเริ่มแรก แล้วพิจารณาเส้นขอบที่ได้จากระบบติดตามเส้นขอบ โดยไม่มีการกำหนดจุดขอบเพิ่มเติมในระหว่าง 100 พิกเซลนั้น (ซึ่งแตกต่างจากขั้นตอนการทำงานของระบบติดตามเส้นขอบจริงที่ตั้งไว้ ในหัวข้อที่แล้ว) ทั้งนี้เพื่อให้เห็นผลการทำงานของระบบติดตามเส้นขอบ เมื่อใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวน และวงจรตรวจจับเส้นขอบแต่ละชนิดได้ดีขึ้น โดยลบบัจจัยต่างๆ จากผู้ใช้ที่จะมีผลต่อการทำงานของระบบ ถ้าพบเส้นขอบที่ไม่ต่อเนื่อง ระบบจะพยายามเชื่อมเส้นขอบดังกล่าวให้โดยพิจารณารอบๆ พิกเซลนั้น ว่ามีเส้นขอบใกล้เคียงหรือไม่ ถ้าพบว่ามีจึงเชื่อมต่อให้ทันที ถ้าไม่มีระบบจะทำนายตำแหน่งเส้นขอบให้ โดยใช้ความชันของเส้นขอบก่อนหน้า การเชื่อมต่อในลักษณะนี้มาจากต้นเหตุที่ว่า ความชันของเส้นขอบไม่ควรเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วหรือไม่ควรมีเหลี่ยมมุม ในภาพอัลตราซาวนด์ นั่นเอง

ขั้นที่สองกำหนดให้หน้าต่างมีความกว้างไม่จำกัด ให้คอมพิวเตอร์ติดตามเส้นขอบไปเรื่อยๆ ถ้าคอมพิวเตอร์เริ่มคำนวณผิดพลาดมาก ผู้ใช้จึงจะกำหนดจุดขอบที่ถูกต้อง

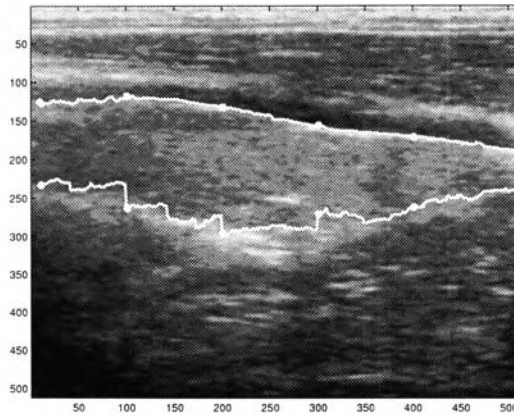
ให้คอมพิวเตอร์เริ่มคำนวณใหม่ ขั้นนี้ใช้วิเคราะห์ขนาดหน้าต่างใหญ่ที่สุด หรือปริมาณข้อมูลช่วยเหลือจากผู้ใช้ ที่จำเป็นสำหรับการติดตามเส้นขอบ

ระบบติดตามเส้นขอบที่ใช้ทดสอบนั้นเขียนด้วยโปรแกรม MATLAB และทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Pentium II - MMX เช่นเดียวกับในบทที่ 2 และ 3 ภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์ที่ใช้ นั้น เป็นภาพของต่อมไทรอยด์จากรูปที่ 2.28 (ก) ซึ่งน่าจะแสดงแนวโน้มสำคัญ ของประสิทธิภาพการทำงานของระบบติดตามเส้นขอบแต่ละชนิดได้ ขนาดหน้าต่างของวงจรกรองแต่ละชนิดนั้น จะเลือกพิจารณาที่ขนาดหน้าต่างเท่ากัน โดยในการทดสอบใช้ความกว้างหน้าต่างเท่ากับ 27 พิกเซล ส่วนวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติเลือกใช้อันดับที่สอง เพราะให้ผลเป็นที่น่าพอใจมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอันดับอื่นๆ

