

บทที่ 2

การลดทอนสัญญาณรบกวนในภาพอัลตราซาวนด์

เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของความเข้มในภาพอัลตราซาวนด์ การขจัดสัญญาณรบกวนในภาพอัลตราซาวนด์ ที่สามารถคงความคมชัดของเส้นขอบ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการคำนวณเส้นขอบของต่อมไทรอยด์ในภาพอัลตราซาวนด์ วงจรกรองมัลติฐานนั้น แม้ว่าจะมีความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวน และคงสภาพขอบไว้ได้ดี แต่มีข้อเสียคือใช้เวลาในการเรียงข้อมูลเพื่อหาค่ามัลติฐานนานมาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้พัฒนาวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์แบบสองมิติขึ้น เพื่อใช้กับภาพอัลตราซาวนด์ โดยประยุกต์ดัดแปลงมาจากวงจรกรองสัญญาณรบกวนหนึ่งมิติของซาวีสกี-โกเลย์ [13] ที่นิยมใช้สำหรับขจัดสัญญาณรบกวนจากเครื่องสเป็คโตมิเตอร์ในงานวิจัยทางเคมี วงจรกรองของซาวีสกี-โกเลย์นั้นมีคุณสมบัติในการรักษาค่าโมเมนต์อันดับสูงของฟังก์ชัน จึงไม่เพิ่มไบแอสในกรณีที่โครงสร้างของฟังก์ชันมีอนุพันธ์อันดับสองขึ้นไปไม่เป็นศูนย์ และยังคงสภาพของขอบไว้ได้ดี นอกจากนี้วงจรกรองแบบนี้ยังมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าวงจรกรองมัลติฐาน เมื่อหน้าต่างที่ใช้คำนวณมีขนาดใหญ่ จึงเหมาะแก่การพัฒนาเพื่อนำไปใช้ลดทอนสัญญาณรบกวนในภาพอัลตราซาวนด์ ในบทนี้ได้ทำการศึกษาการลดทอนสัญญาณรบกวน โดยวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์แบบสองมิติ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดทอนสัญญาณรบกวน และการคงสภาพของเส้นขอบ เมื่อใช้งานร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบทั่วๆ ไป เช่น วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้ [5] กับวงจรกรองมัลติฐาน

ในบทนี้แบ่งเป็น 4 หัวข้อ หัวข้อที่ 2.1 กล่าวถึงหลักการของวงจรกรองหนึ่งมิติของวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์ หัวข้อที่ 2.2 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้วงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์แบบสองมิติกับภาพ หัวข้อที่ 2.3 เป็นขั้นตอนการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติกับวงจรกรองมัลติฐาน หัวข้อที่ 2.4 เป็นผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล เมื่อใช้วงจรกรองกับภาพทดสอบที่ใส่สัญญาณรบกวนชนิดเดียวกับในภาพอัลตราซาวนด์ ส่วนผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล เมื่อใช้วงจรกรองที่พัฒนาขึ้นกับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์จะเป็นหัวข้อสุดท้าย

2.1 หลักการของวงจรรองหนึ่งมิติของซาวีสกี-โกเลย์

ปัจจุบันวงจรรองสัญญาณรบกวนของซาวีสกี-โกเลย์ มีใช้กันอย่างแพร่หลายในสาขาวิศวกรรมเคมี วงจรรองดังกล่าวเสนอขึ้น สำหรับกรองสัญญาณคลาดเคลื่อนจากการสุ่มสัญญาณหนึ่งมิติให้เรียบขึ้น เพื่อให้สามารถคำนวณค่าอนุพันธ์ของสัญญาณได้ และยังคงความสูงของค่ายอดของข้อมูลเอาไว้ การลดทอนสัญญาณรบกวน ทำโดยใช้ฟังก์ชันพหุนามต่อเนื่องมาแทนที่สัญญาณขาเข้าในหน้าต่างที่พิจารณา ทำให้ได้ข้อมูลที่เรียบขึ้น ซึ่งฟังก์ชันที่นำมาแทนที่นั้น ต้องเหมาะกับลักษณะยอดของสัญญาณขาเข้าด้วย กล่าวคือการเลือกค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นโค้งพหุนามดังกล่าว จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ทำให้ความผิดพลาดเนื่องจากการแทนที่มีค่าน้อยที่สุด

ถ้าเราพิจารณาอนุกรมของข้อมูลซึ่งมีค่า f_i เมื่อ $i = \dots, -1, 0, 1, \dots$ ตามลำดับ และ m เป็นดัชนีตำแหน่งของข้อมูลในหน้าต่างที่กำลังพิจารณามีค่าเป็น $-M, \dots, M$ ให้ p_i เป็นเส้นโค้งพหุนามที่มีอันดับสูงสุดของ m เป็น K ดังสมการ

$$p_i(m) = \sum_{k=0}^K a_k m^k \quad (2.1)$$

สัญญาณออกของวงจรรองของซาวีสกี-โกเลย์ g_i คำนวณโดยการบรรจุเส้นโค้งพหุนาม p_i ให้กับข้อมูล f_{i-M}, \dots, f_{i+M} โดยใช้ หลักการของค่ากำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจากการบรรจุที่น้อยที่สุด ดังนี้

$$\sum_{m=-M}^M (p_i(m) - f_{i+m})^2 \rightarrow 0 \quad (2.2)$$

หรือ

$$\frac{\partial}{\partial a_k} \sum_{m=-M}^M (p_i(m) - f_{i+m})^2 = 0 \quad (2.3)$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามที่ทำให้เกิดเงื่อนไข (2.3) จะได้จากสมการ

$$\vec{a} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \vec{f}) \quad (2.4)$$

โดยที่ \vec{a} แทน $(a_0, a_1, \dots, a_K)^T$ และ \vec{f} แทน $(f_{i-M}, \dots, f_{i+M})^T$ ส่วน \mathbf{A} เป็นเมทริกซ์ที่สร้างขึ้นจาก

$$A_{qr} = m(q)^{k(r)} \quad (2.5)$$

เมื่อ $m(q) = q - M - 1$ สำหรับ $q = 1, \dots, 2M + 1$ และ $k(r) = r - 1$ สำหรับ $r = 1, \dots, K + 1$

ค่าสัญญาณออกของวงจรรอง g_i จะเท่ากับค่าของ p_i ที่ตำแหน่ง $m = 0$ หรือ a_0 นั่นเอง การคำนวณค่า a_0 จึงเป็นเพียงการคำนวณแถวแรกของสมการ (2.5) เท่านั้นดังนี้

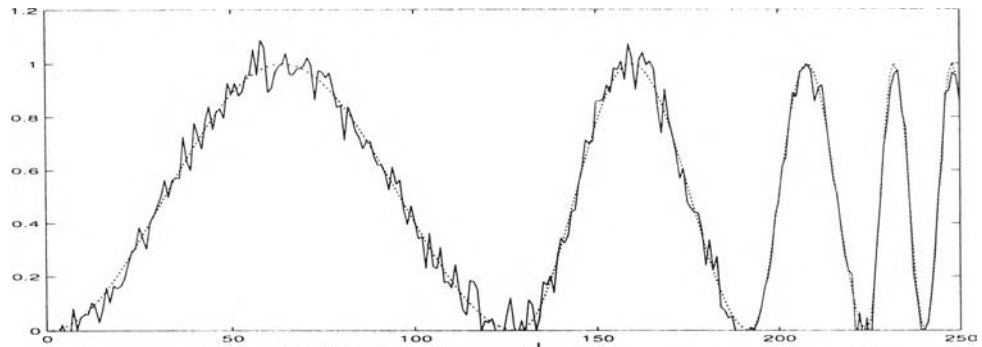
$$a_0 = \sum_{m=-M}^M \alpha_m f_{i+m} \quad (2.6)$$

เมื่อ

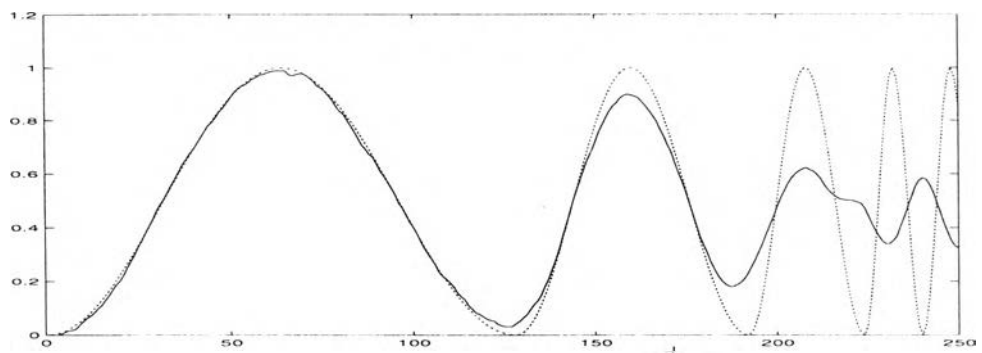
$$\alpha_m = \{(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \bar{\mathbf{e}}_{m+M+1})\}_1 \quad (2.7)$$

สัญลักษณ์ $\{ \}_1$ แทนสมาชิกตัวแรกของเวกเตอร์และ $\bar{\mathbf{e}}_{m+M+1}$ แทนเวกเตอร์ขนาดหนึ่งหน่วยที่มีสมาชิกตัวที่ $m + M + 1$ เป็นหนึ่ง การคำนวณโดยสมการ (2.6) เป็นเพียงการบวกที่มีจำนวนครั้งเท่ากับขนาดหน้าต่าง ($2M + 1$) เท่านั้น ซึ่งเป็นข้อดีของวงจรรองชนิดนี้คือใช้เวลาในการคำนวณเร็วมาก

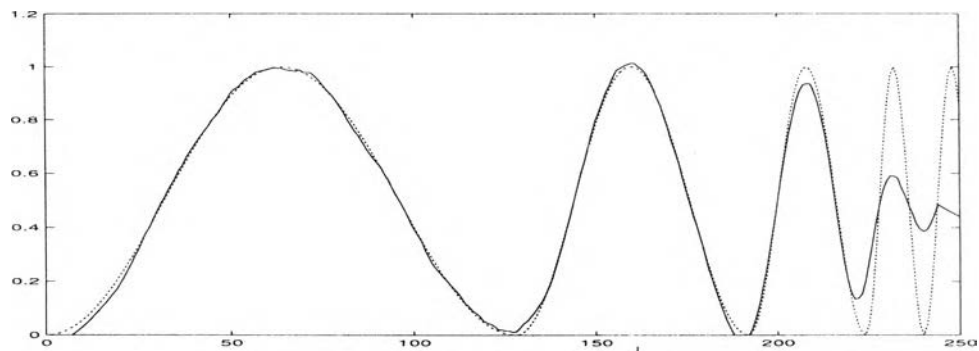
นอกจากนี้ด้วยโครงสร้างแบบไม่เชิงเส้น ยังทำให้สามารถคงค่ายอดของฟังก์ชันได้ดีกว่าวงจรรองที่ใช้ค่าเฉลี่ยธรรมดา ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ในรูปเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดทอนสัญญาณแบบเกาส์เซียนที่มีค่าแปรปรวนเท่ากับ 0.05 ระหว่างวงจรรองเฉลี่ย (mean filter) และวงจรรองของซาวีสกี-โกเลย์อันดับที่สองและสี่ โดยเส้นประเป็นฟังก์ชันเริ่มต้นก่อนใส่สัญญาณรบกวน แม้ว่าวงจรรองเฉลี่ยจะเป็นที่ยอมรับในการลดทอนสัญญาณรบกวน แต่การหาค่าเฉลี่ยจะทำให้องค์ประกอบความถี่สูงหรือความคมชัดของเส้นขอบหายไป ดังในรูปที่ 2.1 (ข) ขณะที่วงจรรองของซาวีสกี-โกเลย์คงความสูงของยอดไว้ได้ดีกว่า ดังรูปที่ 2.1 (ค) และ (ง) โดยที่การลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์ จะมีประสิทธิภาพดีใกล้เคียงกับวงจรรองเฉลี่ย เมื่ออันดับของพหุนามที่ใช้มีค่าต่ำ ขณะที่การคงค่ายอดของฟังก์ชันจะทำได้ดี เมื่อใช้พหุนามอันดับสูง และถ้าทดสอบวงจรรองแต่ละชนิดกับฟังก์ชันไซน์แปรความถี่ที่ลดทอนขนาด (attenuate) ด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลลบ พบว่าวงจรรองเฉลี่ยนั้นถึงแม้มีประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนดี แต่จะสูญเสียขอบที่มีความชันขอบสูงๆ ไป ในขณะที่วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์คงสภาพขอบไว้ได้ดีกว่า แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพการลดทอนสัญญาณรบกวนด้อยกว่าเล็กน้อย ด้วยความสามารถในการคงความคมชัดของขอบไว้ได้นี้ รวมกับการใช้เวลาในการคำนวณต่ำ ทำให้วงจรรองชนิดนี้เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับการกรองสัญญาณรบกวนในภาพอัลตราซาวนด์ โดยการขยายหลักการใช้งานของวงจรรองชนิดนี้มาเป็นแบบสองมิติ



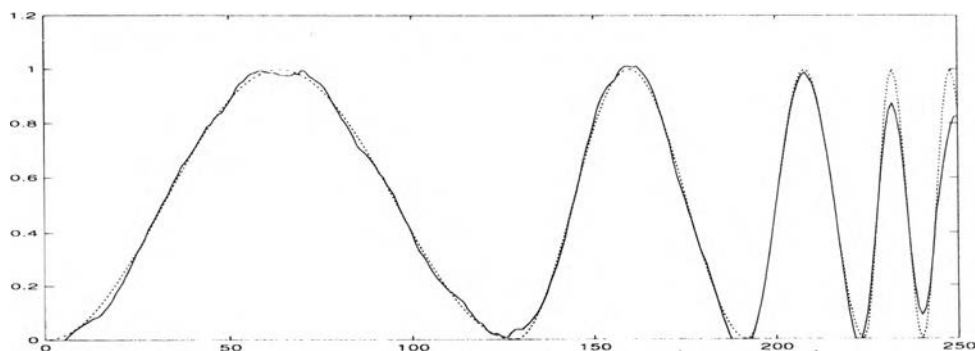
(ก) ฟังก์ชันไซน์แปรความถี่บวกสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน



(ข) สัญญาณหลังจากผ่านวงจรกรองเฉลี่ยขนาด 25 พิกเซล

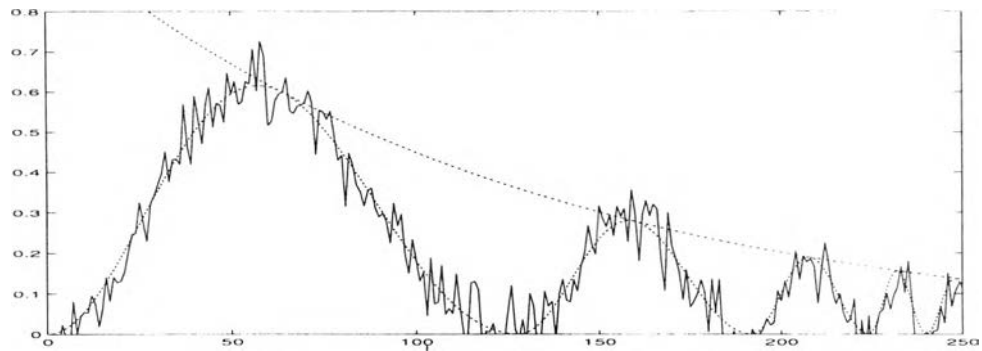


(ค) สัญญาณหลังจากผ่านวงจรกรองซาวิตซ์กี-โกลีย์แบบหนึ่งมิติอันดับสองขนาด 25 พิกเซล

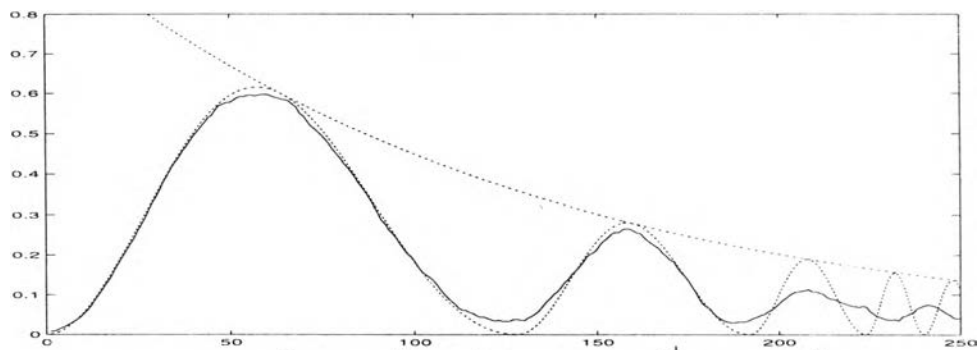


(ง) สัญญาณหลังจากผ่านวงจรกรองซาวิตซ์กี-โกลีย์แบบหนึ่งมิติอันดับสี่ขนาด 25 พิกเซล

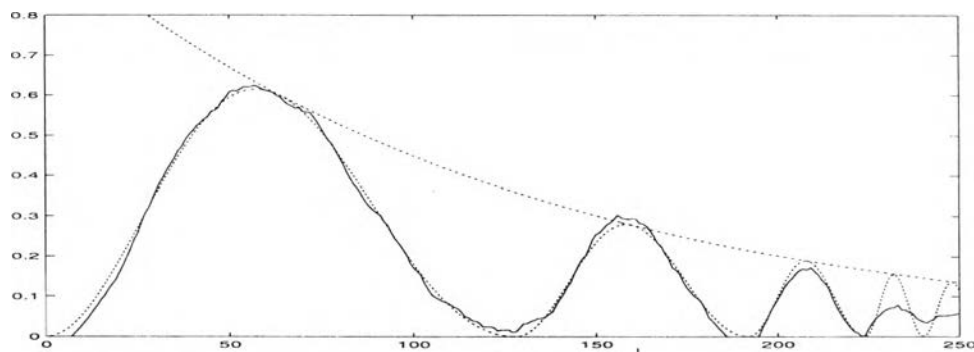
รูปที่ 2.1: เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนและการคงสภาพขอบระหว่างวงจรกรองซาวิตซ์กี-โกลีย์หนึ่งมิติกับวงจรกรองเฉลี่ย เมื่อกำหนดในรูปมีหน่วยเป็นพิกเซล



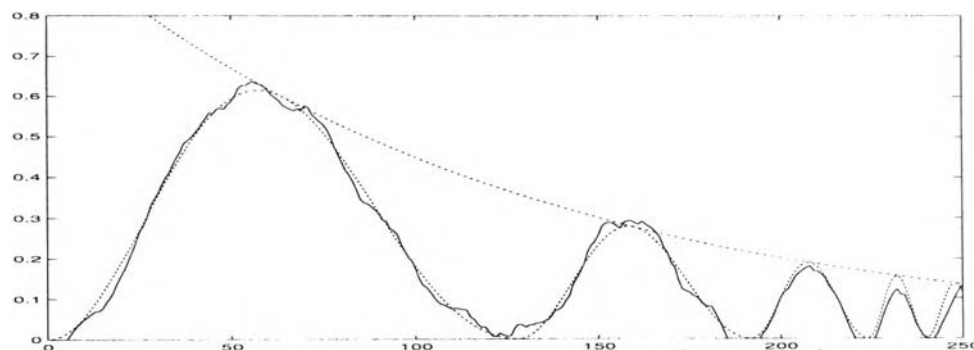
(ก) พังก์ชันไซน์ที่ถูกลดทอนขนาดบวกสัญญาณรบกวนแบบแก๊สเซียน



(ข) สัญญาณหลังจากผ่านวงจรกรองเฉื่อยขนาด 25 พิกเซล



(ค) สัญญาณหลังจากผ่านวงจรกรองซาวีตส์กี-โกเลย์แบบหนึ่งมิติอันดับสองขนาด 25 พิกเซล



(ง) สัญญาณหลังจากผ่านวงจรกรองซาวีตส์กี-โกเลย์แบบหนึ่งมิติอันดับสี่ขนาด 25 พิกเซล

รูปที่ 2.2: เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกรองสัญญาณรบกวนแบบแก๊สเซียน และการคงสภาพขอบระหว่างวงจรกรองซาวีตส์กี-โกเลย์หนึ่งมิติกับวงจรกรองเฉื่อย เมื่อสัญญาณเข้าถูกลดทอนขนาด

2.2 วงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์แบบสองมิติ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการขยายหลักการของวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์ มาใช้กับข้อมูลสองมิติ ซึ่งถ้าเราพิจารณาข้อมูลสองมิติ f_{ij} เมื่อ $i, j = \dots, -1, 0, 1, \dots$ และให้ p_{ij} เป็นระนาบพหุนามที่จะใช้บรรจุให้กับ $f_{i+m, j+n}$ เมื่อ $m = -M, \dots, M$ และ $n = -N, \dots, N$ เป็นดัชนีตำแหน่งของหน้าต่างของวงจรกรองขนาด $(2M + 1)(2N + 1)$ การบรรจุระนาบพหุนามเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนนั้น ต้องการให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการบรรจุที่น้อยที่สุด เช่นเดียวกับการบรรจุเส้นโค้งพหุนามของวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์หนึ่งมิติ โดยสมการของพหุนาม p_{ij} ที่มีอันดับ K สำหรับค่า m และอันดับ L สำหรับค่า n จะเป็นดังสมการ

$$p_{ij}(m, n) = \sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L a_{k,l} m^k n^l \quad (2.8)$$

เพื่อให้การคำนวณสัมประสิทธิ์ของระนาบพหุนาม สามารถใช้วิธีเดียวกับของวงจรกรองของซาวีสกี-โกเลย์แบบหนึ่งมิติได้ จึงจัดรูปแบบใหม่โดยนิยามดัชนีของอันดับพหุนาม $r = 1, \dots, (K + 1)(L + 1)$ แล้วเขียนสมการ (2.8) ใหม่ได้เป็น

$$p_{ij}(m, n) = \sum_{r=1}^{(K+1)(L+1)} a_{k(r), l(r)} m^{k(r)} n^{l(r)} \quad (2.9)$$

เมื่อ $k(r) = \lceil (r - 1)/(L + 1) \rceil$ และ $l(r) = (r - 1) \bmod (L + 1)$ ตามลำดับ โดย $\lceil \cdot \rceil$ แทนการปัดเศษขึ้นเป็นจำนวนเต็มทีใกล้เคียงที่สุด และ \bmod แทนการหารเอาเศษ

สำหรับสัมประสิทธิ์ของพหุนาม $a_{k(r), l(r)}$ เราเขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ตามสมการ

$$\vec{a} = (a_{k(r), l(r)} : r = 1, \dots, (K + 1)(L + 1))^T \quad (2.10)$$

และในทำนองเดียวกันถ้านิยามดัชนีตำแหน่ง $q = 1, \dots, (2M + 1)(2N + 1)$ เราจะสามารถจัดรูป $f_{i+m, j+n}$ ให้เป็นเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\vec{f} = (f_{i+m(q), j+n(q)} : q = 1, \dots, (2M + 1)(2N + 1))^T \quad (2.11)$$

เมื่อ $m(q) = \lceil (q - 1)/(2N + 1) - M \rceil$ และ $n(q) = (q - 1) \bmod (2N + 1) - N$ ตามลำดับ

การจัดรูปสัมประสิทธิ์ \vec{a} และ \vec{f} ตามสมการ (2.10) และ (2.11) นั้น ทำให้สามารถคำนวณ \vec{a} ได้โดยใช้สมการ (2.4) เช่นเดียวกับวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์แบบหนึ่งมิติโดยที่

$$A_{qr} = m(q)^{k(r)} n(q)^{l(r)} \quad (2.12)$$

สัญญาณออกของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์แบบสองมิติ g_{ij} นั่นก็คือค่าของระนาบพหุนาม $p_{ij}(m,n)$ เมื่อ $m = n = 0$ หรือ $a_{0,0}$ ซึ่งจะได้มาในทำนองเดียวกันกับสมการ (2.6) นั่นคือ

$$a_{0,0} = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \alpha_{m,n} f_{i+m,j+n} \quad (2.13)$$

เมื่อ

$$\alpha_{m,n} = \{(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \vec{e}_{(m+M+1,n+N+1)})\}_1 \quad (2.14)$$

โดยเมทริกซ์ \mathbf{A} คำนวณโดยใช้สมการ (2.12) และ $\vec{e}_{m+M+1,n+N+1}$ เป็นเวกเตอร์สองมิติขนาดหนึ่งหน่วยที่มีสมาชิก ณ ตำแหน่ง $(m + M + 1, n + N + 1)$ เป็นหนึ่ง ซึ่งถ้าเราให้ $K = L = 0$ วงจรรองที่ได้ก็จะเหมือนกับวงจรรองเฉลี่ย

