

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยแนะแนวทางการยืดส่วนปลายของตะปูยึดกระดูกภายใน
โดยวิเคราะห์จากภาพเอกซเรย์



นายกำธร สิมมามี

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

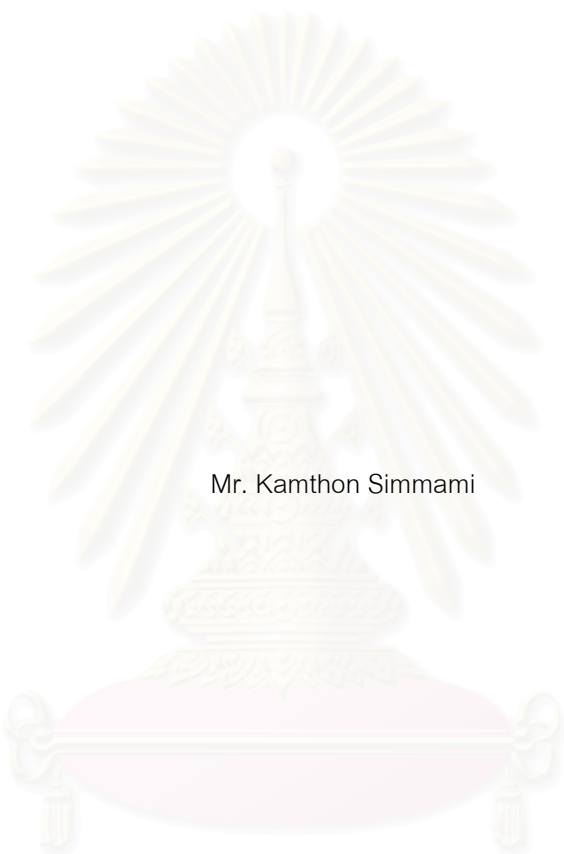
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1904-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPUTER AIDED DISTAL LOCKING GUIDANCE OF INTRAMEDULLARY NAIL
BY X-RAY IMAGE ANALYSIS



Mr. Kamthon Simmami

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Computer Science

Department of Computer Engineering

Faculty of Computer Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1904-3

กำธร สิมมาณี: การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยแนะแนวทางการยึดส่วนปลายของตะปูยึดกระดูกภายใน
โดยวิเคราะห์จากภาพเอกซเรย์ (COMPUTER AIDED DISTAL LOCKING GUIDANCE OF
INTRAMEDULLARY NAIL BY X-RAY IMAGE ANALYSIS) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผศ.นงลักษณ์
โควาศิลาวัณย์, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: ผศ.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ และ นพ.วิญญู รัตนไชย, 95 หน้า.
ISBN 974-17-1904-3.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางและสร้างต้นแบบในการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยแนะ
ทางการยึดส่วนปลายของตะปูยึดกระดูกภายในโดยวิเคราะห์จากภาพเอกซเรย์โดยวิธีที่นำเสนอใน
งานวิจัยประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ การแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป การ
คำนวณเพื่อปรับมุมเครื่องฟลูออโรสโคป และการคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการแก้ไขการเพี้ยนทางเรขาคณิตของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโร-
สโคปโดยใช้อุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นโดยหาตำแหน่งจุดอ้างอิงของอุปกรณ์จากภาพ
เอกซเรย์แล้วนำไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงในอุปกรณ์ เมื่อทดสอบกับภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์
ทดสอบความถูกต้องที่ประดิษฐ์ขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งอุปกรณ์และวิธีการที่ได้นำเสนอมี
ความถูกต้องสูงโดยมีความคลาดเคลื่อนต่ำ

ในการปรับมุมเครื่องฟลูออโรสโคปให้เห็นตำแหน่งรูยึดสกรูซ้อนทับกันเป็นวงกลมที่สมบูรณ์
งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการคำนวณหาระยะและทิศทางการปรับมุมเครื่องฟลูออโรสโคปโดยคำนวณ
เทียบจากตำแหน่งใน 3 มิติของรูยึดสกรูจากภาพเอกซเรย์ เริ่มจากการคำนวณหาตำแหน่งใน 3 มิติที่
เป็นไปได้ทั้งหมดของรูยึดสกรูที่อยู่ในขอบเขตที่กำหนดบนตะปูแล้วเลือกใช้ตำแหน่งที่มีค่าระยะทาง
พีชคณิตน้อยที่สุดจากการคำนวณตำแหน่งใน 3 มิติของรูยึดสกรูย้อนกลับไปหาตำแหน่งรูยึดสกรูในภาพ
เอกซเรย์ จากผลการทดลองปรับมุมเครื่องฟลูออโรสโคปด้วยวิธีที่นำเสนอนี้พบว่าผลการคำนวณและปรับ
มุมจากการเพี้ยนใน 2 ระนาบจนเห็นรูยึดสกรูเป็นวงกลมที่สมบูรณ์ทำได้ในจำนวนไม่เกิน 2 ครั้ง