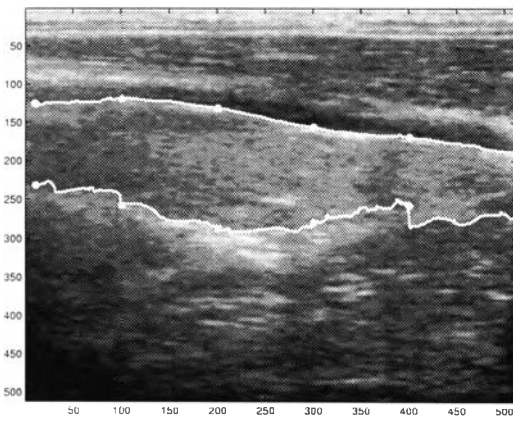
### 4.3 ผลการทดสอบการทำงานของระบบติดตามเส้นขอบ

#### 4.3.1 เมื่อระบบติดตามเส้นขอบมีความกว้างหน้าต่างคงตัวเท่ากับ 100 พิกเซล

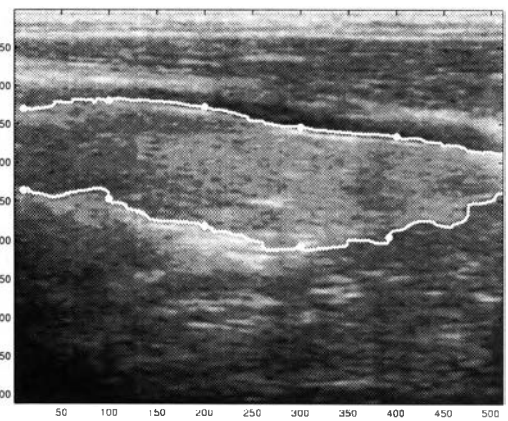
ผลการทดสอบพบว่าเมื่อไม่ได้ใช้วงจรกรองเลย จะได้เส้นขอบตามเส้นสีขาวในรูปที่ 4.1 โดยวงกลมสีขาวบนเส้นขอบ เป็นจุดที่ผู้ใช้กำหนดเพื่อยืนยันความถูกต้องของเส้นขอบที่คอมพิวเตอร์คำนวณเส้นขอบที่ได้ไม่เรียบ และต้องอาศัยขั้นตอนการเชื่อมต่อขอบ คือคอมพิวเตอร์ต้องประมาณตำแหน่งเส้นขอบใหม่จากเส้นขอบใกล้เคียงหลายช่วงด้วยกัน การประมาณตำแหน่งดังกล่าวไม่ได้ใช้การพิจารณาลักษณะภาพรวมด้วย ดังนั้นการใช้การเชื่อมต่อมากจึงมีโอกาสเกิดความผิดพลาดสูงตามไปด้วย เมื่อใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบลักษณะเส้นขอบที่ได้พัฒนาขึ้น และใช้ขั้นตอนการเชื่อมต่อลดลงโดยรวมแล้ว วงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์แบบสองมิติที่พัฒนาขึ้น ทำงานอยู่ในขั้นดีพอเปรียบเทียบกับวงจรกรองมัธยฐาน เมื่อใช้ร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้ แต่เวลาที่ใช้นั้นต่ำกว่ามากถ้าเปรียบเทียบกับขนาดหน้าต่างของวงจรกรองเท่ากัน และเมื่อเปลี่ยนเป็นวงจรตรวจจับเส้นขอบเป็นแบบใช้ค่าเกรเดียนต์กับค่าอนุพันธ์อันดับที่สองในทิศทางตั้งฉากกับขอบเส้นขอบที่คำนวณได้มีความต่อเนื่อง ทำให้ใช้การประมาณเส้นขอบน้อยลงกว่าเมื่อใช้วงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์ร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้ จึงได้เส้นขอบที่เรียบและใกล้เคียงขอบจริงมากกว่า ส่วนการใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแบบใช้ค่าลาปลาเซียนนั้น แม้ว่าจะได้เส้นขอบต่อเนื่อง แต่เส้นขอบที่คำนวณได้มีรอยหยักเกิดขึ้น ตามที่ได้เคยแสดงไว้ในบทที่ 3 อันเป็นผลจากการใช้ค่าลาปลาเซียนประมาณค่าอนุพันธ์อันดับที่สอง ในทิศทางตั้งฉาก