แม้ว่าการใช้งานวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติที่ประยุกต์ขึ้น เพื่อจัดสัญญาณรบกวนในภาพ จะมีสมมติฐานที่ว่าวงจรรองดังกล่าวจะทำงานได้ดี เมื่อภาพนั้นสามารถแยกองค์ประกอบเป็นบริเวณย่อยๆ ได้ และมีความเข้มสัมพันธ์กับพิกัดภาพเป็นแบบพหุนาม แต่การใช้ระนาบพหุนามนั้น มีเป้าหมายเพื่อลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดีพอที่จะทำให่วงจรตรวจจับเส้นขอบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดสอบประสิทธิภาพในหัวข้อถัดไป แสดงให้เห็นว่าวงจรรองสามารถทำงานได้ดี ทั้งกับภาพที่สร้างขึ้นจากคอมพิวเตอร์ ภาพธรรมชาติ และภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์

2.3 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรรอง

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์ ในวิทยานิพนธ์ได้ใช้ภาพทดสอบที่ใส่สัญญาณรบกวนแบบจุด อันเป็นสัญญาณรบกวนหลักของภาพอัลตราซาวนด์ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับเมื่อใช้วงจรรองมัธยฐาน ในด้านเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ความสามารถในการลดทอนสัญญาณ การคงความคมชัดของเส้นขอบ และเส้นขอบที่ได้เมื่อนำไปตรวจจับเส้นขอบด้วยวงจรตรวจจับเส้นชนิดเดียวกัน จากนั้นจึงนำไปทดสอบกับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรรองในการใช้งานจริง

2.3.1 สัญญาณรบกวนแบบจุดในภาพอัลตราซาวนด์

สัญญาณรบกวนหลักในภาพอัลตราซาวนด์เป็นสัญญาณรบกวนแบบจุด (speckle) อันเป็นปรากฏการณ์สุ่ม ซึ่งเกิดจากการรบกวนกัน ระหว่างคลื่นอัลตราซาวนด์ที่สะท้อนกลับจากตัวสะท้อนเล็กๆ (scatter) ที่มีกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อเยื่อ สัญญาณรบกวนดังกล่าวมีการแจกแจงแบบเรย์ลีหากการสะท้อนเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เรียกว่า *fully-formed speckle* การแจกแจงในลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้น เนื่องจากสมมติฐานที่ว่า ผลรวมแบบเฟสเซอร์ของคลื่นที่สะท้อนกลับจากตัวสะท้อนนั้น มีการแจกแจงร่วม (joint distribution) ของค่าจริง (X_r) และค่าจินตภาพ (X_i) เป็นแบบเกาส์เซียน ตามหลักการของทฤษฎีบทลิมิตกลาง (Central Limit Theorem) ดังสมการ

$$p_{X_r, X_i}(X_r, X_i) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{X_r^2 + X_i^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.15)$$

เมื่อ σ^2 เป็นค่าแปรปรวนของ X_r และ X_i การแปลงผลรวมแบบเฟสเซอร์ของคลื่นสะท้อนดังกล่าว มาเป็นความเข้มในภาพอัลตราซาวนด์จะใช้เพียงขนาดของผลรวม และละเลยเฟสของผลรวมนั้นไป ดังนั้นการแจกแจงของความเข้มเนื่องจากตัวสะท้อน $X = \sqrt{X_i^2 + X_r^2}$ จึงกลายเป็นแบบเรย์ลี :

$$p_X(X) = \rho^2 X \exp\left(-\frac{X^2 \rho^2}{2}\right) \quad (2.16)$$

โดย ρ เป็นพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติของการแจกแจงแบบเรย์ลี ซึ่งสัมพันธ์กับ σ^{-1} ของสมการ (2.15) แบบเชิงเส้น

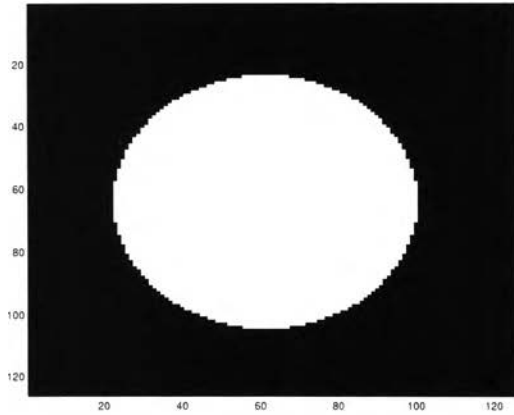
ผลกระทบของสัญญาณรบกวนแบบจุดต่อค่าความเข้มของภาพจะเป็นแบบคูณ [14] ตามสมการ

$$f = \mathcal{N}I \quad (2.17)$$

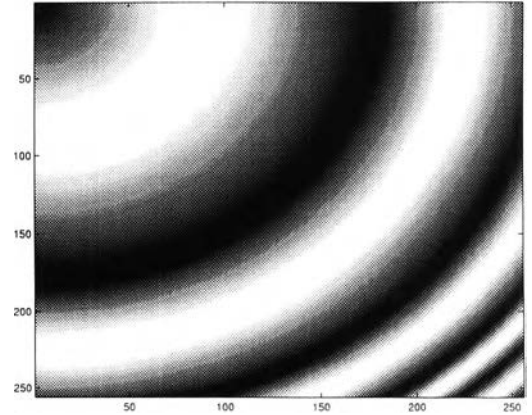
โดยที่ I เป็นความเข้มของภาพ \mathcal{N} เป็นสัญญาณรบกวนที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลี และ f เป็นความเข้มของภาพที่ได้หลังคูณ

2.3.2 ภาพที่ใช้ในการทดสอบ

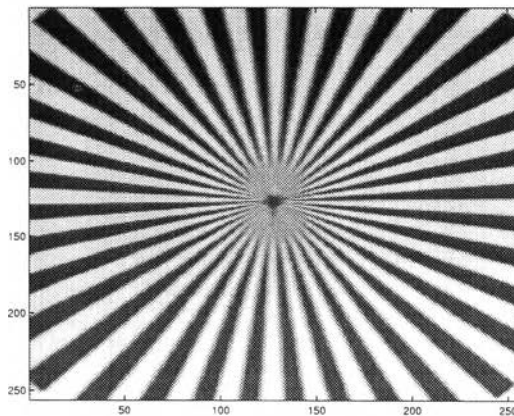
ภาพที่ใช้ในการทดสอบเป็นภาพที่สร้างขึ้น จากสมการทางคณิตศาสตร์จำนวน 4 ภาพดังรูปที่ 2.3 (ก) ถึง (ง) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนเมื่อมีทิศทางของเส้นขอบและความชันของเส้นขอบต่างๆ กัน และภาพธรรมชาติอีกสองภาพ



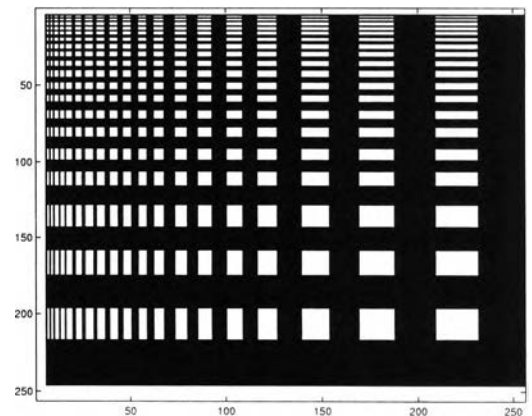
(ก)



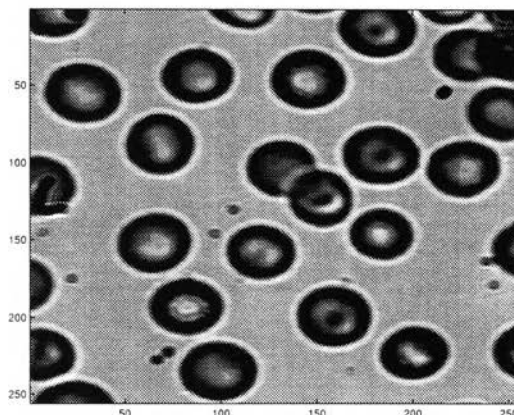
(ข)



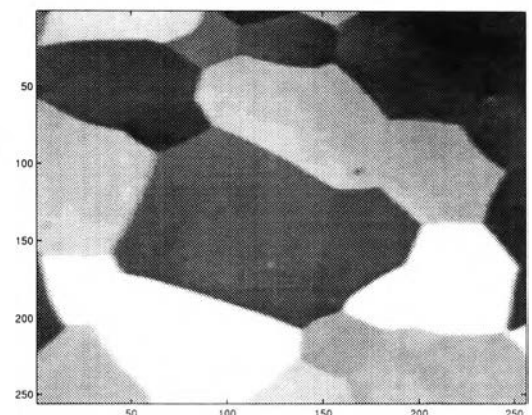
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 2.3: ตัวอย่างภาพที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของวงจกรอง

ดังรูปที่ 2.3 (จ) และ (ฉ) ซึ่งเป็นรูปเม็ดเลือดแดง และเกรนของอะลูมิเนียมตามลำดับ (ตัวเลขในรูปเป็นดัชนีตำแหน่งของพิกเซล) โดยเลือกภาพที่มีลักษณะใกล้เคียงกับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์ เช่น มีรูปแบบเส้นขอบไม่ซับซ้อน มีโทนความเข้มใกล้เคียงกัน ในการทดสอบจะนำภาพทดสอบทั้งหมดมาใส่สัญญาณรบกวนแบบจุดตามสมการ (2.16) และ (2.17) เพื่อพิจารณาการทำงานของวงจรรองในสภาพที่ใกล้เคียงกับภาพอัลตราซาวนด์ จากนั้นจึงทดลองนำวงจรรองไปใช้งานจริงกับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์

2.3.3 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจรรอง

- เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนแบบจุดของวงจรรอง ได้ใช้รูปที่ 2.3 (ก) ที่คูณสัญญาณรบกวนแบบจุดด้วยพารามิเตอร์ $\rho = 0.1$ แล้วในการทดสอบดังรูปที่ 2.4 (ก) โดยใช้ รากของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error. RMSE) เทียบกับขนาดหน้าต่างเป็นเกณฑ์ตัดสิน การคำนวณค่า $RMSE$ จะทำเฉพาะในบริเวณที่มีความเข้มคงตัว (บริเวณที่เป็นสีขาวในรูปที่ 2.5 (ก)) เพื่อลดการไบแอสของค่าความเข้ม ณ บริเวณขอบ

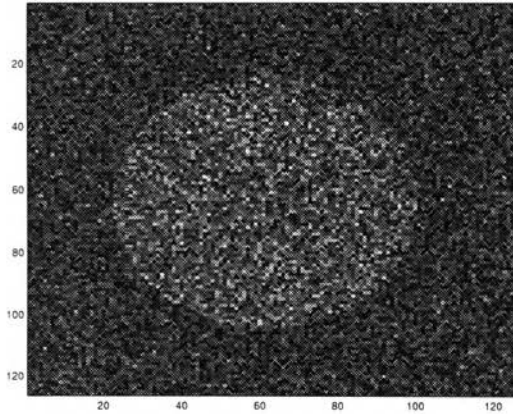
$$RMSE = \frac{1}{C} \sqrt{\sum_{k=1}^C (I_k - G_k)^2} \quad (2.18)$$

เมื่อ I เป็นความเข้มของภาพก่อนใส่สัญญาณรบกวน C เป็นจำนวนพิกเซลทั้งหมดที่เป็นสีขาวในรูปที่ 2.5 (ก) ส่วน G นั้นเป็นค่าที่สัมพันธ์กับเป็นภาพหลังจากผ่านวงจรรอง g ดังนี้

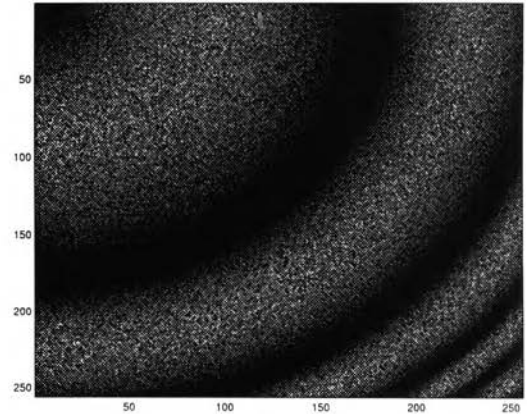
$$G = g/[N] \quad (2.19)$$

เมื่อ $[N]$ เป็นค่าคาดหวังหรือค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวน N ความจำเป็นของการใช้ค่า G ในสมการ (2.18) เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่นำมาคูณให้ภาพนั้น มีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์ ทำให้ภาพหลังใส่สัญญาณรบกวนมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าภาพเริ่มต้น $1/[N]$ เท่า จึงต้องคูณกลับเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของภาพเท่าเดิมสำหรับการคำนวณค่า $RMSE$ โดย $[N]$ คำนวณได้จากพารามิเตอร์การแจกแจงแบบเรย์ลีดังนี้

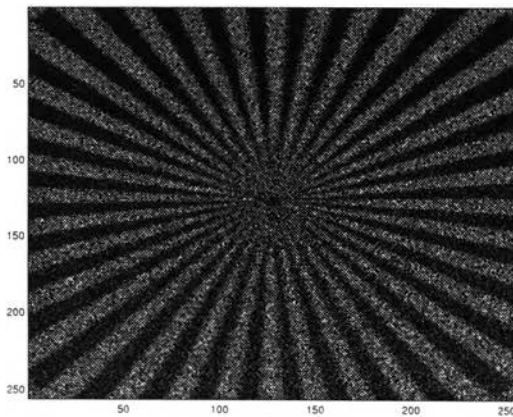
$$[N] = \sqrt{\frac{\pi}{2\rho^2}} \approx \frac{1.253}{\rho} \quad (2.20)$$



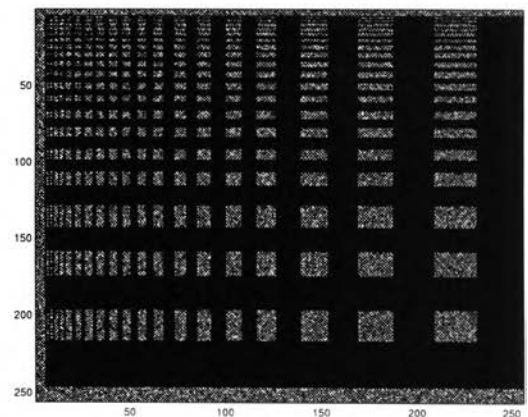
(ก)



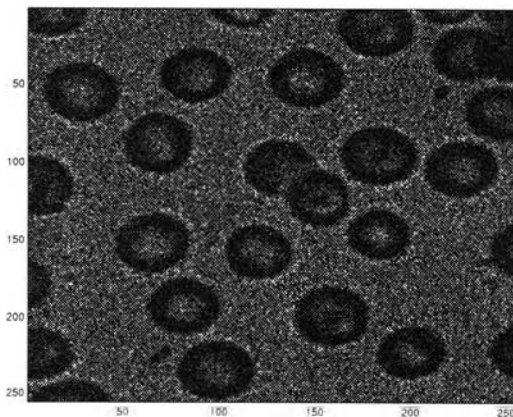
(ข)



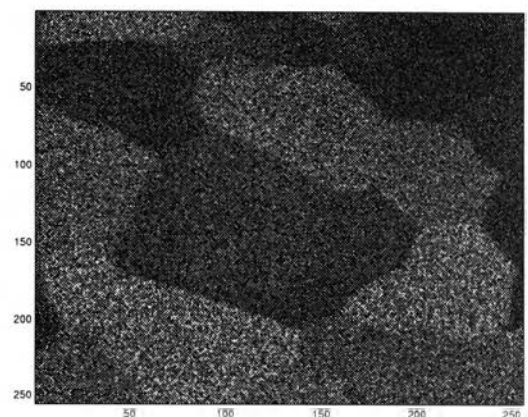
(ค)



(ง)

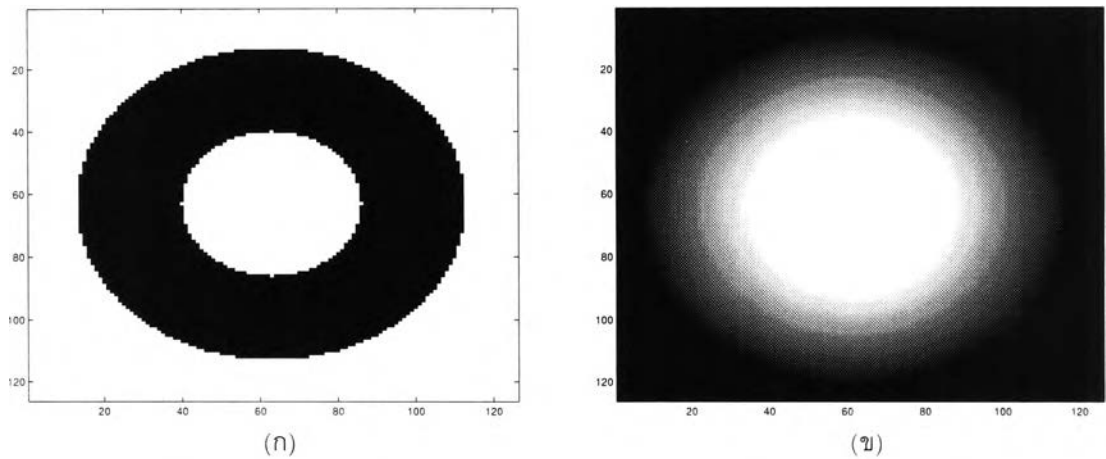


(จ)



(ฉ)

รูปที่ 2.4: ตัวอย่างภาพทดสอบที่ใส่สัญญาณรบกวนแล้ว



รูปที่ 2.5: บริเวณที่ใช้คำนวณค่า RMSE และภาพทดสอบที่มีความชันต่ำ

วงจรรองที่ใช้เปรียบเทียบได้แก่วงจรรองมาตรฐาน วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์แบบสองมิติที่มีอันดับ $K = L = 0, 2, 4$ ซึ่งจะเรียกว่า วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ สอง และสี่ ตามลำดับ โดยวงจรรองที่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดีจะมีค่า $RMSE$ ต่ำ

- เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการคงสภาพขอบ โดยเทียบกับขนาดหน้าต่าง ภาพที่ใช้ทดสอบเป็นภาพคล้ายกับรูปที่ 2.3 (ก) ซึ่งขอบมีลักษณะเป็นขั้น (มีความชันประมาณ 90 องศา) ภาพทดสอบที่ใช้จะมีความชันของขอบ เป็น 90, 80, 70, และ 65 องศาตามลำดับ เพื่อวัดการคงลักษณะของขอบที่มีความชันต่างๆ กัน ทั้งในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนและไม่มีสัญญาณรบกวน ตัวอย่างของภาพที่มีความชันขอบเท่ากับ 70 องศาได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 (ข) วงจรรองที่สามารถคงสภาพขอบไว้ได้ดี ควรมีค่าเฉลี่ยของความชันเส้นขอบในภาพหลังลดทอนสัญญาณรบกวนใกล้เคียงกับภาพเริ่มต้น
- เพื่อวิเคราะห์การใช้งานร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบแบบเกรเดียนต์ การหาเส้นขอบในภาพมักไม่มีประสิทธิภาพ ถ้าภาพดังกล่าวไม่เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ เช่น สำหรับวงจรตรวจจับเส้นขอบที่ใช้หลักการของเกรเดียนต์ ซึ่งกำหนดจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มสูงสุดเป็นตำแหน่งขอบ เมื่อนำมาใช้กับภาพที่มีสัญญาณรบกวนสูง ซึ่งไม่ได้มีขนาดเกรเดียนต์สูงสุดเฉพาะที่ตำแหน่งขอบ ตามที่ตั้งสมมติฐานไว้ จึงได้เส้นขอบที่ไม่ต้องการมากมาย ดังนั้นโดยอาศัยหลักการบรรจุนาพหุนาม การใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติควรลดทอนสัญญาณรบกวน ปรับปรุงภาพให้เข้าใกล้สมมติฐานที่วงจรตรวจจับเส้นขอบแบบเกรเดียนต์ต้องการ และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับวงจรตรวจจับเส้นขอบมากขึ้น การวิเคราะห์การใช้งานร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบแบบเกรเดียนต์ จะพิจารณาลักษณะเส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรรองร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบ เปรียบเทียบกับเส้นขอบที่ได้เมื่อไม่ได้ใช้วงจรรอง

วงจรถรวจจับเส้นขอบที่เลือกใช้นั้นเป็นวงจรถรวจจับเส้นขอบของแคนนี่ สาเหตุที่เลือกใช่วงจรถรวจจับเส้นขอบดังกล่าว เนื่องจากเป็นวงจรถรวจจับเส้นขอบที่มีโครงสร้างง่าย ใช้เวลาในการคำนวณต่ำ ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการตรวจจับเส้นขอบได้ดีในระดับหนึ่ง ให้ผลตอบชัดเจนเพียงผลตอบเดียวต่อหนึ่งขอบ และเป็นวงจรถรวจจับเส้นขอบที่ใช้ในเทคนิค pre-emptive (โดยขั้นตอนการทำงานของวงจรถรวจจับเส้นขอบแคนนี่ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ก) ภาพที่ใช้ในการทดสอบได้แก่รูปที่ 2.3 (ก) ถึง (ง) ซึ่งมีลักษณะและทิศทางของเส้นขอบต่าง ๆ กัน ภาพเม็ดเลือดแดงและภาพเกรนอะลูมิเนียม รวมทั้งภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์ด้วย

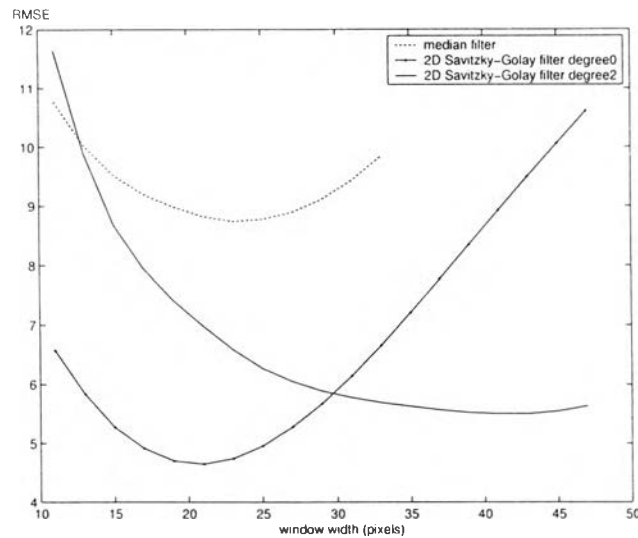
2.4 ผลการทดสอบกับภาพทดสอบและการวิเคราะห์ผล เมื่อใช่วงจรถรองกับภาพทดสอบ

เมื่อทดสอบการใช้งานวงจรถรองทั้งสี่แบบคือวงจรถรองมัธยฐาน วงจรถรองซาวีสกี-โกเลย์ แบบสองมิติที่มีอันดับศูนย์ สอง และสี่ ที่เขียนด้วยโปรแกรมภาษา MATLAB บนเครื่องคอมพิวเตอร์ Pentium II - 350, Intel MMX ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

2.4.1 ประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณรบกวนของวงจรถรอง

2.4.1.1 กรณีเปรียบเทียบตามขนาดหน้าต่าง

เมื่อเพิ่มขนาดหน้าต่าง ค่า $RMSE$ ของทุกวงจรถรองจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงระดับหนึ่ง แล้วจะเพิ่มขึ้นใหม่อีกครั้ง การเพิ่มขึ้นของค่า $RMSE$ นี้เกิดขึ้นเนื่องจากการให้น้ำหนักกับพิกเซลอื่นมากเกินไปทำให้เกิดไบแอส ค่าที่ได้จึงต่างจากค่าก่อนใส่สัญญาณรบกวนมาก และยิ่งแตกต่างมากขึ้นเรื่อยๆ ถ้าเพิ่มปริมาณของพิกเซลที่นำมาพิจารณา เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวงจรถรองสองชนิด พบว่าวงจรถรองซาวีสกี-โกเลย์แบบสองมิติมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าวงจรถรองมัธยฐานมาก โดยวงจรถรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์มีประสิทธิภาพในการลดทอนสัญญาณได้ดีกว่าวงจรถรองอื่นๆ ที่ขนาดหน้าต่างน้อยกว่า 30 พิกเซล ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของวงจรถรองดังกล่าว ใกล้เคียงกับความเป็นเชิงเส้นของภาพเริ่มต้น มากกว่าวงจรถรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสูง อย่างไรก็ตาม ขนาดหน้าต่างที่วงจรถรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ทำงานได้ดีนั้น อยู่ในช่วงสั้นกว่าวงจรถรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง ในรูปที่ 2.6 ไม่ได้แสดงค่า $RMSE$ ของวงจรถรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่