ส่วนการปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายให้รูรูปทรงกระบอกตรงกับรูยึดสกรูที่เห็นเป็นวงกลมที่
สมบูรณ์นั้น ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการคำนวณหาระยะและทิศทางการปรับมุมจุดปรับมุมทั้ง 4
จุดโดยหาตำแหน่งใน 3 มิติของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายจากภาพเอกซเรย์โดยแทนโครงสร้างของ
แผ่นเล็งจากภาพเอกซเรย์ลงในภาพฉายแบบต่าง ๆ ที่เป็นไปได้และเลือกภาพฉายแบบที่ทำให้ระนาบทั้ง
สองใน 3 มิติของแผ่นเล็งขนานกันมากที่สุดเป็นคำตอบโดยคำนวณจากระยะคลาดเคลื่อนรวมน้อยที่สุด
ของจุดที่ตรงกันระหว่างระนาบทั้งสอง ผลการทดลองพบว่าวิธีการที่นำเสนอสสามารถบอกทิศทางการ
ปรับมุมของจุดปรับมุมทั้ง 4 จุดได้ดีแต่จำนวนรอบที่ต้องปรับม้วยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง

| | | |
|------------|------------------------|--------------------------------------|
| ภาควิชา | วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ | ลายมือชื่อนิสิต |
| สาขาวิชา | วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ | ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา |
| ปีการศึกษา | 2545 | ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม |
| | | ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม |

4370223521 : MAJOR COMPUTER SCIENCE

KEY WORD: INTRAMEDULLARY NAIL/ DISTAL LOCKING/ X-RAY IMAGE/ IMAGE ANALYSIS

KAMTHON SIMMAMI: COMPUTER AIDED DISTAL LOCKING GUIDANCE OF INTRAMEDULLARY NAIL BY X-RAY IMAGE ANALYSIS. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. NONGLUK COVAVISARUCH THESIS CO-ADVISOR: ASST. PROF. WIWAT VATANAWOOD AND WINYOU RATANACHAI, M.D., 95 pp. ISBN 974-17-1904-3.

The purposes of this research are to find an approach and to develop a prototype of computer aided distal locking guidance of intramedullary nail by x-ray image analysis. The proposed method is composed of three parts which are a distortion correction of a fluoroscopic x-ray image, a calculation for fluoroscope rotation control adjustment and a calculation for distal target device control adjustment.

This research proposes a geometric distortion correction method of a fluoroscopic x-ray image together with an invented device for position referencing. This method locates reference points from the device's x-ray image and compares them with their actual positions on the device. The results from our experiment on another invented testing device reveal that the positions after distortion correction are accurate with minute errors.

In order to rotate the fluoroscope to the position that exposes the nail's holes as a perfect circle, this research proposes a calculation method to find the rotation angles and directions to adjust the fluoroscope based on the 3D positions of two holes on the nail. The method starts with computing all possible 3D positions of the 2 corresponding holes in a pre-defined nail region. The computed 3D positions are projected back to the x-ray images. The holes' best 3D positions are those that their projected circles result in the shortest algebraic distance. The experimental results of this proposed method reveal that, for the distortion within 2 planes, a perfect circle of the nail's holes can be achieved within 2 calculations.