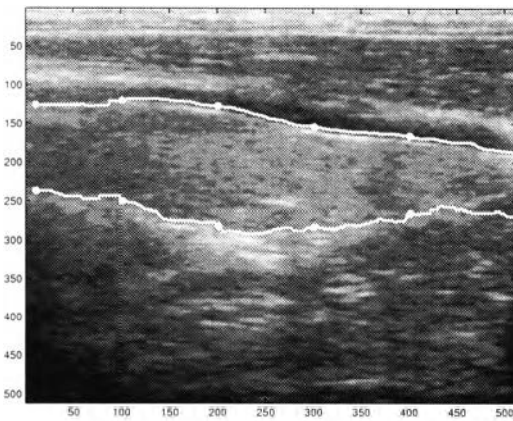
รูปที่ 4.1: เส้นขอบที่ได้จากระบบติดตามเส้นขอบเมื่อไม่ได้ใช้วงจรรอง



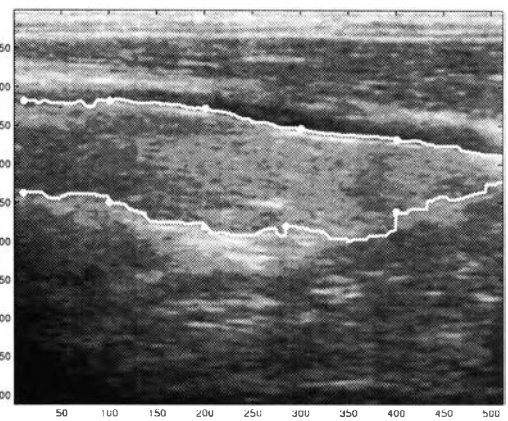
(ก) ใช้วงจรรองมัลติฐานกับ  
วงจรถวจจับเส้นขอบแค่นี้



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์และ  
วงจรถวจจับเส้นขอบแค่นี้



(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์และ  
วงจรถวจจับเส้นขอบที่ใช้ค่าอนุพันธ์อันดับที่สอง



(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์และ  
วงจรถวจจับเส้นขอบที่ใช้ค่าลาปลาเซียน

รูปที่ 4.2: เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ก) เมื่อใช้ระบบติดตามเส้นขอบความกว้าง  
หน้าต่าง 100 พิกเซล

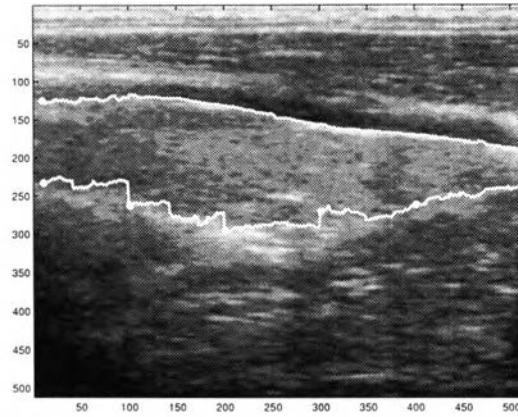
ตารางที่ 4.1: ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างระบบติดตามเส้นขอบแต่ละชนิด

Types of tracking system	time (s)	error (pixels)	boundary smoothness
Canny's edge detector (no filter)	0.28	2847 (4.7%)	poor
median filter and Canny's edge detector	156.60	84 (0.139%)	good
Savitzky-Golay filter and Canny's edge detector	0.61	100 (0.165%)	good
Savitzky-Golay filter and 2nd derivative-edge detector	5.10	80 (0.132%)	good
Savitzky-Golay filter and lapacian-edge detector	1.86	95 (0.157%)	poor