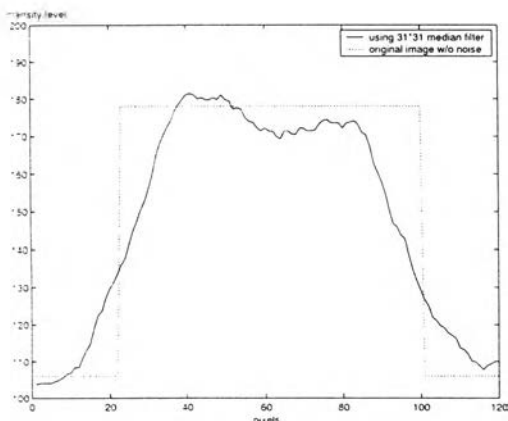
รูปที่ 2.6: ค่า RMSE ของวงจรรองแต่ละชนิดตามขนาดหน้าต่าง

เนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงมากประมาณ 27-29 (ภาพก่อนใส่สัญญาณรบกวนมีค่า $RMSE$ ประมาณ 62-64)

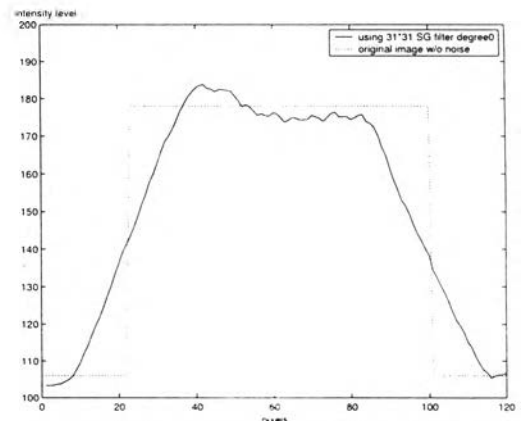
นอกจากนี้อาจต้องหมายเหตุไว้ว่าการให้ค่า $RMSE$ ต่ำหรือสูงไม่ได้บ่งบอกว่า เมื่อคำนวณเส้นขอบจากภาพที่ได้จากวงจรรองจะได้เส้นขอบที่เรียบหรือต่อเนื่อง เพราะค่าดังกล่าวไม่ได้แสดงถึงความเรียบของข้อมูล

ตัวอย่างของค่าความเข้มเมื่อใช้ขนาดหน้าต่างเท่ากันได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ส่วนค่าความเข้มเมื่อเลือกใช้ขนาดหน้าต่างที่ให้ $RMSE$ ต่ำสุดได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 โดยเส้นประในรูปเป็นค่าความเข้มของภาพ ก่อนใส่สัญญาณรบกวน

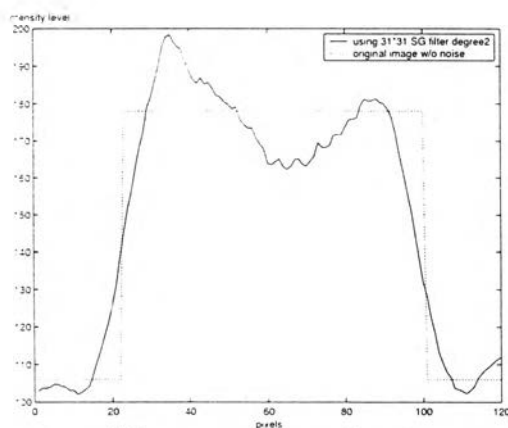
- เมื่อใช้ขนาดหน้าต่างเท่ากัน แล้วเปรียบเทียบวงจรรองทั้ง 4 แบบ รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าวงจรรองซาวิตซกี-โกเลย์อันดับศูนย์ ลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดีที่สุด ส่วนวงจรรองซาวิตซกี-โกเลย์อันดับสี่ ด้านทานต่อสัญญาณรบกวนได้ต่ำสุด ทั้งนี้เพราะว่าวงจรรองซาวิตซกี-โกเลย์อันดับสี่ มีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นมาก สามารถสร้างโมเดลได้ใกล้เคียงกับภาพก่อนเข้าวงจรรอง แต่ภาพดังกล่าวมีสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการอยู่มากนั่นเอง
- เมื่อพิจารณาที่ค่า $RMSE$ ต่ำสุดของวงจรรองแต่ละแบบ วงจรรองมัลฐานและวงจรรองซาวิตซกี-โกเลย์อันดับศูนย์ จะให้ข้อมูลที่เรียบกว่าวงจรรองแบบอื่น ทั้งนี้



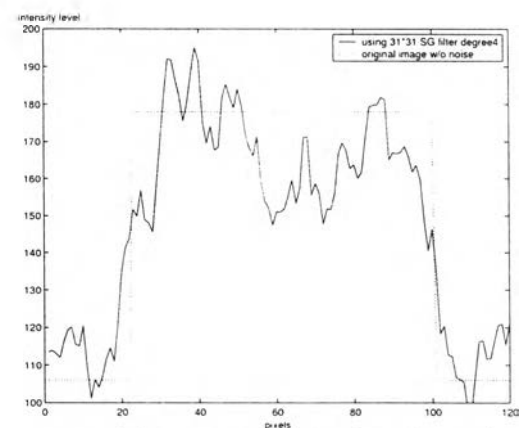
(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัลติฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์

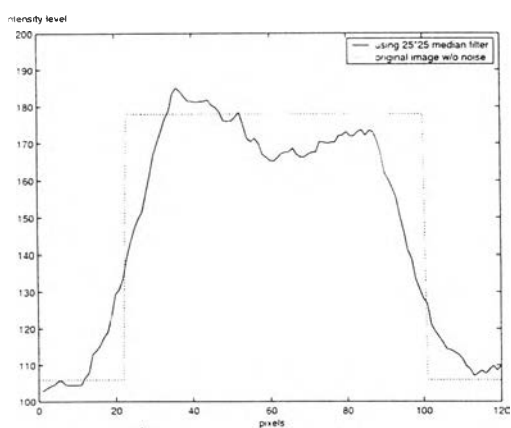


(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

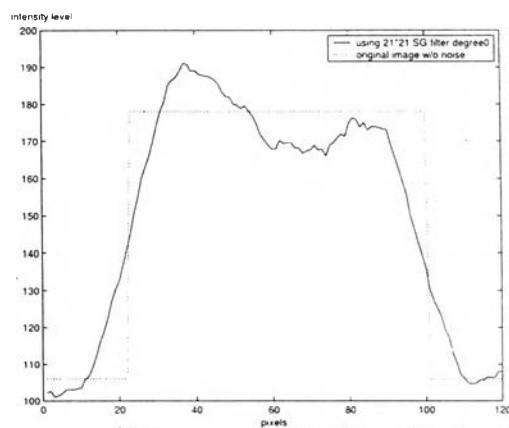


(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

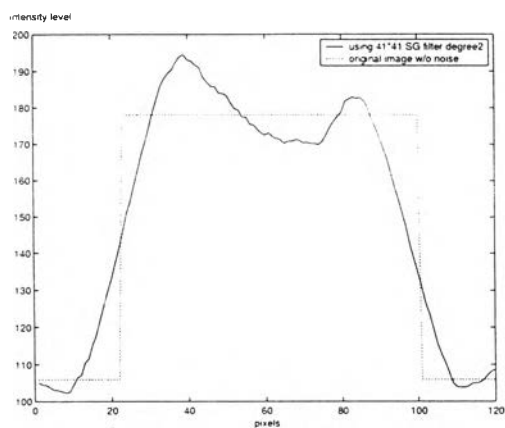
รูปที่ 2.7: ตัวอย่างค่าความเข้มของภาพหลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างขนาด 31x31 พิกเซล



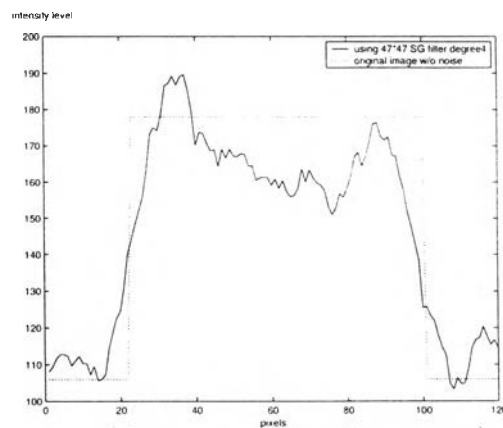
(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัธยฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์



(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง



(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

รูปที่ 2.8: ตัวอย่างค่าความเข้มของภาพหลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดเมื่อใช้ขนาดหน้าต่างที่ให้ค่า RMSE ต่ำสุด

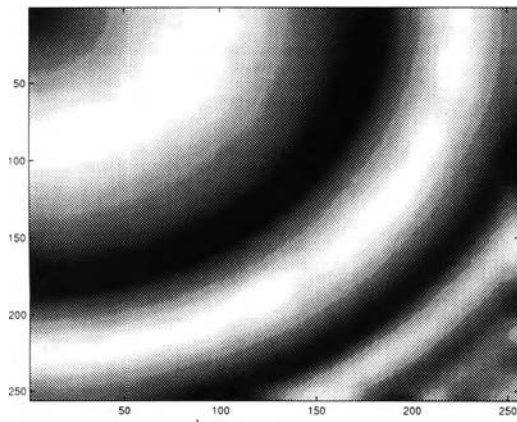
ด้วยเหตุผลด้านโครงสร้างของวงจรรอง เช่นเดียวกับวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่ นั่นคือ วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์มีโครงสร้างเป็นเชิงเส้น จึงตัดทอนสัญญาณส่วนเกินได้มากกว่า และเร็วกว่าเมื่อใช้โครงสร้างไม่เชิงเส้นของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสูงๆ ส่วนการเลือกใช้ค่ากลางของฟังก์ชันรอบจุดที่พิจารณาเป็นค่ามัธยฐานของวงจรรองมัธยฐาน ก็ทำให้ข้อมูลเร็วกว่าการใช้โครงสร้างไม่เชิงเส้นของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์ด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ดี การให้ค่า $RMSE$ ต่ำและความเรียบของข้อมูลที่ได้ ของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ก็ต้องทดแทนด้วยความสามารถในการคงสภาพขอบที่ลดลง ดังจะแสดงให้เห็นต่อไป

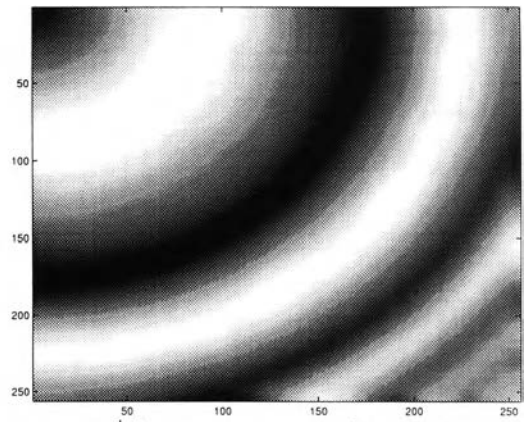
นอกจากการพิจารณาเฉพาะค่า $RMSE$ ของภาพทดสอบ (ก) แล้ว ได้เพิ่มการทดสอบการใช้วงจรรองแต่ละชนิดกับภาพลักษณะต่างๆ เพื่อให้เห็นถึงการทำงานของวงจรรองในกรณีต่างๆ กันได้ดีขึ้น ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังนี้

2.4.1.2 กรณีเปรียบเทียบตามลักษณะภาพต่างๆ

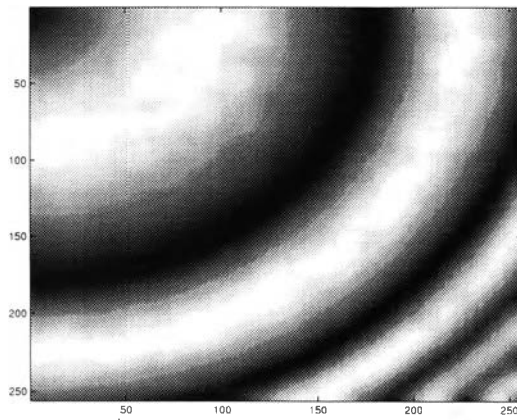
เมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดหน้าต่างของวงจรรองเท่า ๆ กัน สำหรับรูปที่ 2.9 ที่มีความชันที่ขอบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากมุมบนซ้ายถึงมุมล่างขวา ถ้าวจรรองได้ขจัดสัญญาณรบกวนได้ดี จะเห็นบริเวณที่เป็นสีขาวเรียบและชัดเจน ซึ่งที่ขนาดหน้าต่างเท่ากัน ในบริเวณที่มีความชันต่ำวจรรองมัธยฐานให้สีขาว ใกล้เคียงกับวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ แต่สะอาดกว่าวจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองและสี่ แสดงว่าขจัดสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า แต่เมื่อความชันสูงขึ้นบริเวณที่ควรเป็นสีขาวกลับกลายเป็นสีเทา ทั้งนี้ไม่ได้หมายความว่า วงจรรองมัธยฐานและวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ จะกรองสัญญาณรบกวนได้ดีด้อยกว่า แต่เนื่องจากที่บริเวณดังกล่าว สัญญาณทั้งส่วนที่เป็นภาพเองและส่วนที่เป็นสัญญาณรบกวนโดนขจัดออกไปจนหมด จนทำให้ค่ายอดลดลงกลายเป็นเนื้อเดียวกันและมองเห็นเป็นสีเทา ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความชันของขอบกับขนาดหน้าต่างของวงจรรองแต่ละชนิดได้แสดงไว้ในหัวข้อถัดไป การแสดงค่าความเข้มของภาพมีการกระจายให้ใช้ระดับสีที่มีอยู่จนครบ (scaled color mapping) ดังนั้นที่เราเห็นว่าวจรรองมัธยฐานกรองสัญญาณให้สีขาวกว่าวจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองและสี่ เพราะข้อมูลเรียบและถูกลดทอนค่ายอดให้อยู่ในช่วงแคบๆ ค่าหนึ่ง เมื่อกระจายระดับสีให้กับความเข้มของภาพ จึงเกิดเป็นสีสว่างกว่า แต่ถ้านำไปคำนวณค่า $RMSE$ เปรียบเทียบกับรูปก่อนใส่สัญญาณรบกวน ก็จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงมาก เหมือนในรูปที่ 2.6 โดยไม่ได้ขัดแย้งกันแต่ประการใด



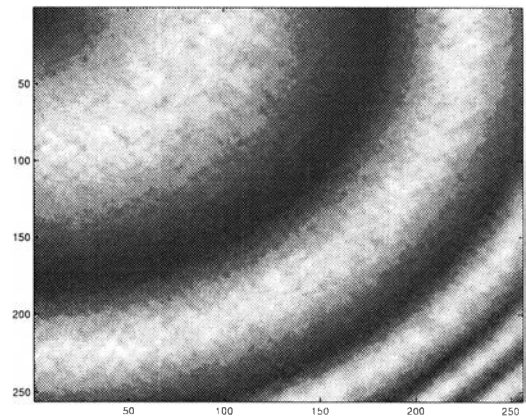
(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัลติฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์

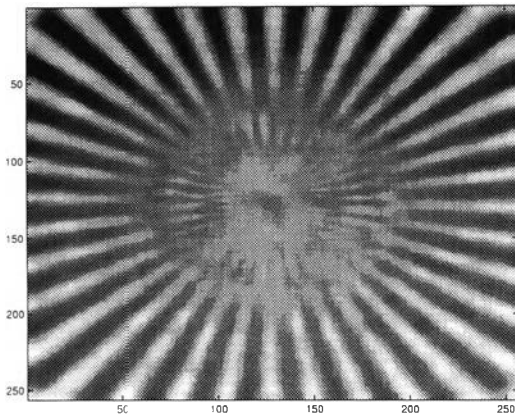


(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

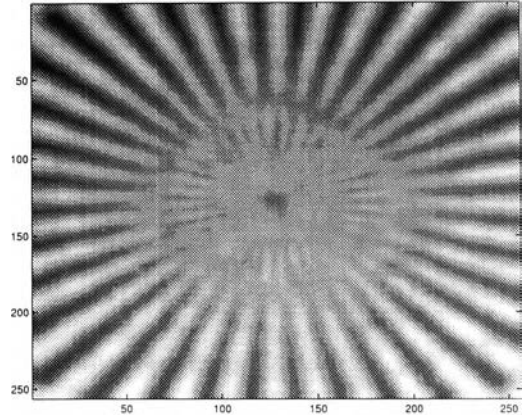


(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

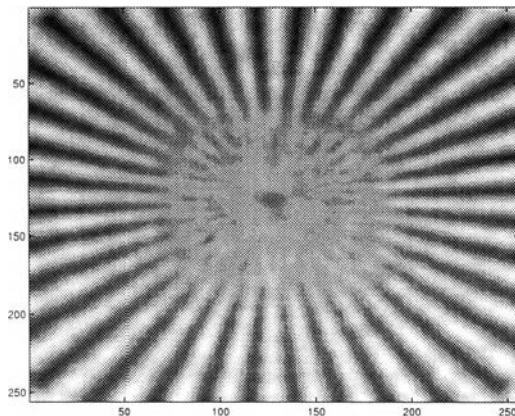
รูปที่ 2.9: รูปที่ 2.4 (ข) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างเท่ากับ 25x25 พิกเซล



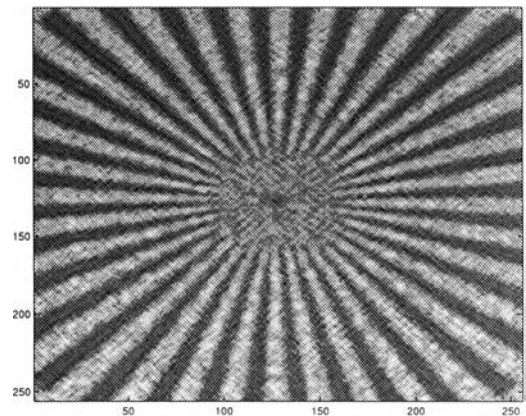
(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัลติฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์

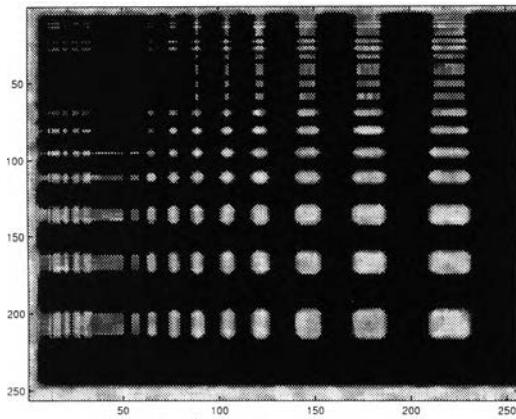


(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

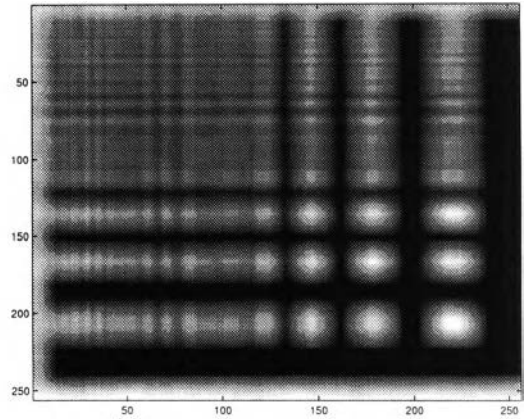


(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

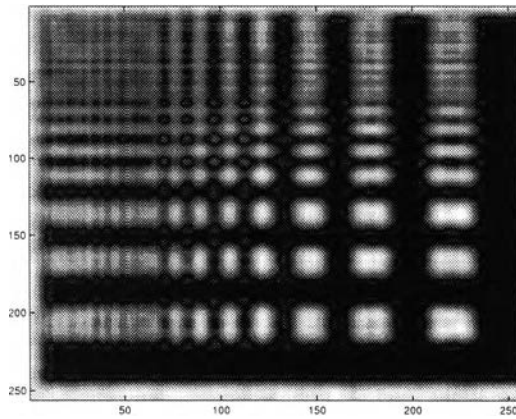
รูปที่ 2.10: รูปที่ 2.4 (ค) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างเท่ากับ 11x11 พิกเซล



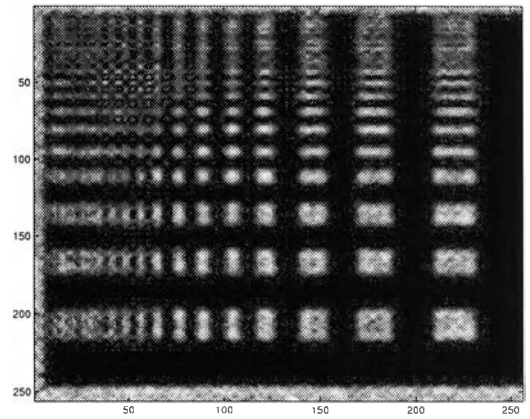
(ก) เมื่อใช้วงจรรองมีรยฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์

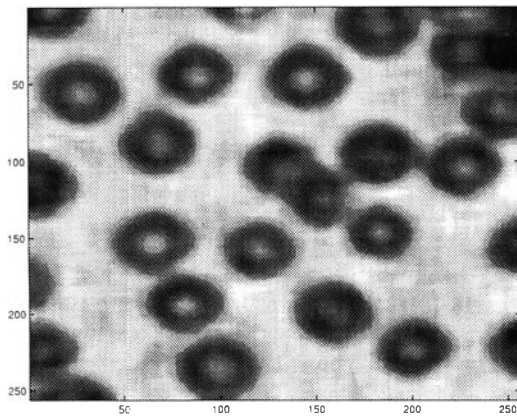


(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

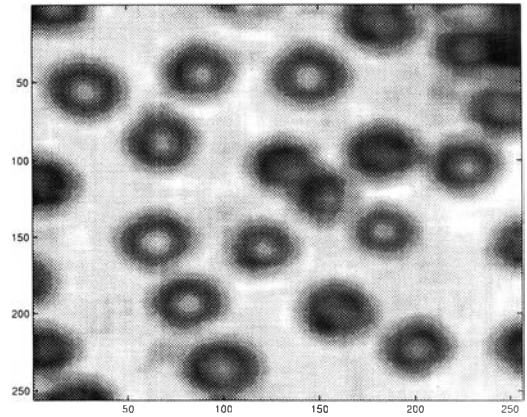


(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

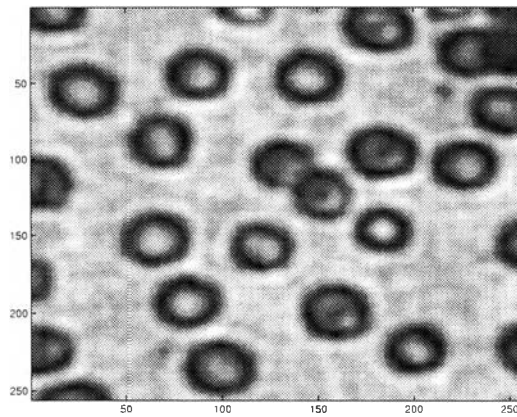
รูปที่ 2.11: รูปที่ 2.4 (ง) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างเท่ากับ 15x15 พิกเซล



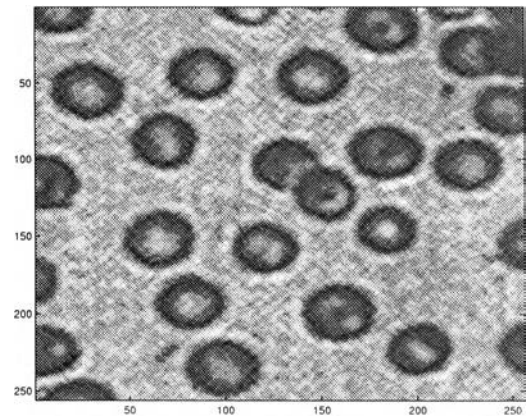
(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัธยฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์