For distal target device adjustment to align the guiding cylinder with the achieved perfect circle, this research proposes a method to find the number of turns and directions of the device's 4 control points based on the 3D position of the device's guiding plate. This method compares the guiding plate in an x-ray image to all possible projections. The best projection is the one that the two planes of the guiding plate are most parallel. It can be indicated by the minimum sum of error distances between the coincident points of the two planes. The results from our experiment reveal that the proposed method gives correct direction guidance at all 4 control points and some errors for the number of turns.

| | | |
|----------------|----------------------|------------------------------|
| Department | Computer Engineering | Student's signature |
| Field of study | Computer Science | Advisor's signature..... |
| Academic year | 2002 | Co-advisor's signature |
| | | Co-advisor's signature |

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.นงลักษณ์ ไคววาริสารัช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและดูแลอย่างดียิ่ง ตลอดจนได้สละเวลาให้คำแนะนำ ปรีกษาและเสนอข้อคิดตลอดการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ และ นพ.วิญญู รัตนไชย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รวมทั้งสองท่านผู้ริเริ่มหัวข้อการวิจัยนี้ และได้ให้ความช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่รวมทั้งให้คำปรึกษาอย่างดีตลอดการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นรวมถึงเสนอแนะแนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณภาคีวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้พิจารณาอนุญาตผู้ช่วยสอนเป็นเวลา 2 ภาคการศึกษาและทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์แก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณมงคล วรณมประภา ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือที่ใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ใช้ในการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความถูกต้อง

ขอขอบคุณ พี่สมนึก รังสิวงส์ ที่ได้ช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการเดินทางและให้ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ น้องเจษฎา แสงพานิชย์ น้องศักดิ์พจน์ ทองเสียมนาค และ พี่นันทนา ธินรุ่งโรจน์ ที่ช่วยอ่านและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์อย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และ น้อง ๆ สมาชิกภายในห้องปฏิบัติการวิจัย CGCI และเพื่อนร่วมรุ่น CS30 ทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง ที่คอยให้ความช่วยเหลือและดูแลเอาใจใส่ผู้วิจัยตลอดการวิจัยและการศึกษาเล่าเรียน