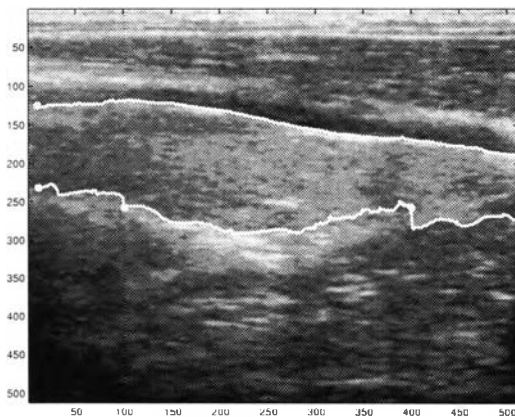
กับเส้นขอบนั่นเอง แต่ผลที่ดีขึ้นของวิธีที่ 2 ก็ต้องทดแทนด้วยเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่นานกว่าแบบใช้ค่าลาปลาเซียนในการทดลองนี้วงจรตรวจจับเส้นขอบแบบแค่นี้ ใช้เวลาน้อยที่สุดในบรรดาแบบที่ใช้วงจรกรองชนิดเดียวกัน (ตามตารางที่ 4.1)

#### 4.3.2 เมื่อระบบติดตามเส้นขอบมีความกว้างหน้าต่างไม่จำกัด

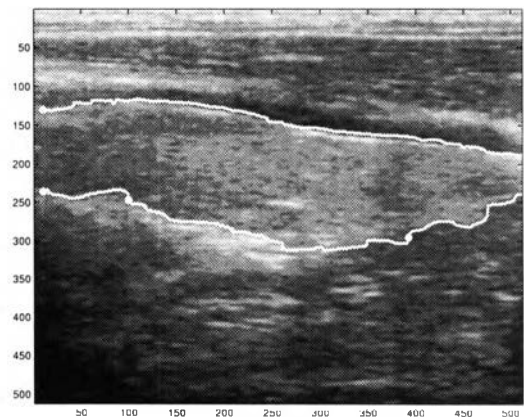
เมื่อกำหนดให้ระบบติดตามเส้นขอบมีความกว้างหน้าต่างไม่จำกัด เพื่อพิจารณาความจำเป็นของข้อมูลช่วยเหลือจากผู้ใช้ พบว่าแต่ละวิธีไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลช่วยเหลือทุก 100 พิกเซล (ยกเว้นกรณีที่ไม่ใช้วงจรกรอง ซึ่งยังต้องใช้ข้อมูลช่วยเหลือจากผู้ใช้อย่างน้อยทุก 100 พิกเซลเช่นเดิมดังแสดงในรูปที่ 4.3) นอกจากนี้การกำหนดจุดขอบเฉพาะที่จำเป็น ยังช่วยให้ได้เส้นขอบที่แม่นยำกว่าด้วย สังเกตจากรูปที่ 4.2 (ค) ซึ่งตรงขอบล่างขวาของต่อมไทรอยด์ซึ่งมีไม่ชัดเจน เมื่อกำหนดความกว้างหน้าต่างคงตัว การเชื่อมต่อเส้นขอบจะได้ไปตามแนวเส้นที่ชัดเจนกว่า เส้นขอบที่ได้จึงอยู่ต่ำกว่าเส้นขอบจริง ขณะที่รูปที่ 4.4 (ค) ได้กำหนดจุดขอบให้ใหม่ เมื่อเห็นว่าการติดตามเส้นขอบเริ่มผิดพลาด จะได้แนวเส้นขอบที่ถูกต้อง การทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงข้อดีประการหนึ่งของเทคนิค pre-emptive ที่ให้ผู้ใช้ทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ ทำให้ได้ตำแหน่งเส้นขอบที่แม่นยำขึ้น ตารางที่ 4.1 ได้สรุปประสิทธิภาพของระบบติดตามเส้นขอบที่ใช้วงจรกรองและวงจรตรวจจับเส้นขอบต่างๆ กัน ข้อมูลดังกล่าวประเมินจากเส้นขอบที่ได้จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ค่าความผิดพลาดวัดเป็นพิกเซลเปรียบเทียบ