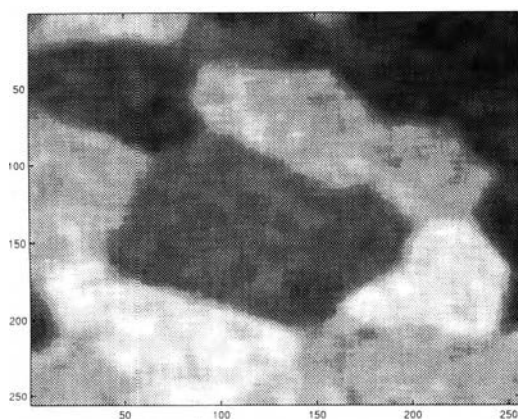


(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

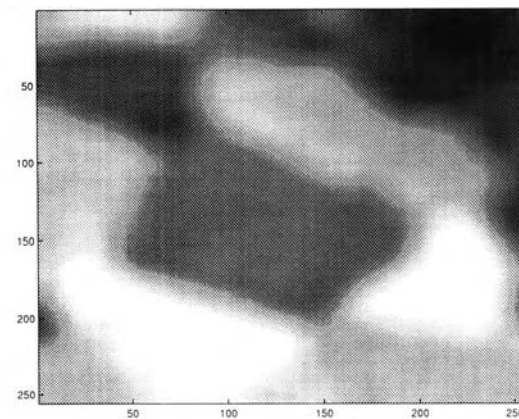


(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

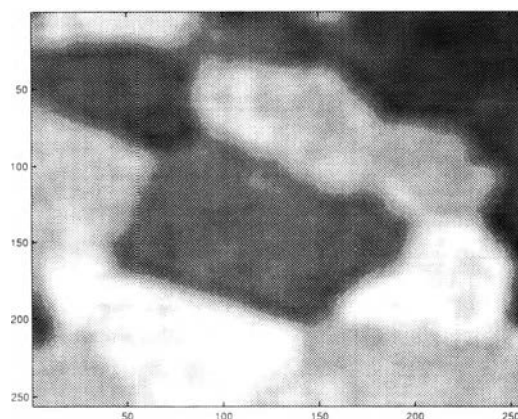
รูปที่ 2.12: รูปที่ 2.4 (จ) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างเท่ากับ 15x15 พิกเซล



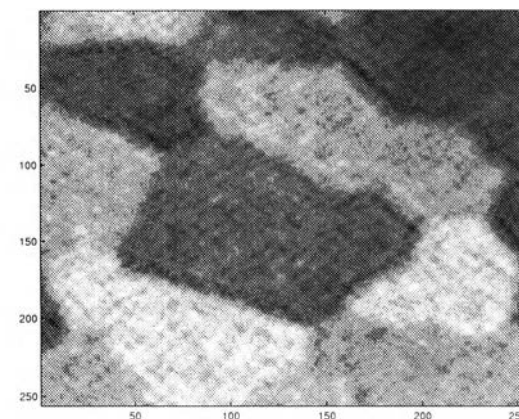
(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัลติฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์



(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง



(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

รูปที่ 2.13: รูปที่ 2.4 (ค) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างเท่ากับ 23x23 พิกเซล

ส่วนรูปที่ 2.10 และ 2.11 ซึ่งมีความชันของขอบใกล้เคียงกันในแต่ละภาพ แต่มีรายละเอียดหรือระยะห่างระหว่างเส้นขอบแต่ละเส้นลดลงเรื่อยๆ จนน้อยกว่าขนาดของวงจรรองที่ใช้เพียงเล็กน้อย วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์จะเริ่มให้ภาพที่เพี้ยนไป คือตำแหน่งของแถบขาวและดำไม่ถูกต้อง หรือไม่ทั้งแถบขาวและดำก็หายไปกลายเป็นสีเทาหรือดำเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เพราะระยะห่างของแต่ละเส้นขอบนั้น น้อยเกินกว่าจะใช้โครงสร้างเชิงเส้นของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์แทนค่ายอดได้ จึงไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มได้ทันเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.9 วงจรรองมัธยมและวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองก็เกิดกรณีดังกล่าวขึ้นเช่นกัน แต่เกิดที่ระยะห่างระหว่างขอบน้อยกว่า เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่ยังพอแยกความแตกต่างเมื่อระยะห่างระหว่างขอบน้อยลงมากได้ แต่บริเวณที่เป็นสีขาวก็ยังไม่สะอาดเท่าวงจรรองอื่นๆ เพราะผลจากสัญญาณรบกวน

เมื่อพิจารณาการใช้วงจรรองแต่ละชนิดกับภาพเม็ดเลือดแดงและภาพเกรนอะลูมิเนียม ซึ่งใช้ทดสอบการใช้งานกับภาพจริงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มตามธรรมชาติ และไม่ได้สร้างขึ้นจากสมการคณิตศาสตร์นั้น พบว่าวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองให้รายละเอียดของเม็ดเลือดแดง เช่น เมมเบรน สมบูรณ์กว่าวงจรรองชนิดอื่น ถึงแม้เส้นขอบจะไม่ชัดเจนและมัว ขณะที่วงจรรองมัธยมให้เส้นขอบที่คมชัดกว่าในภาพเกรนอะลูมิเนียม

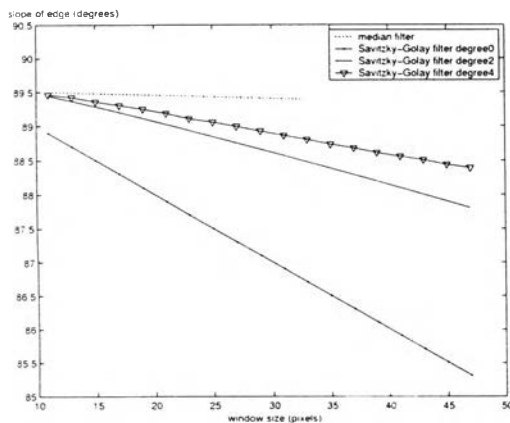
การทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ มีความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดีที่สุด วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่กรองสัญญาณรบกวนได้น้อยที่สุด ส่วนวงจรรองมัธยมลดทอนสัญญาณได้ดีระดับหนึ่ง แต่ข้อมูลมีความเรียบมากกว่าวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองและสี่ ทั้งเมื่อใช้กับภาพที่สร้างขึ้นจากสมการคณิตศาสตร์ หรือกับภาพธรรมชาติ

2.4.2 ประสิทธิภาพในคงสภาพขอบของวงจรรอง

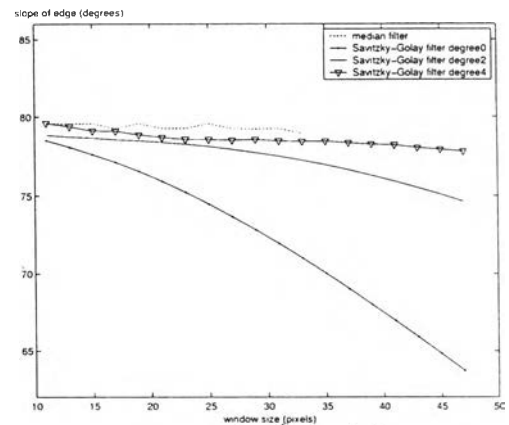
เมื่อทดสอบเพิ่มเติมเพื่อวิเคราะห์การคงสภาพเส้นขอบของวงจรรองเมื่อใช้กับรูปที่ 2.4 (ก) ที่มีความชันเส้นขอบเริ่มต้นต่าง ๆ กันแล้วเปรียบเทียบความชันของเส้นขอบก่อนและหลังใส่สัญญาณรบกวนแบบเรย์ลีขนาด $\rho = 0.1$ พบว่า:

- ถ้าพิจารณาภาพเมื่อยังไม่ได้ใส่สัญญาณรบกวน การใช้หน้าต่างในการคำนวณทำให้วงจรรองแต่ละแบบ มีแนวโน้มที่จะทำให้ขอบมัวอยู่แล้ว ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.14 ซึ่งวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่สามารถคงความชันของเส้นขอบไว้ได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับต่ำกว่า แต่ก็ยังด้อยกว่าวงจรรองมัลฐาน ทั้งนี้ความเป็นเชิงเส้นของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ทำให้ความชันของเส้นขอบลดลงกว่าวงจรรองชนิดอื่น
- เมื่อใส่สัญญาณรบกวนให้ภาพ ประสิทธิภาพในการคงสภาพขอบยิ่งลดลงตามขนาดหน้าต่างที่เพิ่มขึ้น แม้ในกรณีของวงจรรองมัลฐานซึ่งเป็นที่ยอมรับด้านการคงสภาพขอบเองก็ตาม ในรูปที่ 2.15 (ก) ความชันของขอบเมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองและสี่ ใกล้เคียงกับความชันของขอบเดิมซึ่งเท่ากับ 89.5 องศา มากกว่าอันดับศูนย์ที่แม้ว่าโครงสร้างเชิงเส้นจะสามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดี แต่ก็ทำให้ขอบมัวมากกว่าวงจรรองชนิดอื่น ในภาพยังแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการคงสภาพขอบของวงจรรองมัลฐานลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสัญญาณรบกวน ขณะที่วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์และสองมีความชันใกล้เคียงกับกรณีไม่มีสัญญาณรบกวน นั้นแสดงว่าวงจรรองมัลฐานนั้นมีประสิทธิภาพในการคงสภาพขอบขึ้นกับปริมาณสัญญาณรบกวนด้วย ในขณะที่ปริมาณสัญญาณรบกวนไม่มีผลต่อวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์และสองมากนัก เมื่อความชันของเส้นขอบในภาพเริ่มต้นลดลงผลกระทบจากสัญญาณรบกวนจะมีมากขึ้น ทำให้ที่หน้าต่างขนาดเล็กยังไม่สามารถลดทอนสัญญาณรบกวนได้ดี ค่าความชันที่คำนวณได้จึงมีการแกว่งตัวสูง เพราะจำนวนตัวอย่างค่าความชันเส้นขอบที่นำมาเฉลี่ยนั้นไม่เพียงพอที่จะชดเชยขนาดสัญญาณรบกวนที่วงจรรองไม่สามารถขจัดไปได้ โดยเฉพาะในกรณีวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่ซึ่งแกว่งตัวมาก จนกระทั่งไม่สามารถแสดงไว้ในรูปที่ 2.15 (ค) และ (ง) ได้

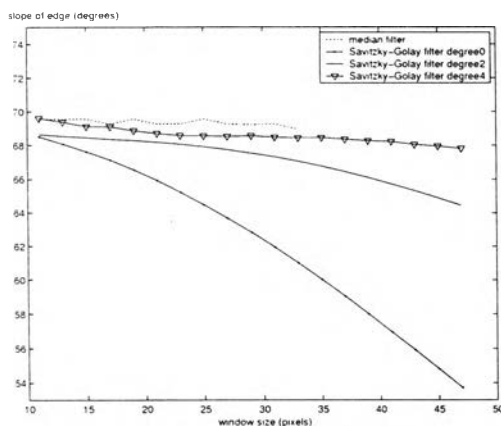
ค่าความชันที่ได้นั้น แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของประสิทธิภาพในการคงสภาพขอบของวงจรรองแต่ละชนิด ซึ่งสัญญาณรบกวนมีผลต่อวงจรรองมัลฐานและวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่ มากกว่าวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับต่ำกว่า



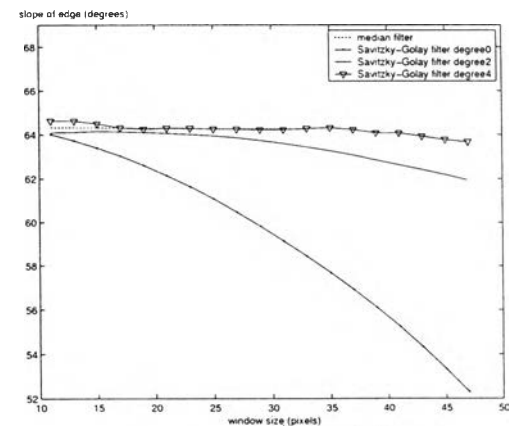
(ก) ความชันเริ่มต้นเท่ากับ 89.5



(ข) ความชันเริ่มต้นเท่ากับ 80

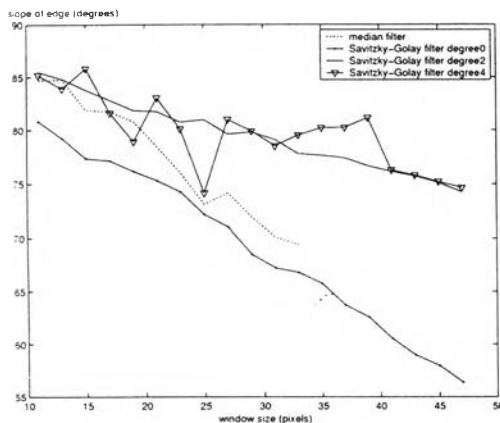


(ค) ความชันเริ่มต้นเท่ากับ 70

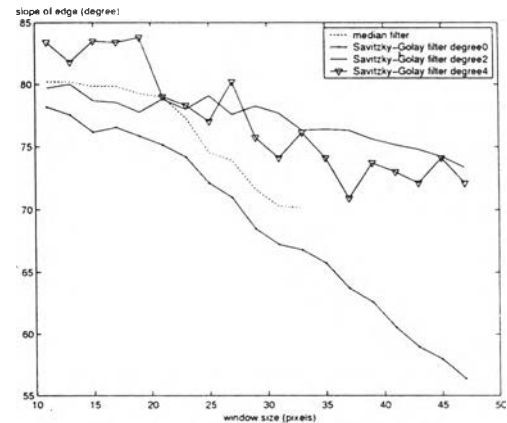


(ง) ความชันเริ่มต้นเท่ากับ 65

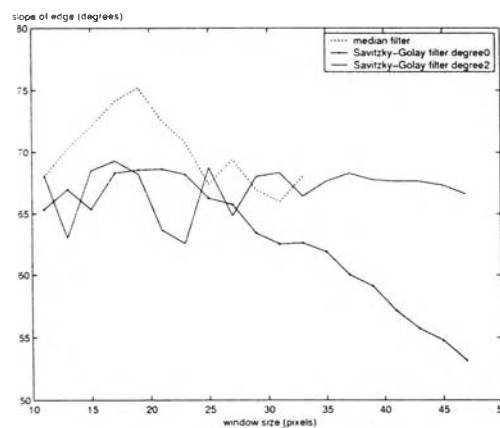
รูปที่ 2.14: ค่าความชันเส้นขอบเมื่อใช้วงจรรองแต่ละชนิดกับภาพที่มีความชันเส้นขอบต่าง ๆ กันขณะที่ยังไม่มีสัญญาณรบกวน



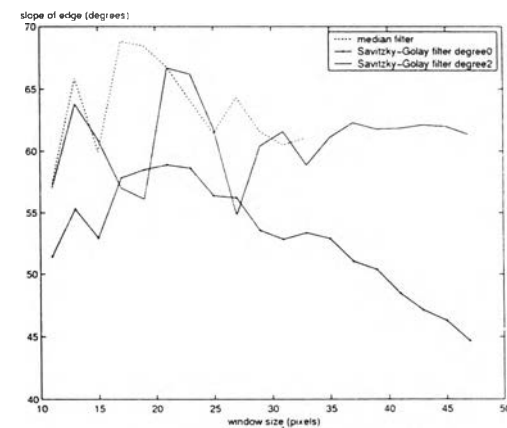
(ก) ความชันเริ่มต้นเท่ากับ 89.5



(ข) ความชันเริ่มต้นเท่ากับ 80

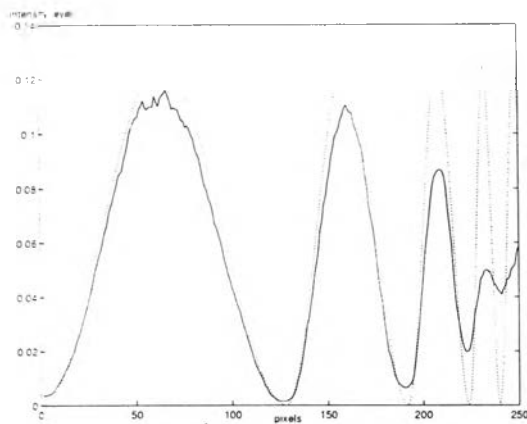


(ค) ความชันเริ่มต้นเท่ากับ 70

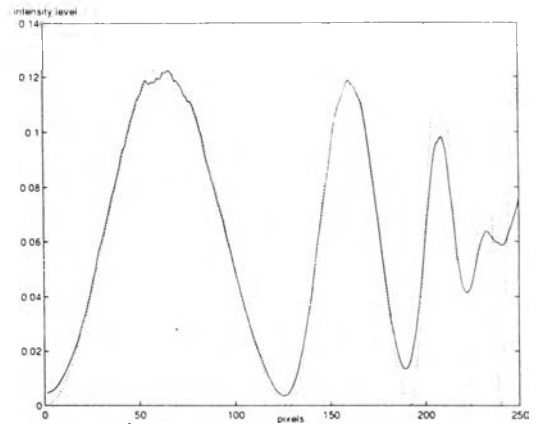


(ง) ความชันเริ่มต้นเท่ากับ 65

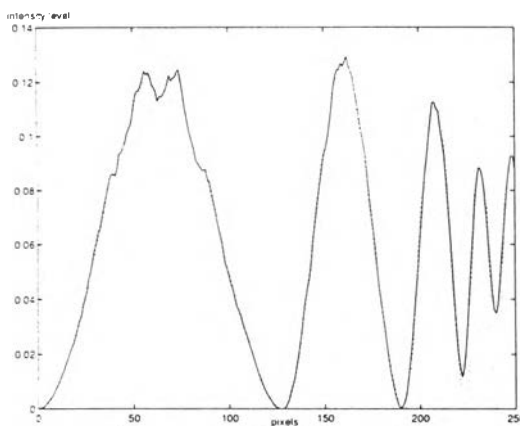
รูปที่ 2.15: ค่าความชันเส้นขอบเมื่อใช้วงจรรองแต่ละชนิดกับภาพที่มีความชันเส้นขอบต่าง ๆ กันเมื่อมีสัญญาณรบกวนแบบเรย์ลีขนาด $\rho = 0.1$



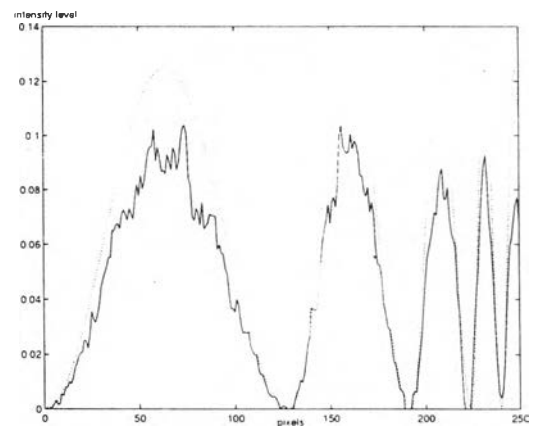
(ก) เมื่อใช้วงจรงกรอมัธยฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรงกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์



(ค) เมื่อใช้วงจรงกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง



(ง) เมื่อใช้วงจรงกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

รูปที่ 2.16: ตัวอย่างความเข้มของรูปที่ 2.4 (ข) หลังจากผ่านวงจรงกรองแต่ละชนิดเมื่อใช้หน้าต่างเท่ากับ 25x25 พิกเซล

ในรูปที่ 2.16 เป็นตัวอย่างค่าความเข้มจากรูปที่ 2.4 (ข) ที่ผ่านวงจรงกรองชนิดต่าง ๆ เมื่อใช้ขนาดหน้าต่างเท่ากัน ในรูปจะเห็นการลดค่ายอดของความเข้ม เมื่อใช้วงจรงกรองมัธยฐานและวงจรงกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์อย่างชัดเจน ส่วนวงจรงกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่ คงค่ายอดของความเข้มไว้ได้มากกว่าวงจรงกรองชนิดอื่น แต่ความเข้มที่ได้ยังมีผลจากสัญญาณรบกวนอยู่มาก

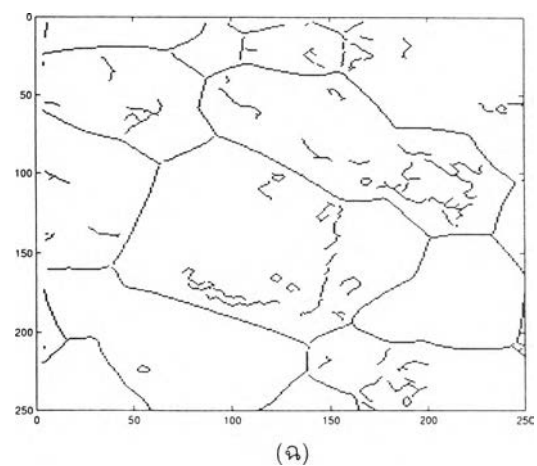
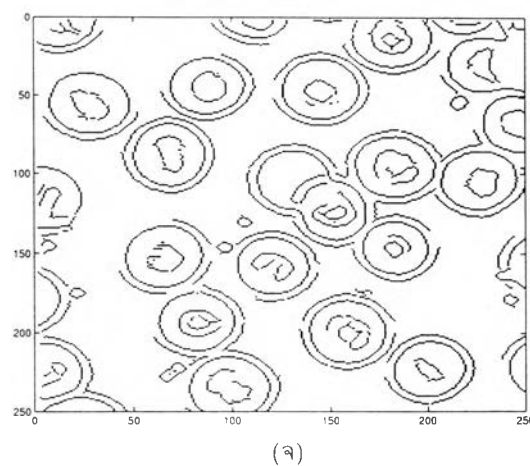
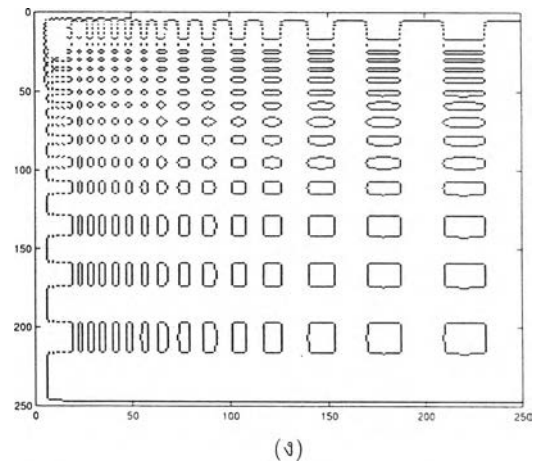
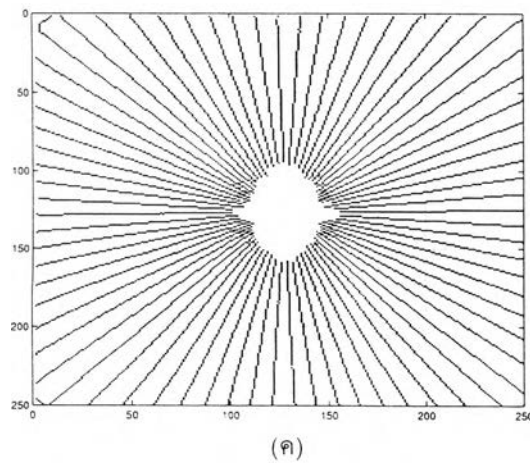
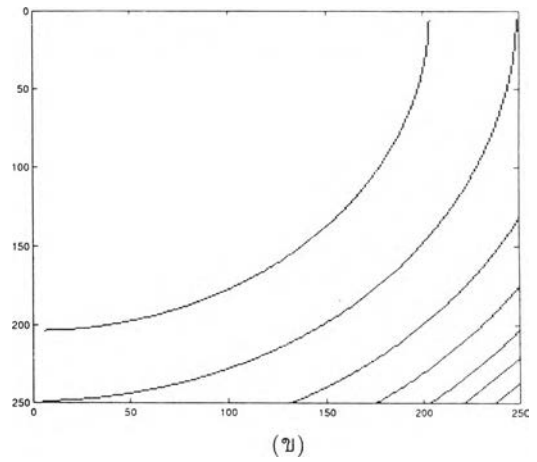
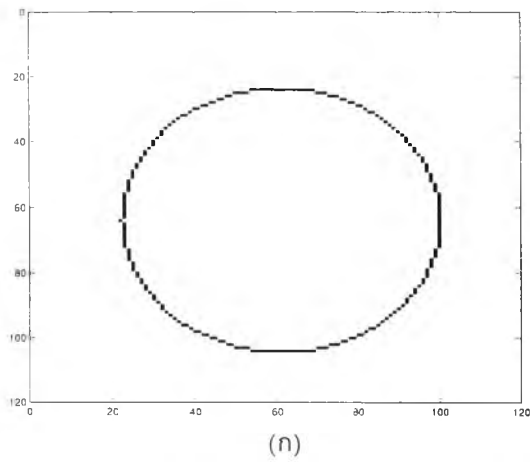
2.4.3 เมื่อใช้วงจรรองร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้