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ป้า และยาย ที่เข้าใจและให้ทุกสิ่งแก่ชีวิตของผู้วิจัยโดยมิเคยน้อยไปกว่าความต้องการของผู้วิจัยเลย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ | ฎ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 6 |
| 1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป | 6 |
| 1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยยืดสกรูส่วนปลายของตะปู | 6 |
| 1.3 วัตถุประสงค์..... | 7 |
| 1.4 ขอบเขตการวิจัย | 7 |
| 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย | 8 |
| 1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ | 8 |
| 1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ | 9 |
| 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | |
| 2.1 ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป..... | 10 |
| 2.1.1 ภาพเอกซเรย์ | 10 |
| 2.1.2 การเอกซเรย์ด้วยเครื่องฟลูออโรสโคป | 11 |
| 2.1.3 การกำเนิดภาพเอกซเรย์ของเครื่องฟลูออโรสโคป | 12 |
| 2.2 การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformation) | 13 |
| 2.2.1 การแปลงเชิงพื้นที่ (Spatial Transformation) | 13 |
| 2.2.2 การประมาณค่าในช่วงของค่าระดับเทา (Gray-Level Interpolation) | 14 |
| 2.3 การประมวลผลและการวิเคราะห์ภาพ (Image Processing and Analysis) | 15 |
| 2.3.1 การกรองสัญญาณรบกวน (Noise Filtering) | 15 |
| 2.3.2 การหาค่าขีดแบ่ง (Thresholding) | 16 |
| 2.3.3 การประมวลผลภาพเชิงสัณฐานวิทยา (Morphological Image Processing) | 16 |
| 2.3.4 การอธิบายเส้น (Line Descriptions) | 17 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.3.5 | การตรวจหาขอบภาพ (Edge Detection) | 20 |
| 2.4 | เรขาคณิตเชิงภาพฉายเปอร์สเปคทีฟ (Perspective Projection Geometry) | 22 |
| 2.4.1 | ภาพฉายเปอร์สเปคทีฟแบบ 1 มิติ (One-Dimensional Perspective Projection) | 22 |
| 2.4.2 | ภาพฉายเปอร์สเปคทีฟใน 3 มิติ (The Perspective Projection in 3D) | 23 |
| 2.4.3 | ภาพฉายเปอร์สเปคทีฟผกผัน (Inverse Perspective Projection) | 24 |
| 2.4.4 | การอนุมานจาก 2 มิติไปยัง 3 มิติโดยใช้ภาพฉายเปอร์สเปคทีฟ | 24 |
| 3 | การแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป | |
| 3.1 | เครื่องมือที่ออกแบบเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์ | 33 |
| 3.2 | วิธีแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์ | 35 |
| 3.2.1 | การกำหนดบริเวณภาพเอกซเรย์ | 35 |
| 3.2.2 | การหาจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กในภาพเอกซเรย์ | 38 |
| 3.2.3 | การคำนวณเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพ | 40 |
| 4 | การคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป | |
| 4.1 | การแบ่งส่วนภาพเพื่อกำหนดบริเวณรูยึดสกรูจากภาพเอกซเรย์ | 42 |
| 4.2 | การคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของรูยึดสกรูใน 3 มิติ | 48 |
| 4.3 | การแนะนำแนวทางการปรับหมุนแขนรูปตัว C ของเครื่องฟลูออโรสโคป | 52 |
| 5 | การคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย | |
| 5.1 | การแบ่งส่วนภาพเพื่อกำหนดบริเวณแผ่นเล็งในภาพเอกซเรย์ | 55 |
| 5.2 | การคำนวณหาตำแหน่งของแผ่นเล็งใน 3 มิติ | 61 |
| 5.3 | การคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายให้ตรงกับรูยึดสกรู | 63 |
| 6 | การทดลองและผลการทดลอง | |
| 6.1 | การแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป | 65 |
| 6.1.1 | วิธีการทดลอง | 65 |
| 6.1.2 | ผลการทดลอง | 66 |
| 6.1.3 | การวิเคราะห์และสรุปผล | 67 |
| 6.2 | การคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป | 67 |
| 6.2.1 | วิธีการทดลอง | 67 |
| 6.2.2 | ผลการทดลอง | 68 |
| 6.2.3 | การวิเคราะห์และสรุปผล | 71 |
| 6.3 | การคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย | 71 |
| 6.3.1 | วิธีการทดลอง | 71 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.3.2 | ผลการทดลอง | 73 |
| 6.3.3 | การวิเคราะห์และสรุปผล | 75 |
| 7 | สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | |
| 7.1 | สรุปผลการวิจัย | 76 |
| 7.1.1 | การแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป | 76 |
| 7.1.2 | การคำนวณปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป | 76 |
| 7.1.3 | การคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย | 77 |
| 7.2 | ข้อสังเกตและข้อเสนอแนะ | 77 |
| | รายการอ้างอิง | 79 |
| | ภาคผนวก | |
| | ภาคผนวก ก | |
| | โปรแกรมต้นแบบ | 82 |
| | ภาคผนวก ข | |
| | บทความที่นำเสนอในงานประชุมวิชาการ | 88 |
| | ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 95 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่