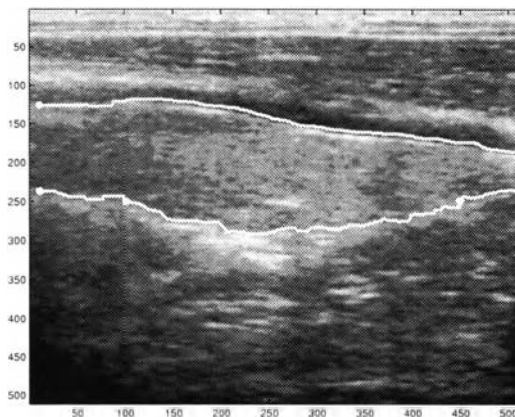
รูปที่ 4.3: เส้นขอบที่ได้จากระบบติดตามเส้นขอบเมื่อไม่ได้ใช้วงจรรอง



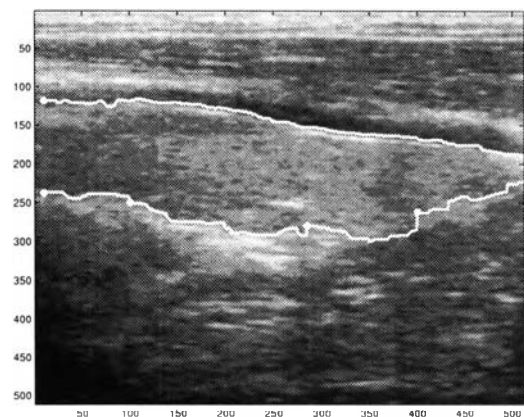
(ก) ใช้วงจรรองมัธยฐานกับ  
วงจรถรวจจับเส้นขอบแค่นี้



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์และ  
วงจรถรวจจับเส้นขอบแค่นี้



(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์และ  
วงจรถรวจจับเส้นขอบที่ใช้ค่าอนุพันธ์อันดับที่สอง



(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์และ  
วงจรถรวจจับเส้นขอบที่ใช้ค่าลาปลาเซียน

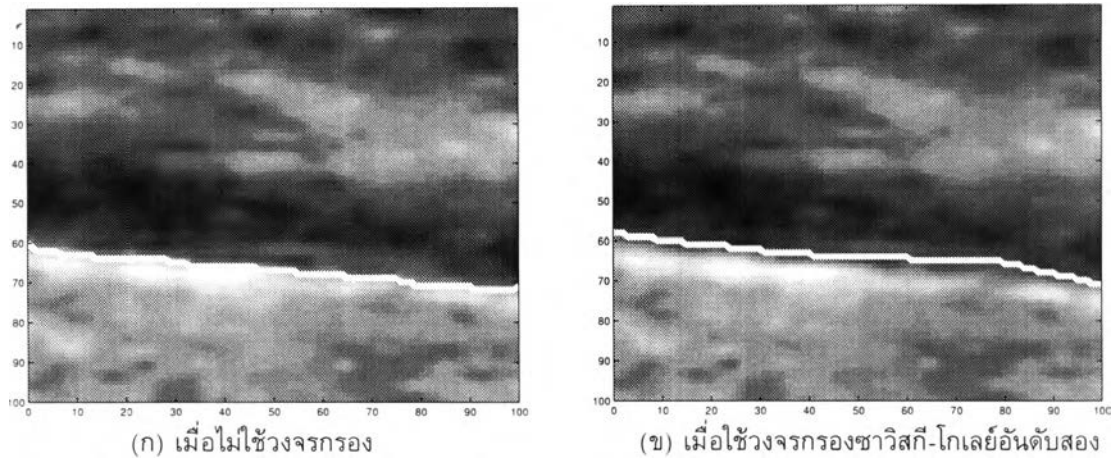
รูปที่ 4.4: เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ก) เมื่อใช้ระบบติดตามเส้นขอบไม่จำกัดขนาด  
หน้าต่างต่าง