2.4.3.1 กรณีเปรียบเทียบตามขนาดหน้าต่าง

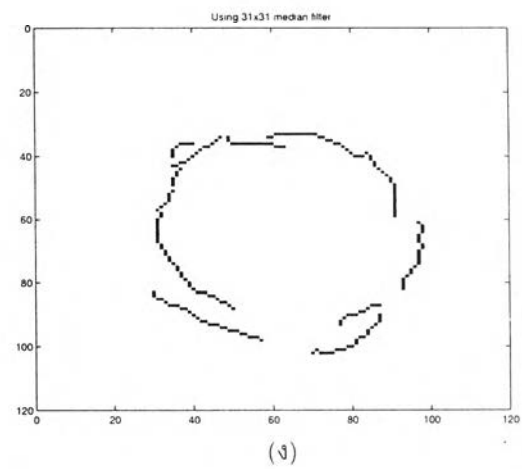
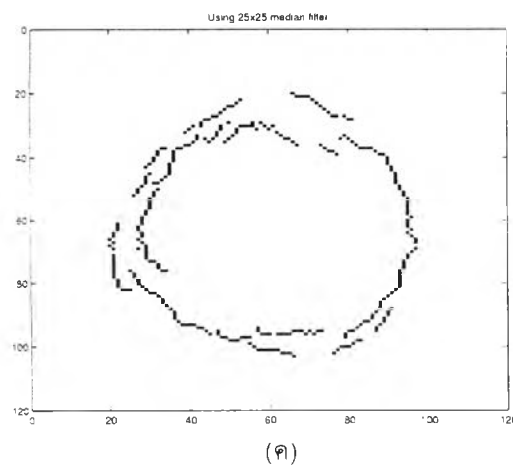
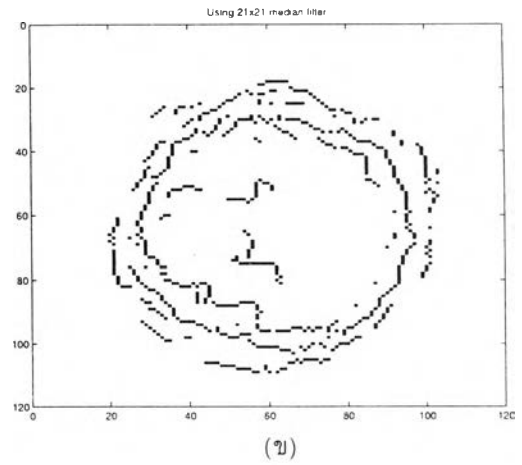
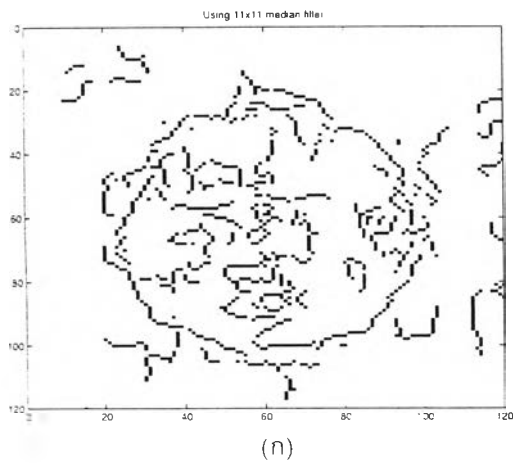
หลังจากนำรูปที่ 2.4 (ก) ที่ผ่านวงจรรองมัธยฐานขนาด $x11$, $x21$, $x25$ และ $x32$ พิกเซล มาคำนวณเส้นขอบด้วยวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้จะได้ตามรูปที่ 2.18 ซึ่งแสดงแนวโน้มการคงสภาพขอบของวงจรรองได้ชัดเจน ที่ขนาดหน้าต่างที่ใหญ่ขึ้น เส้นขอบที่ได้ชัดเจนขึ้น ต่อเนื่องขึ้นและมีสัญญาณรบกวนลดลง (แม้ว่าการปรับค่าจุดเปลี่ยนของวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้มีผลต่อจำนวนเส้นขอบที่ได้อยู่บ้าง แต่ได้เลือกใช้ค่าจุดเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุดคือให้เส้นขอบที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละขนาดหน้าต่าง) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นขอบจริงในรูปที่ 2.18 เส้นขอบที่ได้นั้นบิดเบือนไปทั้งตำแหน่งและรูปร่าง อันมีสาเหตุจากวงจรรองนั้นทำให้เกิดการมัวของขอบพร้อมๆ กับการมีสัญญาณรบกวนที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มสูงกว่าบริเวณที่เป็นขอบจริง ดังนั้นวงจรตรวจจับเส้นขอบจึงตรวจจับสัญญาณรบกวนดังกล่าวได้แทน รูปร่างของเส้นขอบที่ได้เมื่อขนาดหน้าต่างใหญ่ขึ้นมีแนวโน้มผิดพลาดมากขึ้นเรื่อยๆ เพราะขอบที่มัวมากขึ้น เป็นการสนับสนุนการวิเคราะห์ผลดังกล่าว

เมื่อพิจารณาเส้นขอบที่คำนวณได้จากรูปที่ 2.4 (ก) ซึ่งผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติอันดับต่างๆ ที่ขนาด $x11$, $x21$, $x25$, $x31$, $x41$ และ $x47$ พิกเซล พบว่าภาพจากวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ มีแนวโน้มที่คล้ายกับวงจรรองมัธยฐานคือ ที่ขนาดหน้าต่างใหญ่ขึ้นเส้นขอบจากสัญญาณรบกวนมีน้อยลง แต่เกิดการบิดเบือนตำแหน่งของเส้นขอบมากขึ้น อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบที่ขนาดหน้าต่างเท่ากัน ตำแหน่งของเส้นขอบของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ จะใกล้เคียงกับขอบจริงมากกว่าของวงจรรองมัธยฐาน ส่วนที่ขนาดหน้าต่างใหญ่มากเส้นขอบที่ตรวจจับได้มีน้อยลง อันเป็นผลจากการมัวของขอบของวงจรรอง

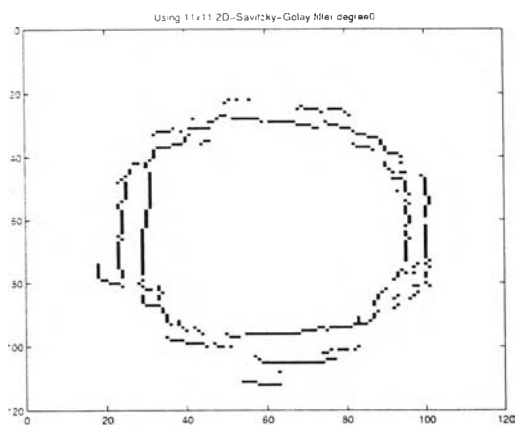
ส่วนวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองและสี่นั้น แม้ว่าจะเลือกค่าจุดเปลี่ยนของวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้ให้ดีเพียงใดก็ยังปรากฏเส้นขอบที่ได้ไม่ต่อเนื่อง และเส้นขอบเล็กๆ กระจัดกระจายจากสัญญาณรบกวนอยู่ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.20 และ 2.21 แต่วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองนั้น ให้แนวเส้นขอบที่ใกล้เคียงกับเส้นขอบจริงมากกว่าทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์ด้วยกันเองหรือกับวงจรรองมัธยฐาน การคงแนวเส้นขอบไว้ได้นั้น แม้ว่าจะไม่ต่อเนื่อง แต่ก็มีประโยชน์ต่อการคำนวณเส้นขอบมากกว่าการมีเส้นขอบที่ต่อเนื่องแต่ตำแหน่งและรูปร่างผิดไป การปรับปรุงให้ได้เส้นขอบที่เรียบและต่อเนื่องขึ้นทำได้โดยการเพิ่มขนาดหน้าต่างของวงจรรอง นอกจากนี้ที่ขนาดหน้าต่างใหญ่มากวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองก็ยังให้ตำแหน่งเส้นขอบใกล้เคียงกับขอบจริง



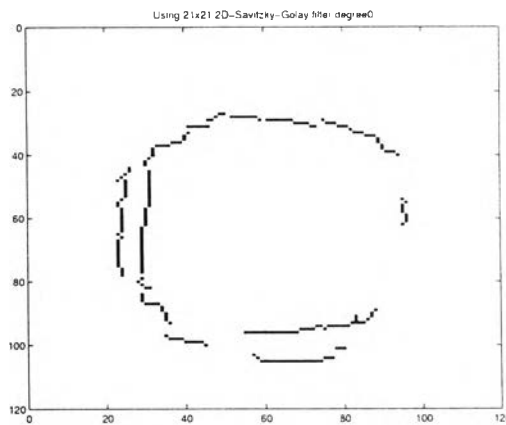
รูปที่ 2.17: เส้นขอบของภาพทดสอบที่คำนวณได้จากวงจรถ่วงจับเส้นขอบแค่นี้



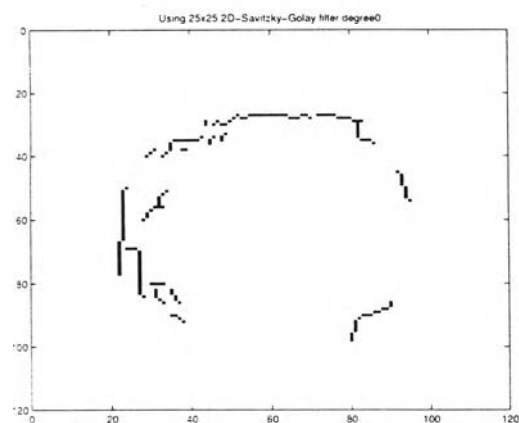
รูปที่ 2.18: เส้นขอบที่คำนวณได้จากรูปที่ 2.4 (ก) ที่ผ่านวงจรกรองมัธยฐานเมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้



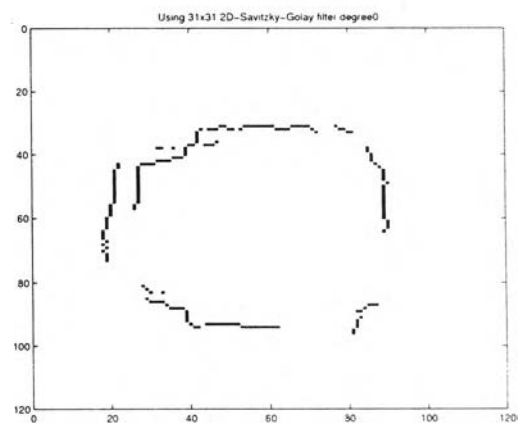
(ก)



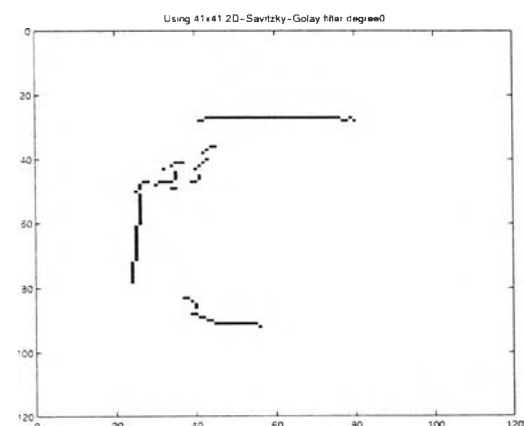
(ข)



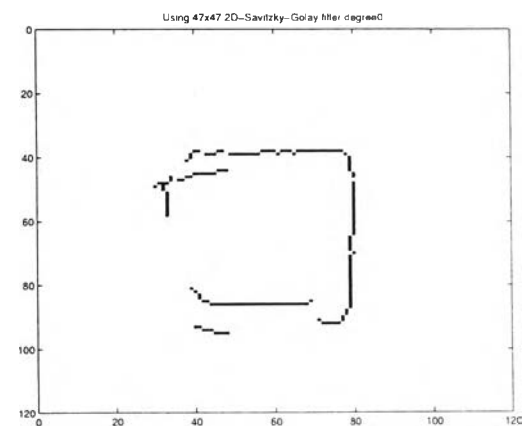
(ค)



(ง)

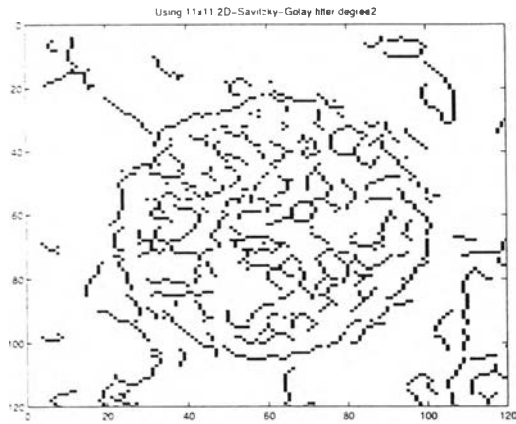


(จ)

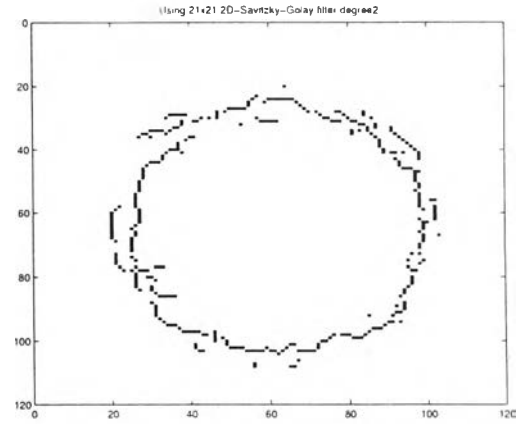


(ฉ)

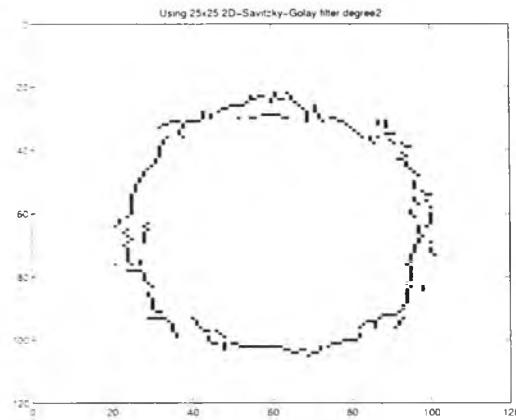
รูปที่ 2.19: เส้นขอบที่คำนวณได้จากรูปที่ 2.4 (ก) ที่ผ่านวงจรรองซาวิตซ์กี-โกเลย์อันดับศูนย์



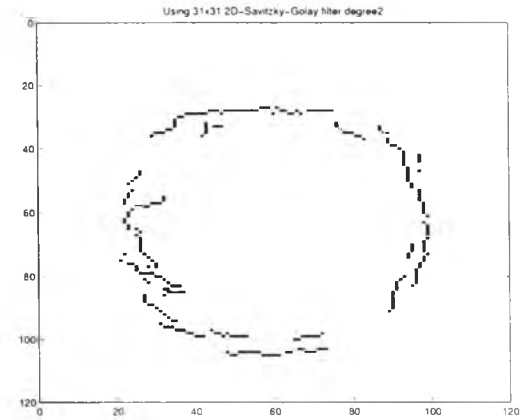
(ก)



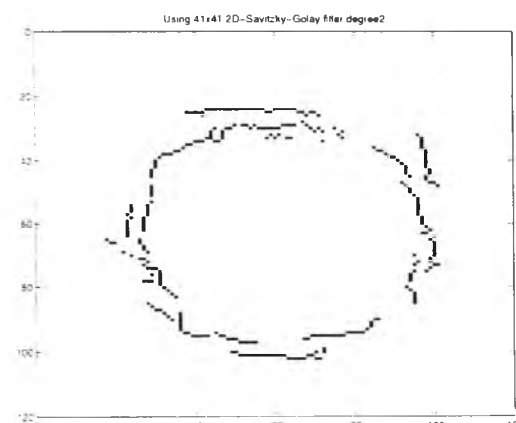
(ข)



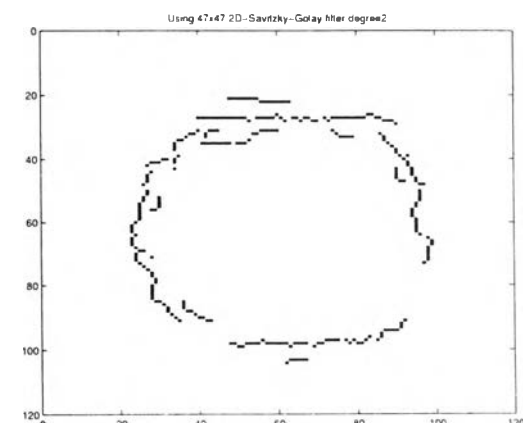
(ค)



(ง)

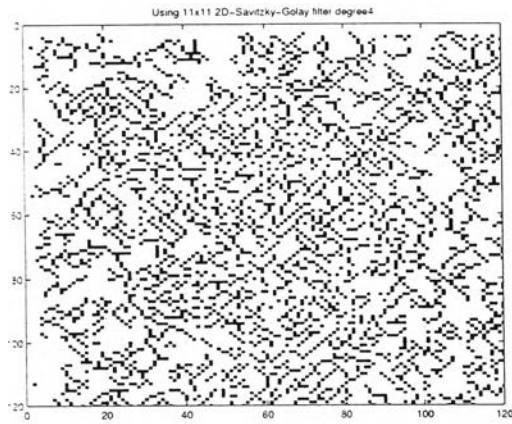


(จ)

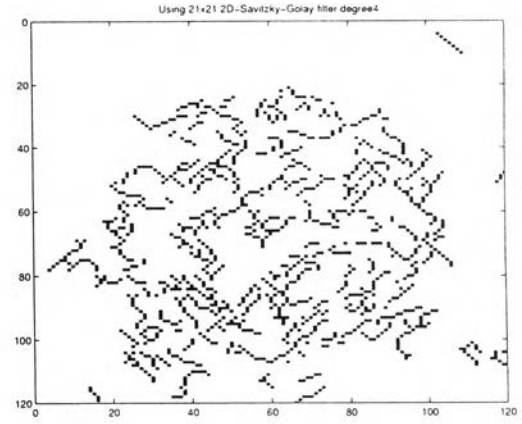


(ฉ)

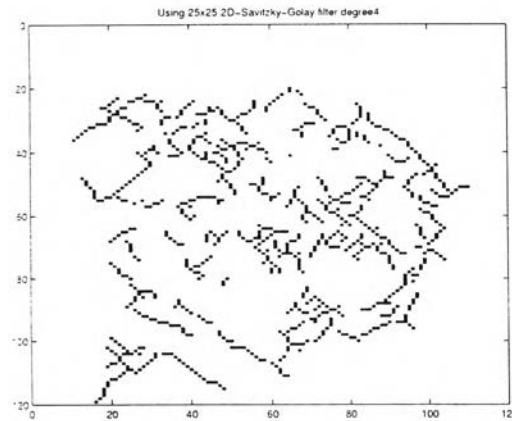
รูปที่ 2.20: เส้นขอบที่คำนวณได้จากรูปที่ 2.4 (ก) ที่ผ่านวงจรรองซาวิตซ์กี-โกเลย์อันดับสอง



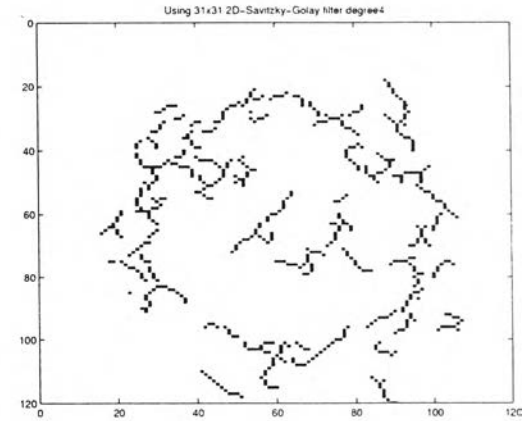
(ก)



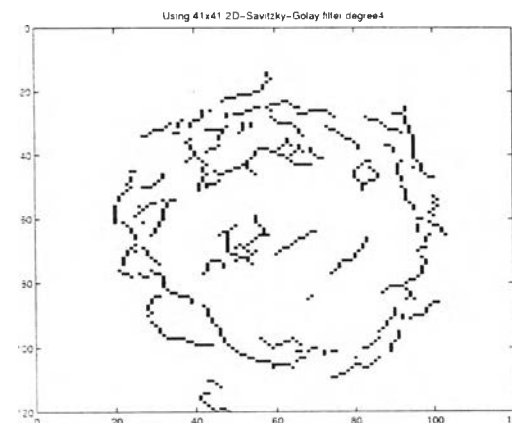
(ข)



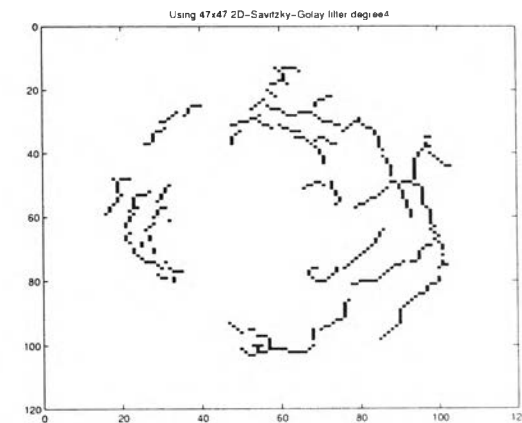
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 2.21: เส้นขอบที่คำนวณได้จากรูปที่ 2.4 (ก) ที่ผ่านวงจรรองซาวิตซ์กี-โกเลย์อันดับสี่

ซึ่งผิดกับวงจรรองมัลติฐานและวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ ประโยชน์จากคุณสมบัติดังกล่าวก็คือ สามารถให้ช่วงขนาดหน้าต่างที่ใช้งานได้กว้าง จึงนำไปใช้งานได้สะดวก

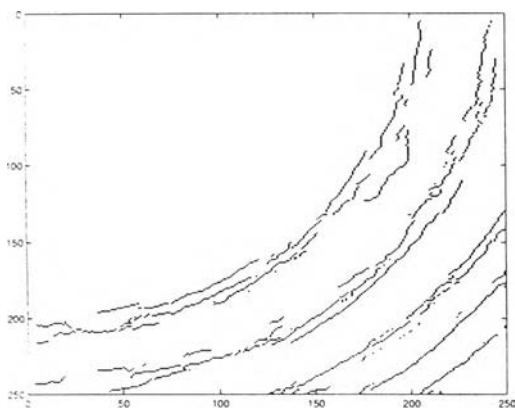
ดังนั้นสำหรับการเปรียบเทียบเส้นขอบที่ได้ตามขนาดหน้าต่าง สรุปลงได้ว่าวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับต่ำและวงจรรองมัลติฐาน มีแนวโน้มที่จะบิดเบือนตำแหน่งเส้นขอบเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดหน้าต่าง ในขณะที่วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสูงมีผลจากสัญญาณรบกวนอยู่มาก การเลือกใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับกลางๆ เช่น อันดับสองนั้นจะให้เส้นขอบที่ดีที่สุดในแง่ตำแหน่งเส้นขอบ

2.4.3.2 กรณีเปรียบเทียบตามลักษณะภาพต่าง ๆ

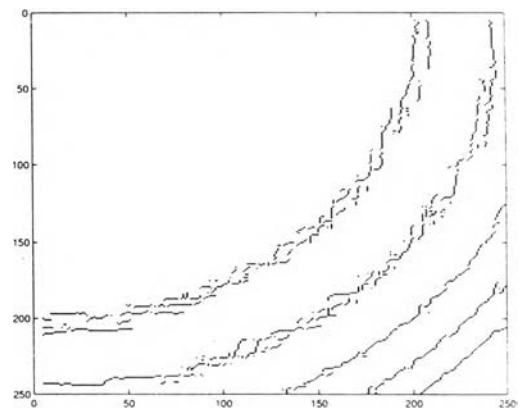
เมื่อเปรียบเทียบการใช้วงจรรองกับภาพลักษณะต่างๆ (ที่มีสัญญาณรบกวน) ด้วยเส้นขอบที่คำนวณจากวงจรรองจับเส้นขอบแค่นี้เหมือนกัน พบว่าที่ขนาดหน้าต่างเดียวกัน:

สำหรับภาพที่สร้างจากสมการคณิตศาสตร์ ถ้าเปรียบเทียบภาพที่มีความชันเส้นขอบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในรูปที่ 2.22 ที่ความชันมากๆ และระยะห่างเส้นขอบน้อยๆ นั้นวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ และวงจรรองมัลติฐานไม่สามารถตรวจจับเส้นขอบได้ เพราะโครงสร้างของวงจรรองนั้นได้ทำให้ความชันของขอบลดลงเกินกว่าจะตรวจจับได้ด้วยวงจรรองจับเส้นขอบแค่นี้ แต่การใช้ค่ามัลติฐานของวงจรรองมัลติฐานและโครงสร้างเชิงเส้นของวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ ก็ทำให้ได้เส้นขอบที่เรียบกว่าวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสูงขึ้น ที่ความชันต่ำมากเส้นขอบที่ได้จากแต่ละวงจรรองจะปรากฏสัญญาณรบกวนมากกว่าความชันสูง