| | |
|-----|--|
| 6.1 | ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวเส้นรัศมี 16 เส้น 360 องศา (เส้นที่ 1 อยู่ที่องศาที่ 0) 66 |
| 6.2 | ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวเส้นรอบวงวัดจากจุดศูนย์กลาง 5 วง (แต่ละวงมีลูกเหล็ก 16 ลูก) 67 |
| 6.3 | ความคลาดเคลื่อนเป็นองศาและจำนวนครั้งที่ต้องปรับมุมเครื่องฟลูออโรสโคป จนสามารถมองเห็นรูยึดสกรูเป็นวงกลมที่สมบูรณ์เหมือนเดิม 69 |
| 6.4 | ความคลาดเคลื่อนเป็นรอบที่จุดปรับมุมทั้ง 4 ของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย 73 |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | ตะปู้ยึดกระดูกภายใน หรือในกายวิจัยนี้เรียกว่า “ตะปู้” | 1 |
| 1.2 | ตะปู้ที่ยึดกับกระดูกแล้ว | 2 |
| 1.3 | เครื่องนำทางส่วนต้นใช้ช่วยเล็งเพื่อยึดสกรูส่วนต้น | 2 |
| 1.4 | เครื่องฟลูออโรสโคปที่ใช้เล็งรูยึดสกรูในการผ่าตัด | 2 |
| 1.5 | การซ้อนทับกันของสกรูใกล้และรูไกล | 3 |
| 1.6 | เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายด้วยมือเปล่า | 3 |
| 1.7 | การใช้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายด้วยมือเปล่า | 4 |
| 1.8 | เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายมีจุดปรับหมุน 4 จุดทำให้ปรับหมุนได้รอบแกนทั้งสาม | 4 |
| 1.9 | การใช้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายเล็งรูยึดสกรูจากภาพเอกซเรย์ | 5 |
| 1.10 | เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายต่อเข้ากับเครื่องนำทางส่วนต้นที่ต่ออยู่กับตะปู้ได้โดยใช้ ข้อต่อและมีเครื่องช่วยปรับหมุนระยะไกลเป็นเครื่องช่วยปรับหมุนจุดปรับหมุนทั้ง 4 | 5 |
| 2.1 | เครื่องฟลูออโรสโคปของบริษัท Philips รุ่น BV29 | 11 |
| 2.2 | การปรับตำแหน่งการฉายรังสีเอกซ์ของเครื่องฟลูออโรสโคปของบริษัท Philips รุ่น BV29.... | 12 |
| 2.3 | ภาพตัดขวางของส่วนรับรังสีเอกซ์เรย์ของเครื่องฟลูออโรสโคปแสดงให้เห็นตัวสร้างภาพ | 12 |
| 2.4 | ภาพเอกซเรย์เปล่า บริเวณวงกลมสีเทาอ่อนขนาดใหญ่คือภาพเอกซเรย์ที่เกิดขึ้นจริง จากเครื่องฟลูออโรสโคป | 13 |
| 2.5 | ความสัมพันธ์ของจุดภาพที่เกิดการเพี้ยน | 14 |
| 2.6 | การคำนวณจากตำแหน่งจริง A ได้ผลลัพธ์เป็นตำแหน่ง A' ในภาพที่เพี้ยน | 14 |
| 2.7 | พารามิเตอร์ของเส้นตรง | 18 |
| 2.8 | ภาพฉายเปอร์สเปคทีฟ $(\frac{rf_0}{s}, f_0)$ ของจุด (r, s) | 23 |
| 2.9 | รูปสี่เหลี่ยมด้านขนานและภาพฉายของรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน | 27 |
| 2.10 | ภาพฉายของวงกลมใน 3 มิติคือวงรี | 28 |
| 2.11 | กรวยที่ถูกทำให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานแล้ว | 31 |
| 2.12 | การตัดกันของระนาบกับกรวย | 31 |
| 3.1 | ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลและภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งและ อุปกรณ์ทดสอบความถูกต้อง | 34 |
| 3.2 | ฮิสโทแกรมของภาพระดับเทา | 35 |
| 3.3 | คุณสมบัติของค่าเฉลี่ยและมัธยฐานของฮิสโทแกรม | 36 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.4 | ขั้นตอนวิธีการหาค่าขีดแบ่งด้วยวิธีที่นำเสนอ | 36 |
| 3.5 | ตัวอย่างภาพเอกซเรย์เปล่าและผลลัพธ์ที่ได้จากการแบ่งส่วนภาพโดยใช้ค่าขีดแบ่ง | 37 |
| 3.6 | ขั้นตอนการกำหนดบริเวณวงกลม | 37 |
| 3.7 | การปรับค่าระดับเทาของภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง | 38 |
| 3.8 | ภาพลักษณะพื้นฐานสองของบริเวณลูกเหล็ก | 39 |
| 3.9 | จุดศูนย์กลางของลูกเหล็กที่หาได้ | 40 |
| 3.10 | เส้นแนวตั้งและเส้นแนวนอนที่ได้จากฟังก์ชันการถดถอยแบบพหุนามของจุดศูนย์กลาง ลูกเหล็กที่หาไว้แล้ว จุดตัดของเส้นแนวตั้งและเส้นแนวนอนเป็นจุดศูนย์กลางใหม่ของ ลูกเหล็ก | 40 |
| 3.11 | ภาพอุปกรณ์อ้างอิงหลังจากแก้ไขการเพี้ยนแล้ว | 41 |
| 4.1 | ขั้นตอนในการแบ่งส่วนภาพเพื่อกำหนดบริเวณรูยึดสกรูในภาพเอกซเรย์ | 43 |
| 4.2 | ตะปูอยู่ที่ตำแหน่งฉาก | 45 |
| 4.3 | ตัวอย่างเส้นตรง (ρ_A, θ_A) และ (ρ_B, θ_B) ที่ถูกเลือกให้เป็นขอบของตะปู ตามแนวยาว | 45 |
| 4.4 | เส้นตรงที่มีจำนวนสมาชิกมากใกล้เคียงกัน | 46 |
| 4.5 | ตัวอย่างการปรับแก้เส้นตรงและเส้นตรงที่ถูกปรับแก้แล้ว | 46 |
| 4.6 | การหาตำแหน่งรูยึดสกรูในภาพเอกซเรย์ | 47 |
| 4.7 | การแยกรูยึดสกรูใกล้และรูไกล | 48 |
| 4.8 | การกำหนดพื้นที่ในการคำนวณ | 49 |
| 4.9 | การคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของรูยึดสกรู | 50 |
| 4.10 | กรอบอ้างอิงที่ใช้คำนวณการปรับหมุนแขนรูปตัว C | 53 |
| 4.11 | การปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปรอบแกน x | 53 |
| 4.12 | การปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปรอบแกน z จาก 2 มุมมอง | 54 |
| 5.1 | การแบ่งส่วนภาพเพื่อกำหนดบริเวณแผ่นเล็งในภาพเอกซเรย์ | 56 |
| 5.2 | การกราดภาพหาบริเวณพื้นหลังของกรอบแผ่นเล็ง | 58 |
| 5.3 | การกราดภาพหาเส้นกำหนดบริเวณตะปู | 58 |
| 5.4 | แผ่นเล็งอยู่ที่ตำแหน่งฉาก | 59 |
| 5.5 | การหาเส้นตรงที่ชี้แทนกรอบใน | 59 |
| 5.6 | การหาขอบเขตของกรอบนอก | 60 |
| 5.7 | การหากรอบนอก | 61 |
| 5.8 | โครงสร้างของแผ่นเล็ง | 61 |