กับพื้นที่ที่ได้จากเส้นขอบซึ่งลากโดยผู้เชี่ยวชาญ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบติดตามเส้นขอบแต่ละชนิดเมื่อให้ขนาดหน้าตัดไม่จำกัด มีค่าต่ำมาก อย่างไรก็ตาม ตัวเลขดังกล่าวมีหน่วยเป็นพิกเซล และจะมีนัยสำคัญเพียงใดขึ้นกับพารามิเตอร์ที่นำมาคูณกับจำนวนพิกเซล เพื่อแปลงเป็นขนาดของต่อมไทรอยด์ที่แท้จริง สำหรับรูปที่ 4.4 (ก) และ(ข) เส้นขอบด้านล่างขวาไม่ใช่ขอบจริง แต่ไม่ได้มีการกำหนดจุดขอบเพิ่มเติมให้ เนื่องจากที่บริเวณดังกล่าวระบบติดตามเส้นขอบทั้งสองแบบต้องการข้อมูลช่วยเหลือหลายจุด จึงไม่ได้มีการแสดงผลที่ถูกต้องไว้ ส่วนการตัดสินใจว่าเส้นขอบที่ได้เรียบพอหรือไม่จะใช่การตัดสินใจจากผู้เชี่ยวชาญ

คอมพิวเตอร์ต้องการข้อมูลช่วยเหลือเมื่อใด ผู้ใช้ต้องกำหนดจุดขอบเพิ่มเติมเพื่อให้คอมพิวเตอร์คำนวณแนวเส้นขอบที่ถูกต้อง เมื่อบริเวณนั้นมีรอยแยกระหว่างเส้นขอบสองเส้นหรือมากกว่า เพราะคอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำนายได้ว่า การเชื่อมต่อไปเส้นทางใดจึงเหมาะสมที่สุด การใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์ร่วมกับวงจรถรวจจับเส้นขอบแค่นี้จะเกิดรอยแยกมากกว่าวิธีที่ใช้ค่าอนุพันธ์อันดับที่สอง ทั้งนี้เพราะวงจรถรวจจับเส้นขอบแค่นี้พยายามเชื่อมต่อเส้นขอบให้ได้มากที่สุด ดังนั้นบางบริเวณที่ยังมีสัญญาณรบกวนอยู่ อาจทำให้ทิศทางการเชื่อมต่อเกิดเป็นรอยแยก หรือบางครั้งก็เชื่อมต่อเส้นขอบที่ไม่ถูกต้องให้ด้วย จึงเกิดความผิดพลาดสูงกว่าวิธีอื่นๆ นอกจากนี้การกำหนดจุดใหม่แต่ละครั้ง พารามิเตอร์เช่นค่าระดับของวงจรถรวจจับเส้นขอบแค่นี้ รวมทั้งวงจรถรวจจับเส้นขอบอื่นๆ อาจต้องกำหนดใหม่ เพื่อให้ตำแหน่งเส้นขอบชัดเจนขึ้น ซึ่งค่าระดับของวงจรถรวจจับเส้นขอบแค่นี้ นั้น กำหนดจากลักษณะฮิสโตแกรมของเกรเดียนต์ของความเข้มในหน้าตัดที่พิจารณา การพิจารณาข้อมูลในหน้าตัดใหม่ทุกครั้งทำให้เส้นขอบที่ได้แตกต่างกันเมื่อใช้ขนาดหน้าตัดเปลี่ยนไป แต่วงจรถรวจจับเส้นขอบที่นำเสนอกำหนดค่าระดับที่ใช้ได้ตลอดทั้งภาพ จึงให้เส้นขอบเหมือนเดิมทุกครั้งที่ใช้ค่าระดับเท่าเดิม ไม่ว่าจะพิจารณาที่หน้าตัดใดโดยที่ไม่ต้องพิจารณารายละเอียดย่อยๆ ในหน้าตัดที่กำลังพิจารณา ทำให้ระบบทำงานได้ง่ายขึ้น

การใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติ และวงจรถรวจจับเส้นขอบแบบใช้ค่าอนุพันธ์อันดับที่สอง ในทิศทางตั้งฉากกับขอบ ก็มีจุดเสียเปรียบเช่นเดียวกัน ในกรณีที่ขอบมีความคมชัดมาก การใช้ขนาดหน้าตัดกว้างในบริเวณนั้น จะทำให้ขอบมัว และตำแหน่งขอบที่ได้คลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ระยะที่คลาดเคลื่อนดังกล่าวไม่มีผลมากนักเมื่อพิจารณาในแง่ความเรียบของเส้นขอบที่ได้และขนาดพื้นที่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ส่วนในบริเวณใดที่ข้อมูลขาดหายไปเป็นช่วงกว้าง ระบบติดตามเส้นขอบจะไม่สามารถทำงานได้ ไม่ว่าจะใช้วงจรรองหรือวงจรถรวจจับเส้นขอบแบบใด

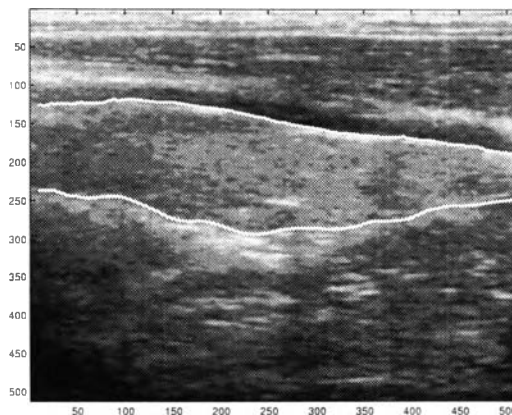
ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า ระบบติดตามเส้นขอบที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ มีประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับระบบติดตามเส้นขอบเดิมที่ใช้ วงจรรองมัลติฐาน และวงจรถรวจจับเส้นขอบแค่นี้ แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณนั้นต่ำกว่ามากจึงสามารถเพิ่มระยะที่จะให้คอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.5: ตัวอย่างเส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ที่มีตำแหน่งคลาดเคลื่อนไป

ทำนายล่วงหน้า ทำให้ระบบติดตามเส้นขอบที่พัฒนานี้เหมาะแก่การใช้งานแบบที่ผู้ใช้ร่วมทำงานไปด้วย และเป็นพื้นฐานที่ดีสำหรับการสร้างระบบวินิจฉัยของแพทย์ เช่น การคำนวณขนาดของต่อมไทรอยด์ที่มีประสิทธิภาพต่อไป

ในวิทยานิพนธ์นี้เห็นว่าเส้นขอบที่ดีควรตรงกับที่มองเห็นได้ในภาพและมีความต่อเนื่อง เพื่อให้การเปรียบเทียบระหว่างระบบติดตามเส้นขอบแต่ละชนิดเป็นไปด้วยดี และสามารถนำไปพัฒนาใช้กับการติดตามเส้นขอบของอวัยวะอื่นๆ ได้ โดยผู้ใช้สามารถทำนายได้ว่าผลที่ได้จะเป็นอย่างไร อย่างไรก็ตามก็ถ้าต้องการปรับปรุงเส้นขอบที่ได้ในวิทยานิพนธ์ ให้เรียบขึ้นตรงตามสัญญาณของต่อมไทรอยด์จริง วิธีหนึ่งที่สามารถทำได้คือ ใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์หนึ่งมิติกรองส่วนของขอบที่ไม่เรียบออกไป รูปที่ 4.6 เป็นตัวอย่างของเส้นขอบหลังจากกรองด้วยวงจรรองดังกล่าว เส้นขอบที่เรียบขึ้นนี้อาจนำไปใช้ประโยชน์ในการสร้างภาพสามมิติได้



รูปที่ 4.6: เส้นขอบของรูปที่ 4.4 (ค) เมื่อทำให้เรียบขึ้นด้วยวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์หนึ่งมิติ