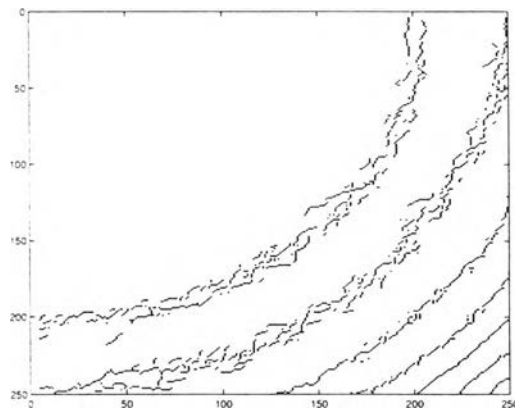
ถ้าเปรียบเทียบความชันเส้นขอบใกล้เคียงกัน แต่มีระยะห่างระหว่างเส้นขอบน้อยลงเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2.23 การตรวจจับเส้นขอบในภาพจากวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ จะทำได้ถึงเมื่อระยะห่างเส้นขอบมากกว่า หรือเท่ากับขนาดหน้าต่างของวงจรรองเท่านั้น ขณะที่วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองและสี่ ยังใช้งานได้เมื่อระยะห่างเส้นขอบน้อยกว่าขนาดหน้าต่างของวงจรรอง ซึ่งอธิบายได้ด้วยโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นแตกต่างกันของวงจรรองทั้งสามชนิด ส่วนเส้นขอบจากภาพที่ผ่านวงจรรองมัลติฐานในรูปที่ 2.23 (ก) มีช่วงการทำงานใกล้เคียงกับวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ แต่ทั้งนี้การใช้ค่ามัลติฐานนั้นจะทำให้เกิดโครงสร้างไม่เชิงเส้น ที่ขึ้นกับข้อมูลซึ่งรวมเอาสัญญาณรบกวนไว้ด้วย ดังนั้นช่วงของระยะเส้นขอบที่วงจรรองมัลติฐานยังทำงานได้ดี อาจแปรเปลี่ยนไปตามข้อมูลก่อนเข้าวงจรรอง จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของวงจรรองมัลติฐานนั้นดีกว่า หรือดีกว่าวงจรรองอื่นๆ เพราะขึ้นกับภาพที่จะนำไปใช้



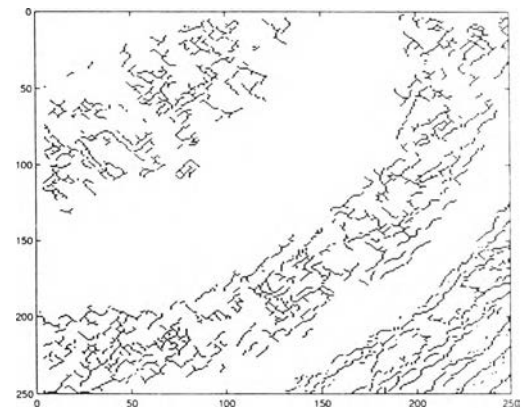
(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัยฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์

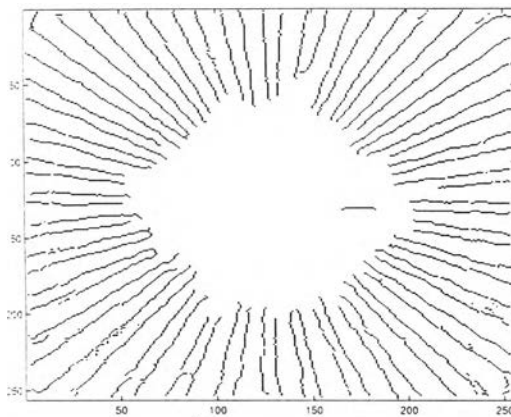


(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

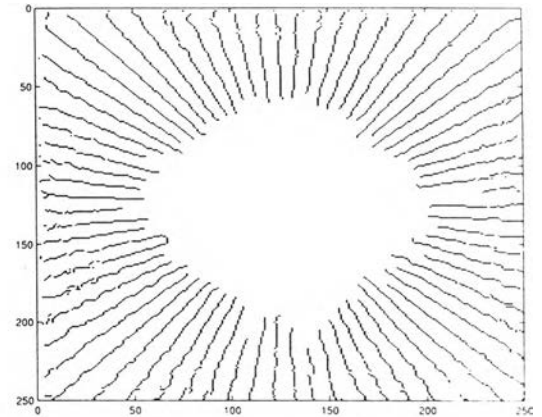


(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

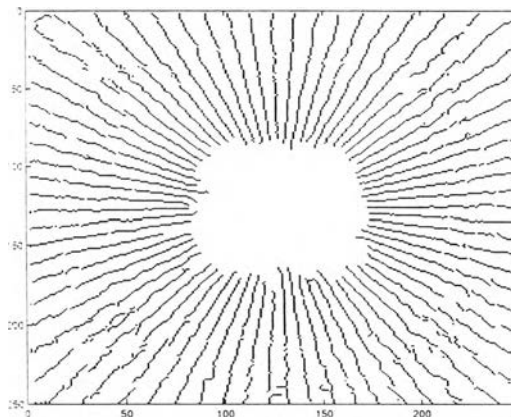
รูปที่ 2.22: เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรถวายจับเส้นขอบแค่นี้กับรูปที่ 2.4 (ข) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดขนาด 25x25 พิกเซล



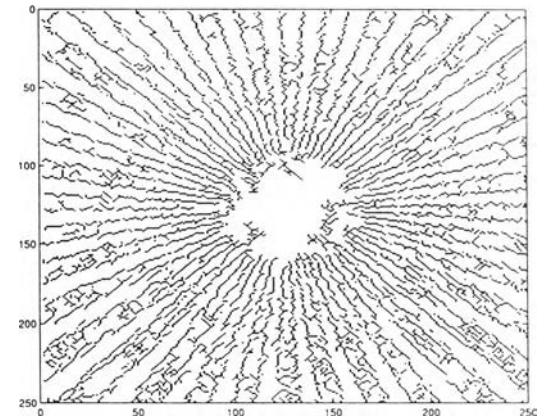
(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัลฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์

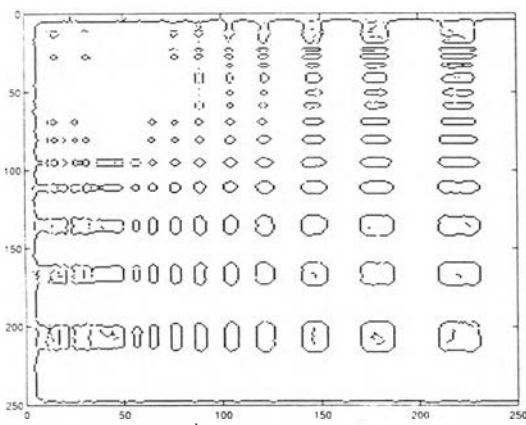


(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

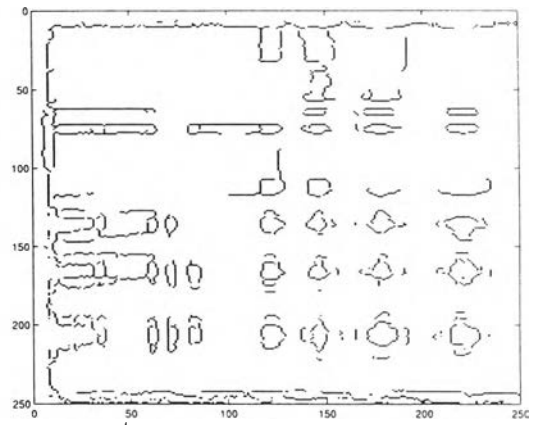


(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

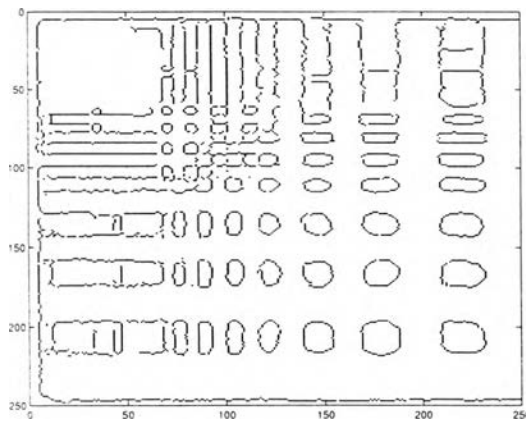
รูปที่ 2.23: เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรรววจับเส้นขอบแค่นี้กับรูปที่ 2.4 (ค) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดขนาด 11x11 พิกเซล



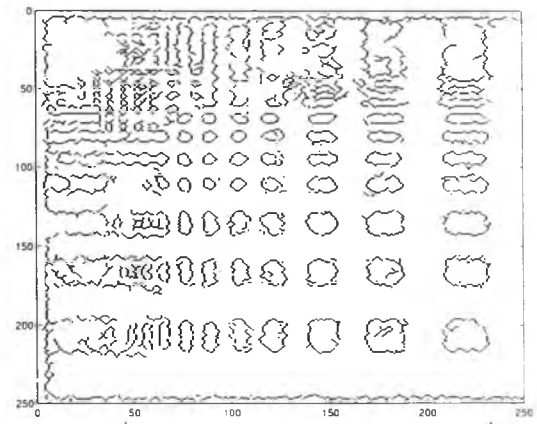
(ก) เมื่อใช้วงจรงกรองมัลติฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรงกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์

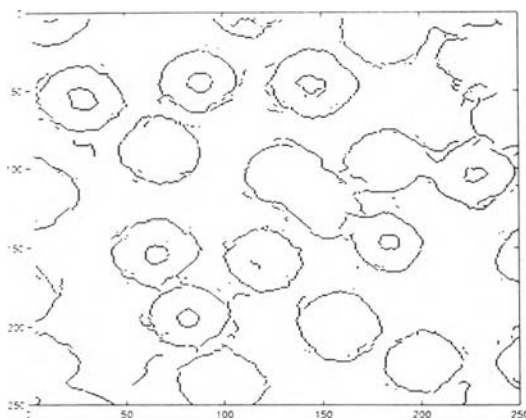


(ค) เมื่อใช้วงจรงกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

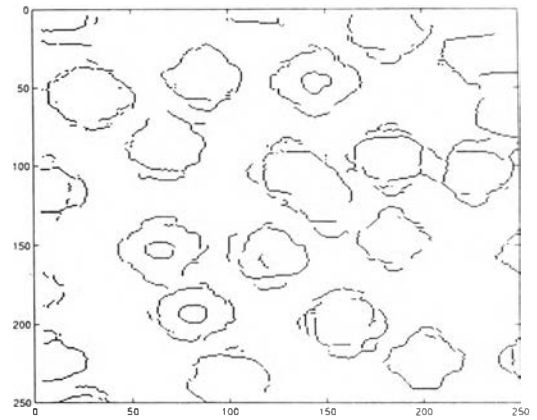


(ง) เมื่อใช้วงจรงกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

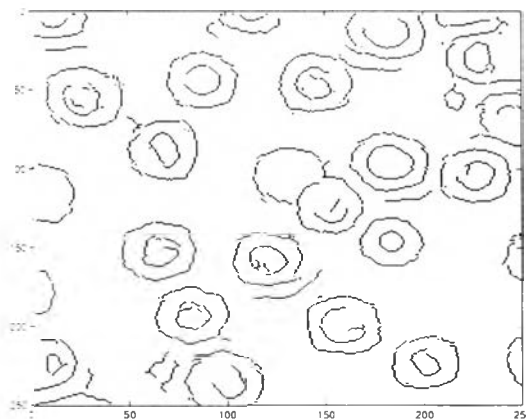
รูปที่ 2.24: เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้กับรูปที่ 2.4 (ง) หลังจากผ่านวงจรงกรองแต่ละชนิดขนาด 15x15 พิกเซล



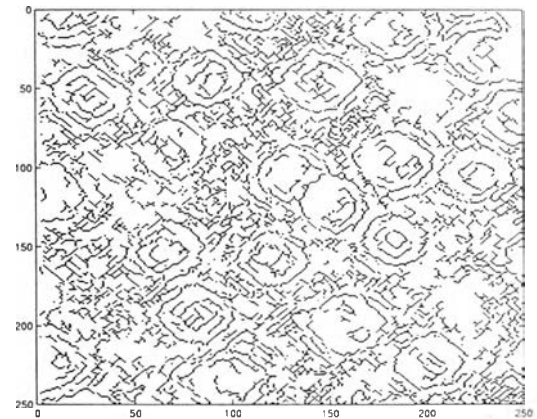
(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัลติฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์

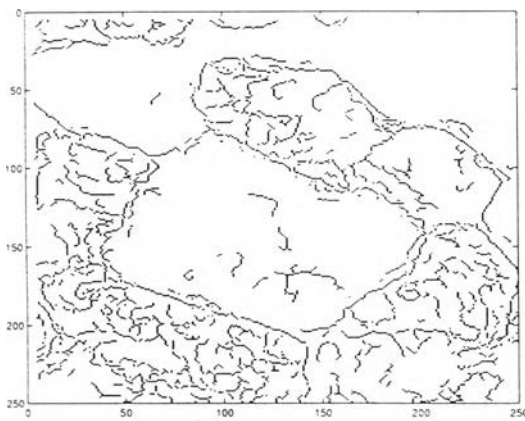


(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

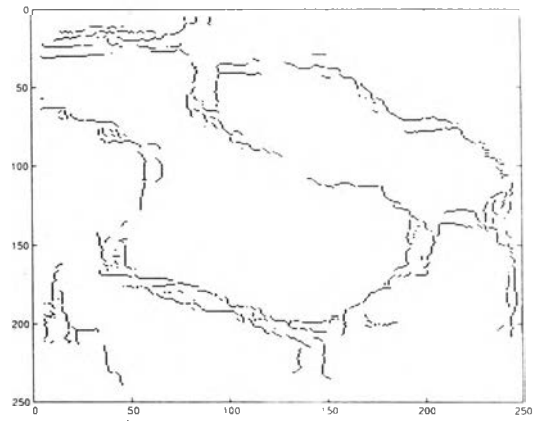


(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

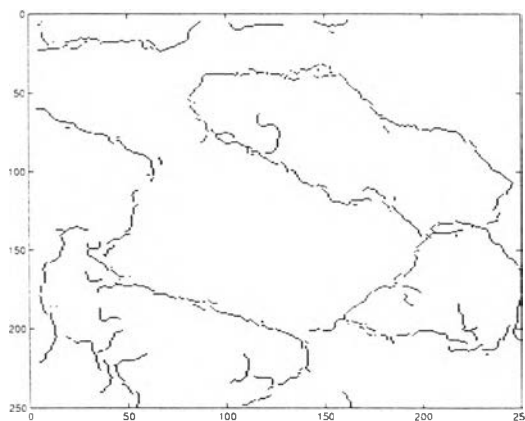
รูปที่ 2.25: เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้กับรูปที่ 2.4 (จ) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดขนาด 15x15 พิกเซล



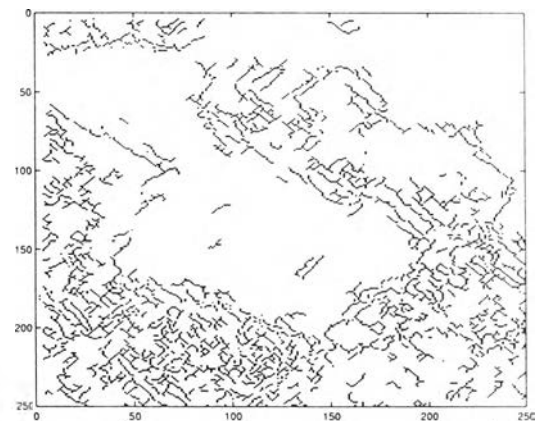
(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัยฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวาสดี-โกเล่ย์อันดับศูนย์



(ค) เมื่อใช้วงจรรองซาวาสดี-โกเล่ย์อันดับสอง



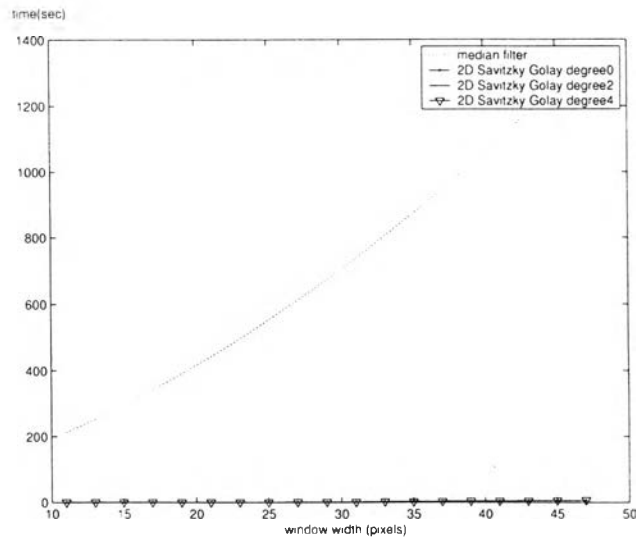
(ง) เมื่อใช้วงจรรองซาวาสดี-โกเล่ย์อันดับสี่

รูปที่ 2.26: เส้นขอบที่ได้เมื่อใช้วงจรถรวจจับเส้นขอบแค่นี้กับรูปที่ 2.4 (ฉ) หลังจากผ่านวงจรรองแต่ละชนิดขนาด 23x23 พิกเซล

สำหรับขอบภาพที่เป็นเหลี่ยมมุม (รูปที่ 2.24) วงจรกรองมัธยฐานสามารถคงสภาพเหลี่ยมมุมไว้ได้มากที่สุด รองลงมาคือวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองและศูนย์ ตามลำดับ ส่วนเส้นขอบที่ได้จากภาพหลังจากผ่านวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่นั้น ไม่ต่อเนื่องและเต็มไปด้วยรอยหยักจนไม่สามารถสรุปได้ว่า มีความสามารถในการคงสภาพเหลี่ยมมุมได้ดีเพียงใด ทั้งนี้ภาพนี้ได้แสดงถึงจุดด้อยประการหนึ่งของการใช้ระนาบพหุนามลดทอนสัญญาณรบกวนที่ไม่สามารถจำลองความเป็นเหลี่ยมมุมซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มอย่างกะทันหันได้ ไม่ว่าจะใช้ระนาบพหุนามอันดับใดก็ตาม ดังนั้นเหลี่ยมมุมต่างๆ ในภาพจึงโค้งมนไป อย่างไรก็ดี จุดด้อยดังกล่าวไม่น่ามีผลต่อการประยุกต์ใช้กับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์ เพราะในภาพไม่มีความเป็นเหลี่ยมมุมปรากฏให้เห็น

สำหรับภาพเม็ดเลือดแดงและภาพเกรนอะลูมิเนียม (รูปที่ 2.25 และ 2.26) เส้นขอบที่ได้ใกล้เคียงกับเส้นขอบจริงมากที่สุดทั้งในด้านรูปร่างและตำแหน่งเรียงตามลำดับ ได้แก่วงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง วงจรกรองมัธยฐาน และวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ โดยวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองจะเก็บรายละเอียดต่างๆ ได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรกรองชนิดอื่น ซึ่งตรงกับผลของการทดสอบในหัวข้อที่ 2.4.2 แต่วงจรกรองมัธยฐานให้เส้นขอบที่ต่อเนื่องมากที่สุด การต่อเนื่องของขอบมีสาเหตุมาจากความเรียบของข้อมูลที่ทำให้ขนาดเกรเดียนต์ของความเข้มมีค่าสม่ำเสมอ เมื่อตัดสินด้วยค่าระดับของวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้จึงได้เป็นเส้นที่ต่อเนื่อง ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบกับตัวอย่างความเข้มในรูปที่ 2.7 วงจรกรองมัธยฐานให้ความเข้มที่เรียบมาก จึงได้เส้นขอบที่ต่อเนื่องกว่าวงจรกรองที่นำมาเปรียบเทียบชนิดอื่นถ้าใช้งานร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้ แต่ในทางกลับกันความเข้มก็ถูกลดทอนไปมาก ทำให้ต้องใช้ค่าระดับของวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้ต่ำลงเพื่อให้ตรวจจับเส้นขอบที่ต้องการได้ ซึ่งทำให้การคำนวณเส้นขอบไวต่อสัญญาณรบกวนขึ้น เกิดเป็นเส้นขอบส่วนเกินมากมายดังรูปที่ 2.25 (ก) และ 2.26 (ก) ในขณะที่วงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองให้ข้อมูลที่ไม่เรียบเท่าวงจรกรองมัธยฐาน ค่าเกรเดียนต์จึงไม่สม่ำเสมอ และเกิดเป็นเส้นขอบที่ขาดตอน ส่วนวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์นั้นแม้ว่าจะให้ความเข้มที่เรียบเช่นเดียวกับวงจรกรองมัธยฐาน แต่เส้นขอบที่ได้ไม่ต่อเนื่องเหมือนกับวงจรกรองมัธยฐาน เพราะการเฉลี่ยข้อมูลทำให้ขอบมัวมากกว่า การตั้งค่าระดับของวงจรตรวจจับเส้นขอบยิ่งต่ำลงอีก จะทำให้ไวต่อสัญญาณรบกวนมากขึ้น ซึ่งบางครั้งการเปลี่ยนแปลงความเข้มเนื่องจากสัญญาณรบกวนมีค่ามากกว่าที่ขอบจริง วงจรตรวจจับเส้นขอบจึงตรวจจับสัญญาณรบกวนได้แทน และปรากฏให้เห็นเป็นเส้นขอบที่ไม่ต่อเนื่อง สำหรับเส้นขอบจากภาพที่ผ่านวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่นั้น เป็นเส้นขอบที่ไม่ต้องการมากมาย และแม้ว่าจะเพิ่มค่าระดับเพื่อลดผลจากสัญญาณรบกวนดังกล่าว ก็ไม่ได้ทำให้เส้นขอบจริงปรากฏขึ้นมาแต่อย่างใด

2.4.4 เวลาที่ใช้ในการคำนวณ

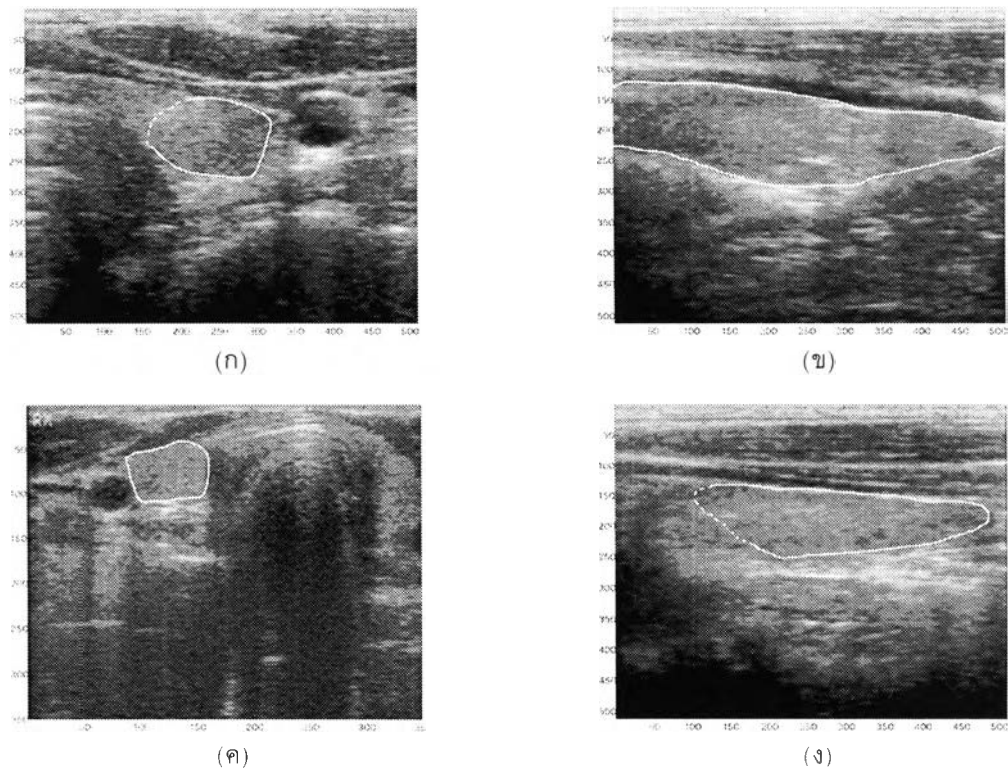


รูปที่ 2.27: เวลาที่ใช้ในการคำนวณของวงจรรองแต่ละชนิดตามขนาดหน้าต่าง

รูปข้างต้นเป็นเวลาที่วงจรรองแต่ละชนิดใช้ในการประมวลผลภาพขนาด 256x256 พิกเซล ซึ่งแสดงชัดเจนว่า วงจรรองมัธยฐานใช้เวลาในการคำนวณนานมาก เมื่อเทียบกับวงจรรองซาวิตซกี-โกเลย์ เวลาดังกล่าวเป็นฟังก์ชัน $MN \log_2 MN$ กับจำนวนพิกเซลในหน้าต่าง $(2M + 1)(2N + 1)$ ในขณะที่เวลาที่วงจรรองซาวิตซกี-โกเลย์ใช้นั้น เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นจำนวนพิกเซลในหน้าต่าง เวลาดังกล่าวจะมีนัยสำคัญต่อการใช้ในระบบติดตามเส้นขอบ เมื่อต้องใช้วงจรรองขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้ได้เส้นขอบที่เรียบและต่อเนื่องขึ้น

จากภาพเส้นขอบที่ได้เปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการคำนวณ วงจรรองซาวิตซกี-โกเลย์อันดับสอง มีผลการทดสอบที่จูงใจให้ใช้กับการคำนวณเส้นขอบของต่อมไทรอยด์ ในภาพอัลตราซาวนด์แท่งวงจรรองมัธยฐานมากที่สุด ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะทดลองใช้วงจรรองซาวิตซกี-โกเลย์อันดับสองกับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์ เปรียบเทียบกับวงจรรองมัธยฐาน

2.5 ผลการทดสอบกับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์



รูปที่ 2.28: ภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์ เส้นสีขาวซึ่งลากโดยผู้เชี่ยวชาญแสดงตำแหน่งของต่อมไทรอยด์

วิธีทดสอบการใช้งานของวงจรถองกับภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์นั้น จะทดสอบกับภาพทั้งสิ้น 4 ภาพ ตามรูปที่ 2.28 ตำแหน่งเส้นขอบของต่อมไทรอยด์ในแต่ละภาพได้แสดงไว้เป็นสีขาว ส่วนที่เป็นเส้นประนั้นเป็นบริเวณที่ไม่มีข้อมูลจากภาพ แต่ใช้การตัดสินใจจากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ การทดสอบจะเริ่มจาก การพิจารณาประสิทธิภาพการลดทอนสัญญาณ เปรียบเทียบตามขนาดหน้าต่าง และเปรียบเทียบกันในหลายๆ ภาพ แต่ทั้งนี้ การวัดประสิทธิภาพการลดทอนสัญญาณรบกวนในภาพอัลตราซาวนด์ของไทรอยด์นั้น ไม่สามารถหาพารามิเตอร์มาวัดได้ จึงต้องใช้วิธีพิจารณาด้วยสายตาร่วมกับการเปรียบเทียบเส้นขอบที่ได้จากวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้แทน

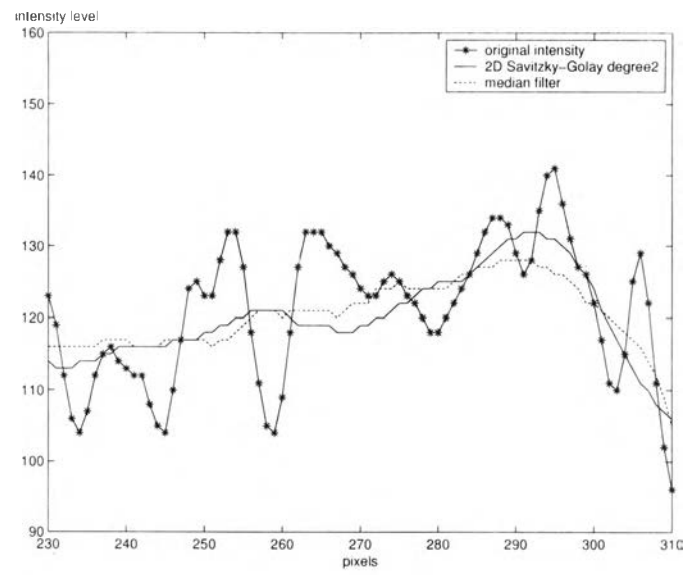
2.5.1 การลดทอนสัญญาณรบกวน

2.5.1.1 กรณีเปรียบเทียบตามขนาดหน้าต่าง

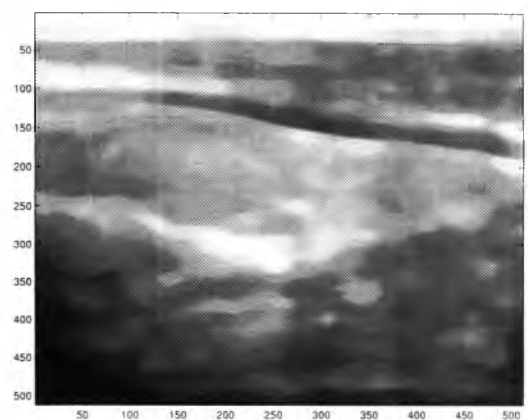
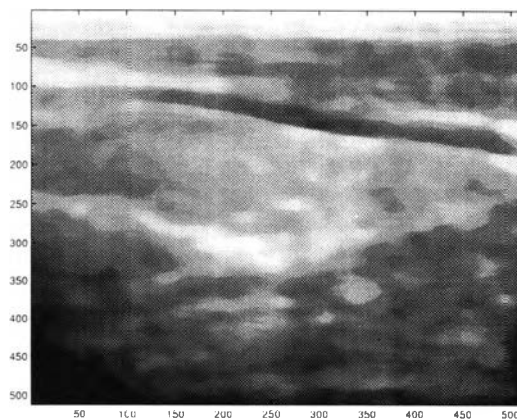
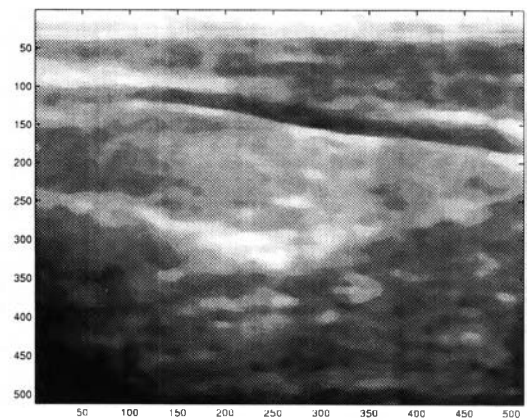
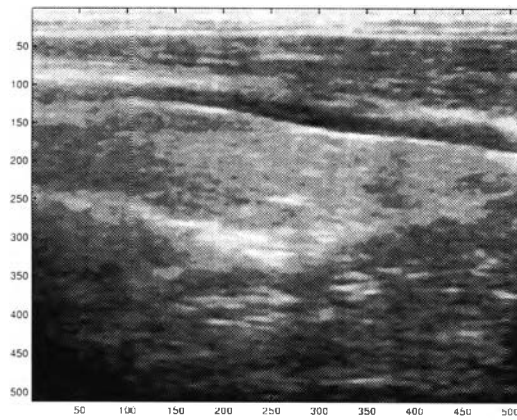
การลดทอนสัญญาณรบกวนดังกล่าว ต้องการให้ภาพเรียบที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้การคำนวณเส้นขอบเป็นไปโดยง่าย ไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้แพทย์ใช้ภาพดังกล่าวในการวินิจฉัย ดังนั้นภาพเมื่อผ่านวงจรกรองแล้วควรใกล้เคียงกับวงจรกรองมัลติฐานซึ่งมีส่วนที่เป็นเส้นขอบคมชัด (รูปที่ 2.30) ขณะที่ตรงที่ไม่ใช่เส้นขอบมีความเข้มเสมอกัน และเมื่อขนาดหน้าต่างใหญ่ขึ้น บริเวณดังกล่าวยังมีความเข้มที่สม่ำเสมอมากขึ้น และเห็นขอบคมขึ้นโดยเฉพาะที่เส้นขอบด้านบน อย่างไรก็ตามที่แนวเส้นขอบล่างที่โดดเด่นขึ้นมานั้น ไม่ใช่เส้นขอบไทรอยด์ที่แท้จริง ทั้งนี้เพราะขอบจริงมีความชันน้อยมาก และถูกลดทอนลงตามขนาดหน้าต่างที่เพิ่มขึ้นจนเกือบกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับบริเวณรอบด้าน ซึ่งอาจทำให้การตรวจจับเส้นขอบทำได้ลำบาก และอาจได้แนวเส้นที่ไม่ใช่ขอบจริงมาแทน ถ้าเปรียบเทียบกับวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง ที่แม้จะไม่ได้ให้ขอบคมชัดและความเข้มที่สม่ำเสมอในบริเวณที่เหลือได้เท่ากับวงจรกรองมัลติฐาน แต่สังเกตได้ว่าสัญญาณรบกวนแบบจุดถูกลดทอนไปมาก แสดงว่าวงจรกรองทำงานได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของการใช้วงจรกรองที่เราตั้งไว้ ส่วนความไม่สม่ำเสมอของความเข้มนั้นเป็นผลจากเงาและความมัวที่มีอยู่ในภาพเดิมด้วย นอกจากนี้ขอบด้านล่างยังคงพอมให้เห็นอยู่บ้าง ซึ่งอาจทำให้ตรวจจับได้ด้วยวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้ เมื่อขนาดหน้าต่างเพิ่มขึ้น ภาพที่ได้จากวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองมีตำแหน่งใกล้เคียงกับที่ขนาดหน้าต่างเล็ก ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งมีประโยชน์คือ ช่วงการทำงานของขนาดหน้าต่างกว้างมาก ทำให้สามารถเลือกใช้ขนาดหน้าต่างได้ง่ายขึ้น รูปที่ 2.29 เป็นตัวอย่างการมัวของเส้นขอบด้านล่าง โดยแสดงความเข้มที่ขอบด้านล่างของต่อมไทรอยด์ ของภาพที่ผ่านวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง และวงจรกรองมัลติฐานขนาด 4×4 พิกเซล (ที่พิกัด $n = 325$) ณ ตำแหน่งขอบที่ $m = 284$ สังเกตว่าวงจรกรองมัลติฐานทำให้ความชันของขอบลดลง จนเกือบเป็นเส้นราบ ขณะที่วงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองยังรักษาความชันของขอบไว้ได้ระดับหนึ่ง

สำหรับวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์หรือวงจรกรองเฉลี่ยนั้น ให้ภาพที่เรียบขึ้นอย่างชัดเจนแต่ขอบถูกทำให้มัวไปมาก จนไม่สามารถระบุตำแหน่งขอบที่แท้จริงได้เมื่อขนาดหน้าต่างใหญ่มาก ในขณะที่การเพิ่มขนาดหน้าต่างของวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่ ทำให้เกิดลวดลายบางอย่างขึ้นในภาพที่ทำให้ภาพเพี้ยนไป

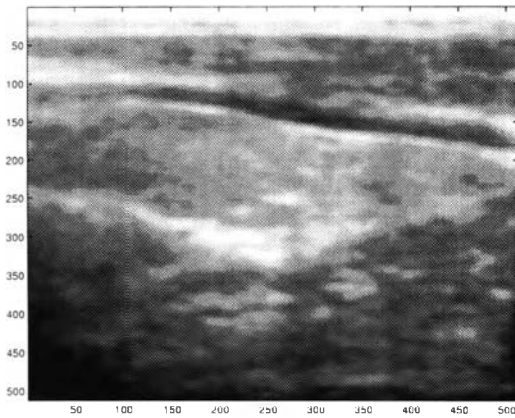
ดังนั้นด้วยผลที่พอจะเปรียบเทียบได้กับวงจรกรองมัลติฐาน วงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองจึงน่าจะเหมาะสำหรับการใช้กรองสัญญาณรบกวน แทนวงจรกรองมัลติฐานมากกว่าวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับอื่นๆ



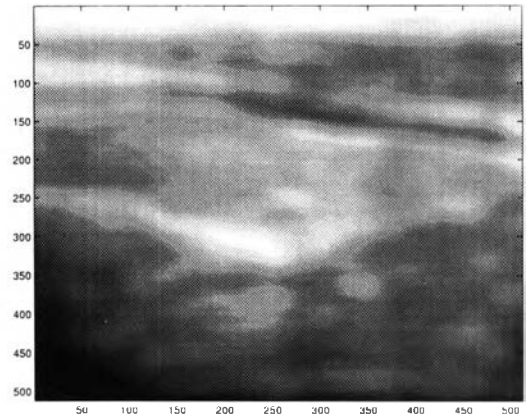
รูปที่ 2.29: ตัวอย่างความเข้มที่ขอบด้านล่างของต่อมไทรอยด์



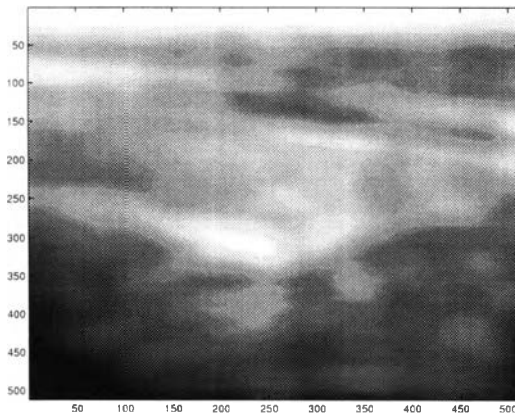
รูปที่ 2.30: ภาพต่อมไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรรองมัลติฐาน



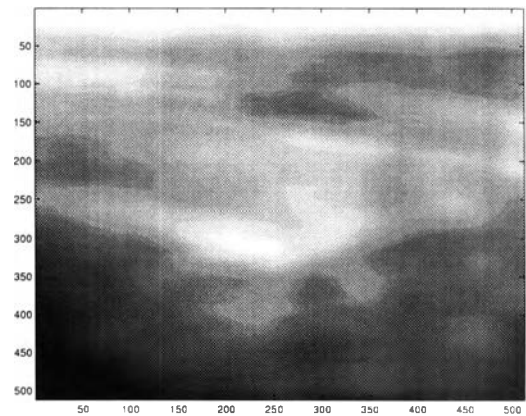
(ก) ขนาด x11 พิกเซล



(ข) ขนาด x23 พิกเซล

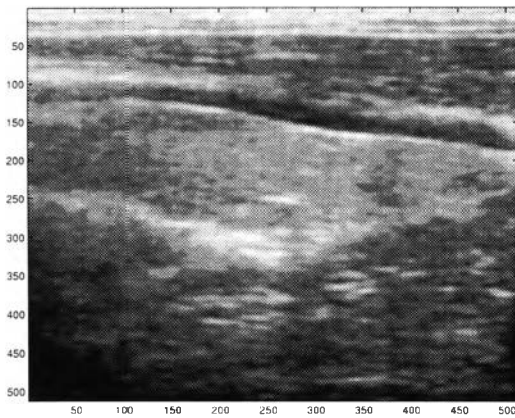


(ค) ขนาด x35 พิกเซล

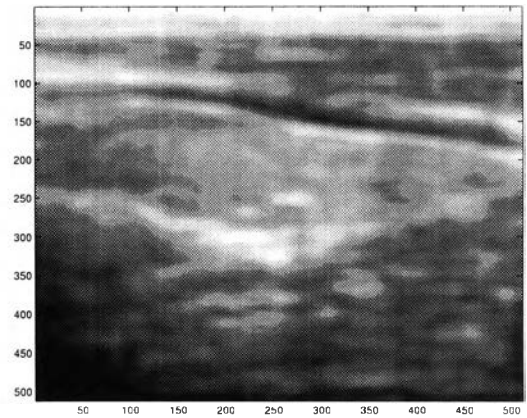


(ง) ขนาด x43 พิกเซล

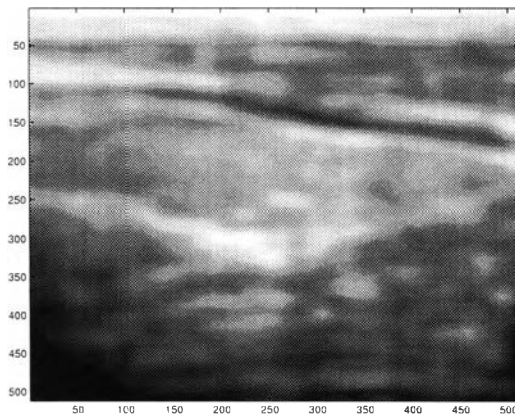
รูปที่ 2.31: ภาพต่อมไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์



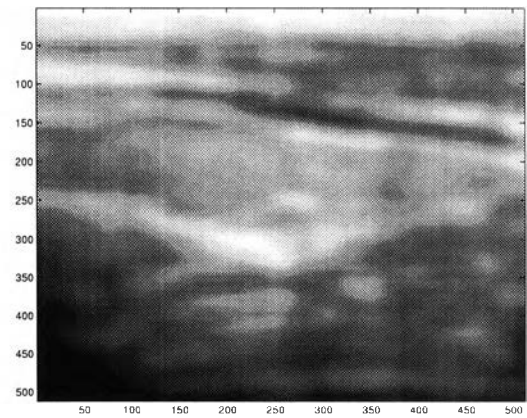
(ก) ขนาด x11 พิกเซล



(ข) ขนาด x23 พิกเซล

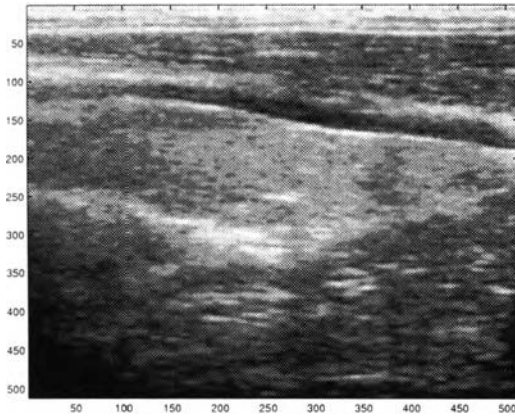


(ค) ขนาด x35 พิกเซล

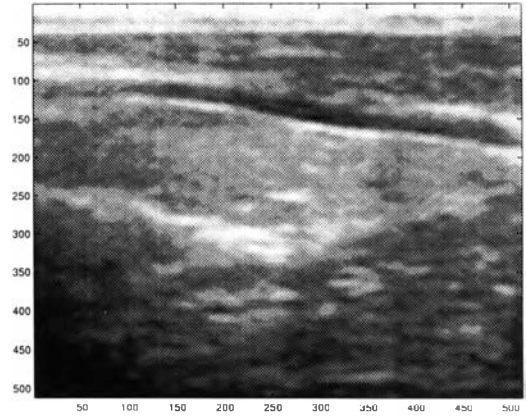


(ง) ขนาด x43 พิกเซล

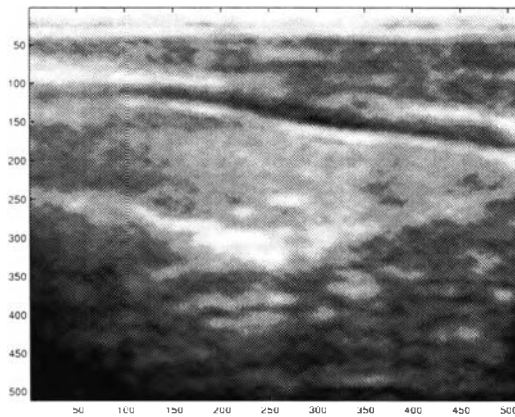
รูปที่ 2.32: ภาพต่อมไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง



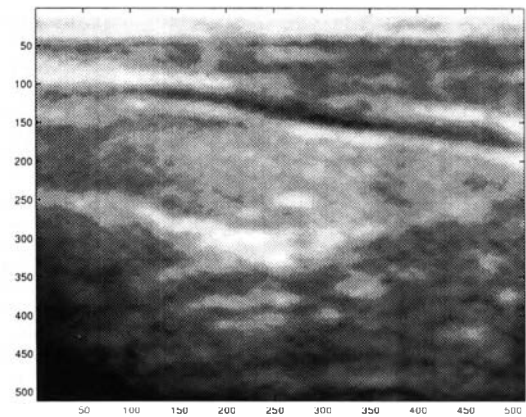
(ก) ขนาด x11 พิกเซล



(ข) ขนาด x23 พิกเซล



(ค) ขนาด x35 พิกเซล

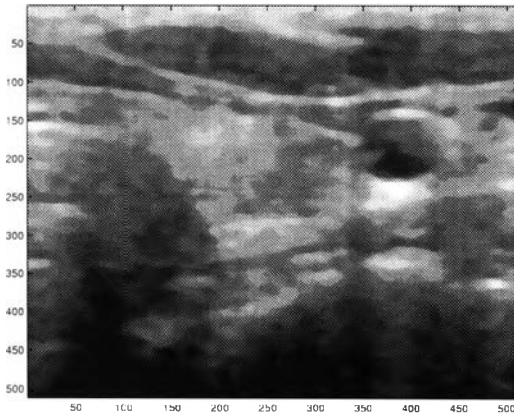


(ง) ขนาด x43 พิกเซล

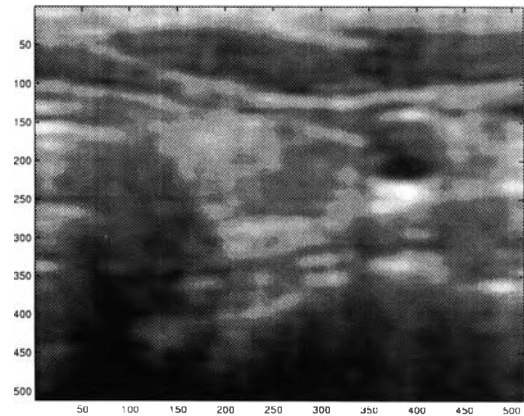
รูปที่ 2.33: ภาพต่อมไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่

2.5.1.2 กรณีเปรียบเทียบกันในหลายๆ ภาพ

ภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์ลักษณะต่างๆ เมื่อผ่านวงจรรองมัลฐานและวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองแล้วให้ผลในทำนองเดียวกับรูปที่ 2.34 กล่าวคือที่หน้าต่างขนาดเดียวกัน วงจรรองมัลฐานจะให้เส้นขอบที่คมกว่า ส่วนวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองให้ภาพที่ใกล้เคียงกันและรักษาขอบที่มีัวไม่ชัดเจนไว้ได้มากกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพในการทำงานจึงขึ้นอยู่กับว่า เส้นขอบของต่อมไทรอยด์ในภาพหนึ่งๆ มีลักษณะเป็นเช่นไร ถ้ามีเส้นขอบที่มีัวไม่ชัดเจนอยู่มาก ดังเช่นในภาพอัลตราซาวนด์ทั่วๆ ไป การใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง น่าจะให้ผลเป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามก็ตีวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง ก็สามารถทำงานได้ดีกับความชันของเส้นขอบที่ต่ำถึงระดับหนึ่งเท่านั้น นอกจากนี้วงจรรองทั้งสองไม่สามารถสร้างเส้นขอบขึ้นมาใหม่ได้ ถ้าเส้นขอบในภาพหายไปเป็นช่วงกว้าง จนกระทั่งไม่สามารถคาดคะเนด้วยสายตาได้ จะต้องใช้ประสบการณ์ในการตัดสินใจว่า จุดใดควรเป็นเส้นขอบ ดังเช่น บริเวณเส้นประในรูปที่ 2.28 โดยอาจใช้การกำหนดจุดขอบเพิ่มเติม ถ้าใช้ระบบติดตามเส้นขอบแบบ pre-emptive



(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัลฐาน

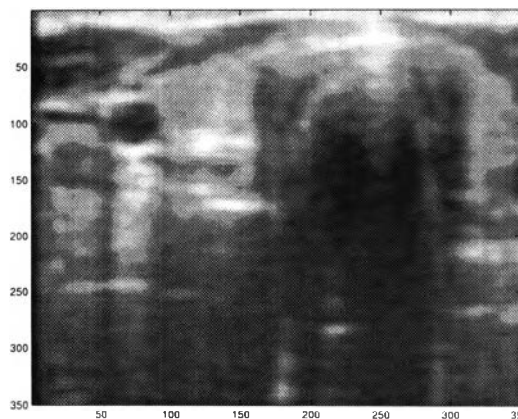


(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

รูปที่ 2.34: ภาพต่อมไทรอยด์ (ข) หลังจากผ่านวงจรรองขนาดหน้าต่าง 27x27 พิกเซล

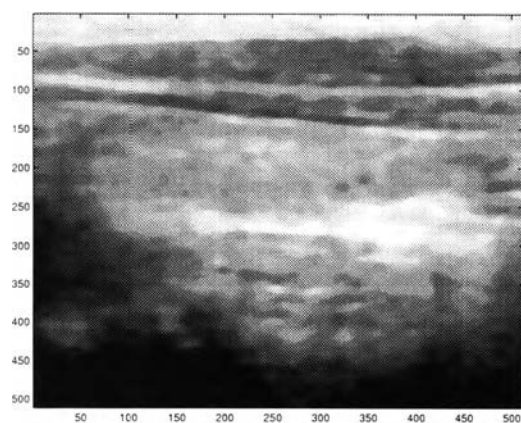


(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัลติฐาน

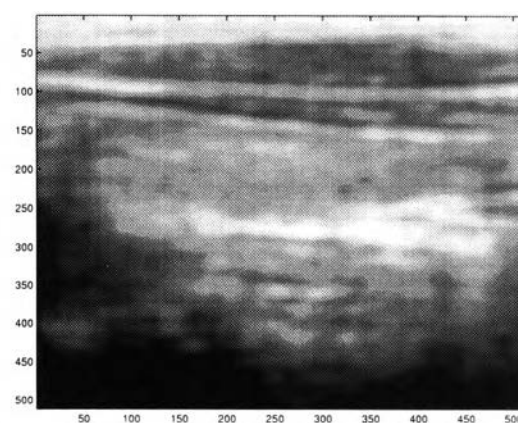


(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

รูปที่ 2.35: ภาพต่อมไทรอยด์ (ค) หลังจากผ่านวงจรรองขนาดหน้าต่าง 15x15 พิกเซล



(ก) เมื่อใช้วงจรรองมัลติฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

รูปที่ 2.36: ภาพต่อมไทรอยด์ (ง) หลังจากผ่านวงจรรองขนาดหน้าต่าง 27x27 พิกเซล

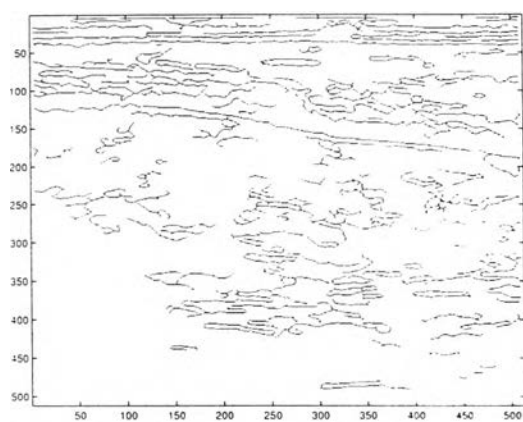
2.5.2 เมื่อพิจารณาการใช้งานวงจรรองร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้

2.5.2.1 กรณีเปรียบเทียบตามขนาดหน้าต่าง

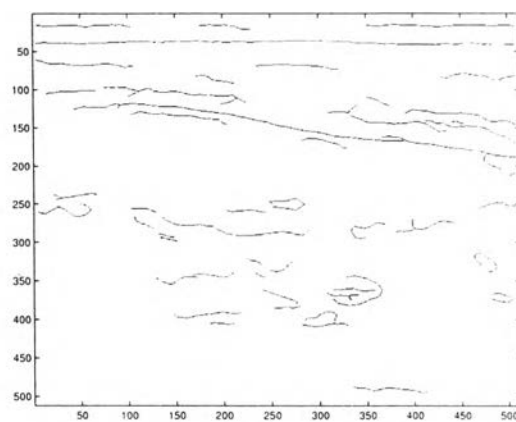
ในการทดลองนี้ได้คำนวณเส้นขอบจากภาพอัลตราซาวนด์ที่ผ่านวงจรรองชนิดต่าง ๆ ด้วยวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้ โดยพิจารณาวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์ทั้งอันดับศูนย์ สอง และสี่ เพื่อให้เห็นแนวโน้มการทำงานของวงจรรองร่วมกับวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้ ผลจากการทดสอบเป็นดังนี้:

เส้นขอบที่ได้จากภาพที่ผ่านวงจรรองมัลติฐาน เรียบและต่อเนื่องกว่าวงจรรองชนิดอื่น ๆ ที่หน้าต่างขนาดเล็ก สัญญาณรบกวนมีผลกระทบสูง จึงได้เส้นขอบที่ไม่ต้องการมาก เมื่อขนาดหน้าต่างใหญ่ขึ้น ผลกระทบดังกล่าวลดลง จึงได้เส้นขอบของต่อมไทรอยด์ชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะที่ขอบล่างซ้ายของต่อมไทรอยด์ที่มัวไม่ชัดเจนนั้น จะโดดเด่นขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อขนาดหน้าต่างใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตามที่ขนาดหน้าต่างใหญ่มาก ความชันของเส้นขอบจริงจะถูกกลบtonไปมาก ดังนั้นจึงต้องใช้ค่าระดับของวงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้ต่ำ ๆ เพื่อให้ได้เส้นขอบที่ต้องการ การใช้ค่าระดับต่ำทำให้ไวต่อสัญญาณรบกวน เกิดเป็นเส้นขอบที่ไม่ต้องการมากมายดังแสดงในรูปที่ 2.37 (ง) ดังนั้นช่วงขนาดหน้าต่างที่ใช้งานได้ของวงจรรองมัลติฐานจึงจำกัดไว้ค่าหนึ่ง

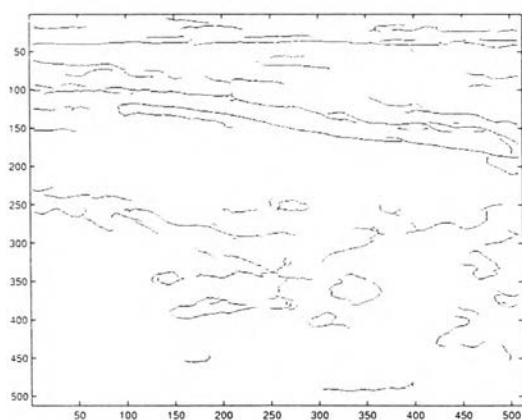
สำหรับเส้นขอบจากภาพที่ผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์นั้น แม้ว่าจะเรียบและต่อเนื่อง แต่ก็ไม่ตลอดทั้งเส้น ลักษณะเส้นขอบที่ได้เป็นขั้นๆ ซึ่งจะทำให้การเชื่อมต่อเส้นขอบของระบบติดตามเส้นขอบต้องทำงานยุ่งยากขึ้น และช่วงขนาดหน้าต่างที่ใช้งานได้นั้นน้อยกว่าวงจรรองมัลติฐานอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งผิดกับวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง ที่ให้เส้นขอบใกล้เคียงกันแม้ว่าขนาดหน้าต่างจะใหญ่ขึ้น ขณะที่ขนาดหน้าต่างใหญ่ขึ้นมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนอยู่บ้าง โดยปรากฏเป็นจุดเล็ก ๆ รอบเส้นขอบของต่อมไทรอยด์ ส่วนเส้นขอบจากภาพที่ผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสี่นั้น โดยหลักการแล้วควรให้เส้นขอบที่ชัดกว่าวงจรรองชนิดอื่น เพราะมีความสามารถในการคงสภาพเส้นขอบได้ดี แต่เส้นขอบที่ได้กลับไม่สนับสนุนหลักการดังกล่าว โดยมีทั้งเส้นขอบที่ไม่ต้องการเนื่องจากสัญญาณรบกวน และเส้นขอบที่ขนาดหน้าต่างใหญ่ขึ้นก็เกิดเป็นรอยหยัก ซึ่งเป็นไปได้ว่าที่ขนาดหน้าต่างใหญ่ขึ้น วงจรรองดังกล่าวให้ความสำคัญกับพิกเซลที่เป็นสัญญาณรบกวนมากเกินไป รวมทั้งการสร้างระนาบพหุนามที่ไวต่อสัญญาณรบกวนกว่าวงจรรองอันดับอื่นๆ เส้นขอบที่ได้จึงเพี้ยนไป เมื่อเปรียบเทียบในระหว่างวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์ด้วยกันแล้ว วงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองให้ผลดี และเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานทดแทนวงจรรองมัลติฐานมากที่สุด ในหัวข้อถัดไปจะเปรียบเทียบเส้นขอบที่ได้จากภาพที่ผ่านวงจรรองมัลติฐานกับวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง เมื่อใช้กับภาพอัลตราซาวนด์ที่มีความหลากหลายแตกต่างกัน



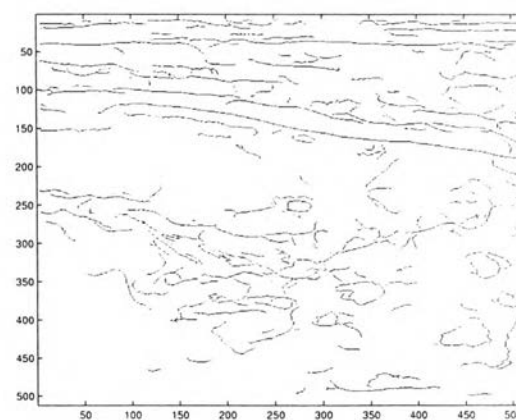
(ก) ขนาด x11 พิกเซล



(ข) ขนาด x23 พิกเซล

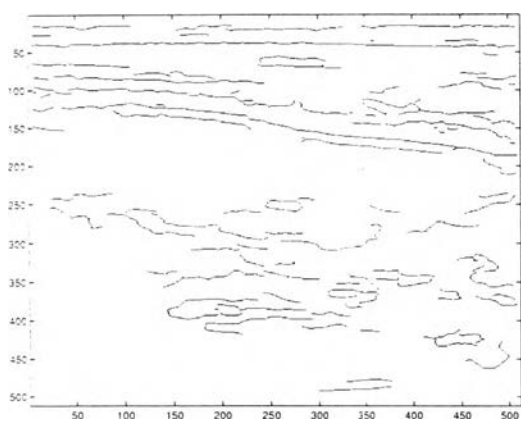


(ค) ขนาด x35 พิกเซล

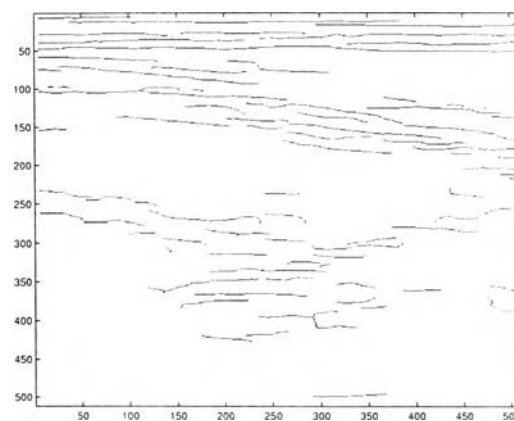


(ง) ขนาด x43 พิกเซล

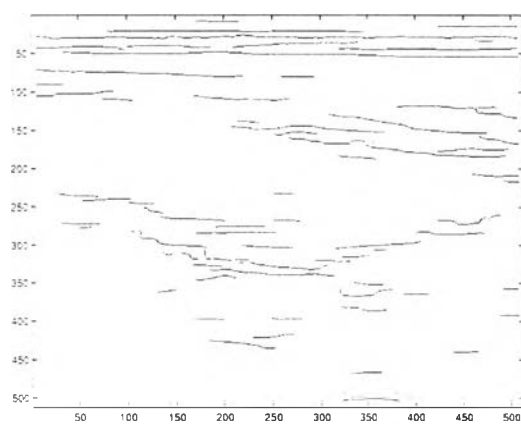
รูปที่ 2.37: เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจกรองมัลติฐาน
เมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้



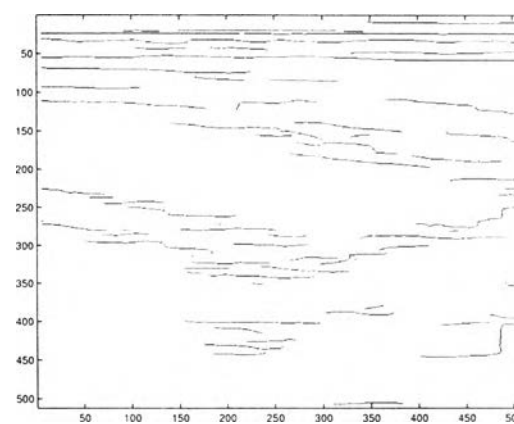
(ก) ขนาด x11 พิกเซล



(ข) ขนาด x23 พิกเซล

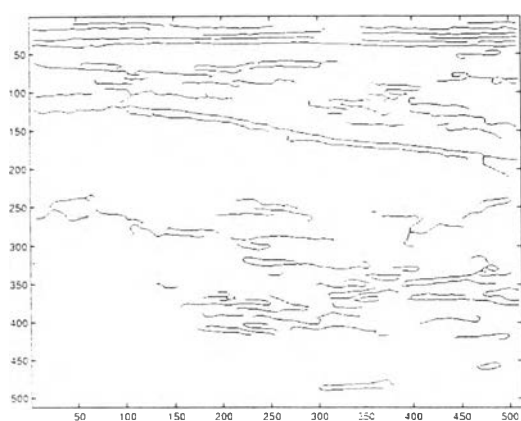


(ค) ขนาด x35 พิกเซล

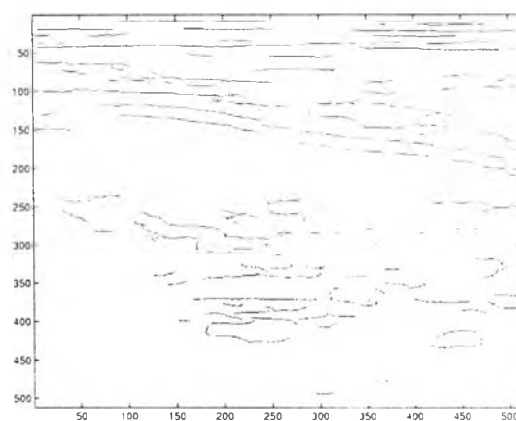


(ง) ขนาด x43 พิกเซล

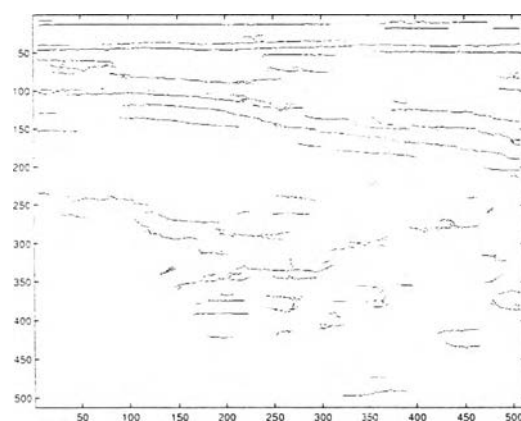
รูปที่ 2.38: เส้นขอบของภาพไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับศูนย์ เมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้



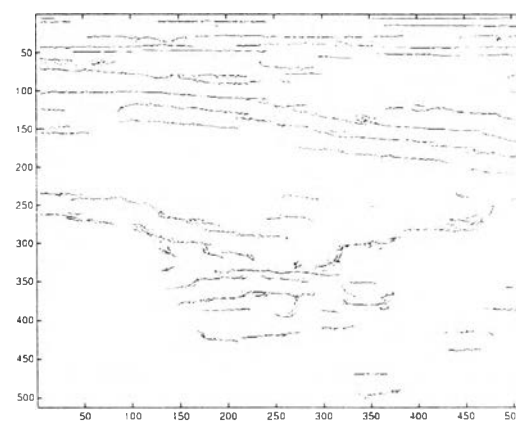
(ก) ขนาด x11 พิกเซล



(ข) ขนาด x23 พิกเซล

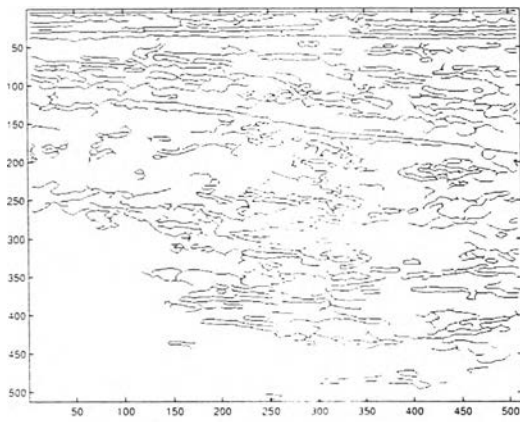


(ค) ขนาด x35 พิกเซล

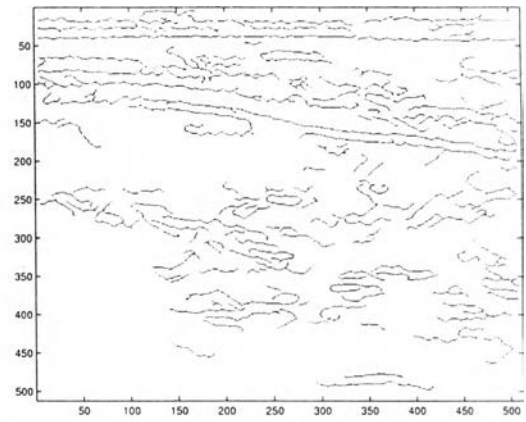


(ง) ขนาด x43 พิกเซล

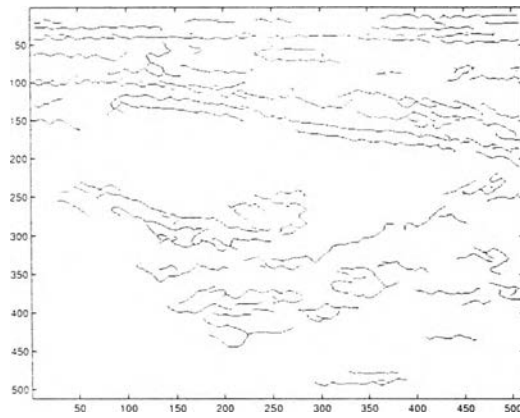
รูปที่ 2.39: เส้นขอบของภาพไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง เมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแค่นี้



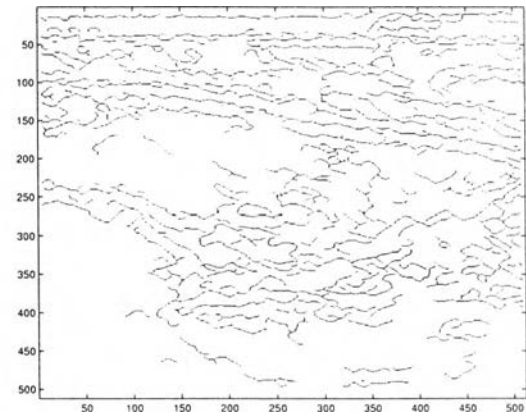
(ก) ขนาด x11 พิกเซล



(ข) ขนาด x23 พิกเซล



(ค) ขนาด x35 พิกเซล

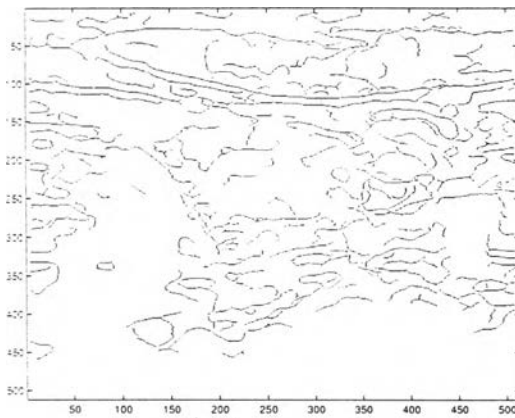


(ง) ขนาด x43 พิกเซล

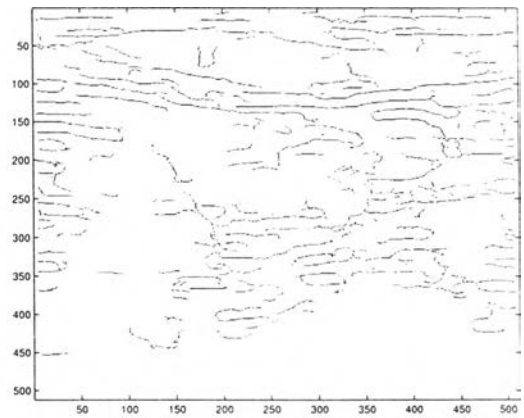
รูปที่ 2.40: เส้นขอบของภาพไทรอยด์ (ก) หลังจากผ่านวงจรรองขาวิสกี-โกเลย์อันดับสี่เมื่อใช้วงจรถรวจจับเส้นขอบแค่นี้

2.5.3 กรณีเปรียบเทียบกันในหลายๆ ภาพ

เมื่อพิจารณาเส้นขอบที่ได้จากภาพอัลตราซาวนด์ของต่อมไทรอยด์ในหลายๆ รูปแบบที่ผ่านวงจรกรองมัธยฐานและวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองนั้น พบว่า เส้นขอบที่ได้มีรูปแบบใกล้เคียงกับรูปที่ 2.37 และ 2.39 คือ เส้นขอบที่ได้จากวงจรกรองมัธยฐานต่อเนื่องและเรียบ มีบางช่วงที่เส้นขอบขาดหายไปเนื่องจากความชันของเส้นขอบ ณ ตำแหน่งนั้นต่ำมาก โดยเฉพาะเส้นขอบด้านซ้ายและขวาในรูปที่ 2.43 ซึ่งแม้แต่ผู้ใช้อย่างต้องอาศัยประสบการณ์ในการประมาณว่า เส้นขอบควรอยู่ ณ ตำแหน่งใด ส่วนเส้นขอบจากภาพที่ผ่านวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองนั้น พอที่จะเปรียบเทียบได้กับวงจรกรองมัธยฐาน แม้ว่าจะไม่เรียบเท่าก็ตาม แต่เมื่อคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ วงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสองก็ยังน่าสนใจอยู่มากที่จะนำมาใช้ทดแทนวงจรกรองมัธยฐานอยู่เช่นเดิม ในบทความนี้ได้มีการพัฒนาวงจรตรวจจับเส้นขอบขึ้นใหม่จากคุณสมบัติของวงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์สองมิติ เพื่อให้ได้เส้นขอบที่ต่อเนื่องขึ้นมากกว่าเมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแบบนี้

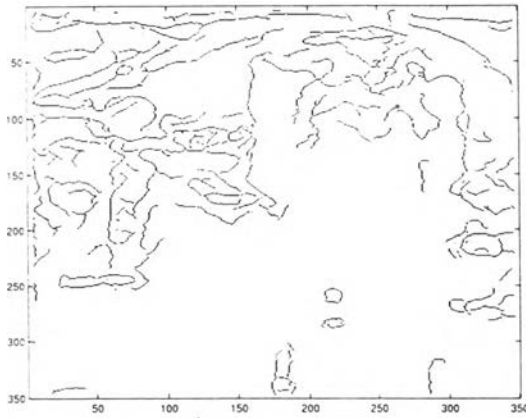


(ก) เมื่อใช้วงจรกรองมัธยฐาน

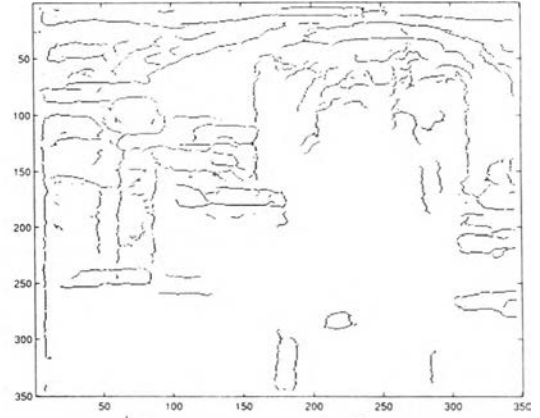


(ข) เมื่อใช้วงจรกรองซาวีสกี-โกเลย์อันดับสอง

รูปที่ 2.41: เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ข) หลังจากผ่านวงจรกรองขนาดหน้าต่าง 27x27 พิกเซลเมื่อใช้วงจรตรวจจับเส้นขอบแบบนี้

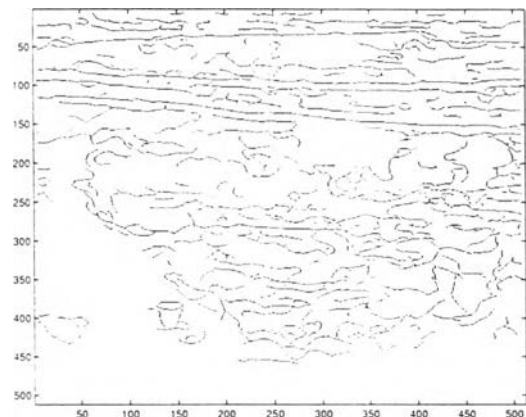


(ก) เมื่อใช้วงจกรองมัลฐาน

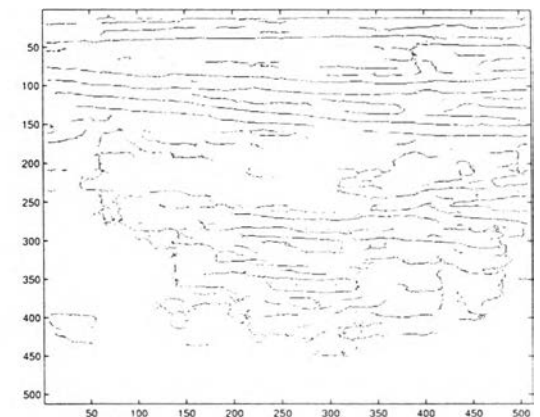


(ข) เมื่อใช้วงจกรองซาวิตกี-โกเลย์อันดับสอง

รูปที่ 2.42: เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ค) หลังจากผ่านวงจกรองขนาดหน้าต่าง 15x15 พิกเซลเมื่อใช้วงจรถรวจจับเส้นขอบแค่นี้



(ก) เมื่อใช้วงจกรองมัลฐาน



(ข) เมื่อใช้วงจกรองซาวิตกี-โกเลย์อันดับสอง

รูปที่ 2.43: เส้นขอบของภาพต่อมไทรอยด์ (ง) หลังจากผ่านวงจกรองขนาดหน้าต่าง 27x27 พิกเซลเมื่อใช้วงจรถรวจจับเส้นขอบแค่นี้