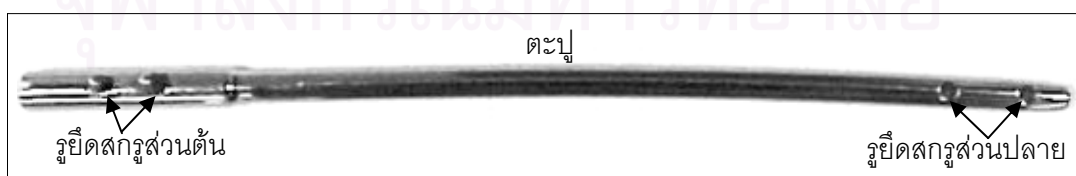
| | | |
|------|---|----|
| 5.9 | จุดตัดของเส้นตรงที่แทนด้านของกรอบินและกรอบนอกและภาพฉายแบบต่าง ๆ ของแผ่นเล็ง | 62 |
| 5.10 | การคำนวณหาระยะคลาดเคลื่อน | 63 |
| 5.11 | การคำนวณหาระยะการปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย | 63 |
| 6.1 | ภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์ทดสอบความถูกต้องก่อนแก้ไขการเพี้ยนและหลังจาก แก้ไขการเพี้ยน | 63 |
| 6.2 | ภาพเอกซเรย์ของตะปูที่เห็นรูยึดสกรูเป็นวงกลมที่สมบูรณ์ | 68 |
| 6.3 | ตัวอย่างภาพเอกซเรย์จากการปรับหมุน 1 ครั้งแล้วสามารถเห็นรูยึดสกรู เป็นวงกลมที่สมบูรณ์ | 70 |
| 6.4 | ตัวอย่างภาพเอกซเรย์จากการปรับหมุน 1 ครั้งแล้วสามารถเห็นรูยึดสกรู เป็นวงกลมที่สมบูรณ์ | 70 |
| 6.5 | โครงสร้างและขนาดของแผ่นเล็ง | 72 |
| 6.6 | ภาพเอกซเรย์ที่เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายตรงกับรูยึดสกรู | 72 |
| ก.1 | หน้าจอหลัก | 83 |
| ก.2 | หน้าจอกำหนดบริเวณภาพเอกซเรย์จากภาพเอกซเรย์เปล่า | 84 |
| ก.3 | หน้าจอกำหนดแก้ไขการเพี้ยนจากภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง | 85 |
| ก.4 | หน้าจอกำหนดหารีวิธีปรับหมุนเครื่องฟลูออไรสโคป | 86 |
| ก.5 | หน้าจอกำหนดหารีวิธีปรับหมุนเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย | 87 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

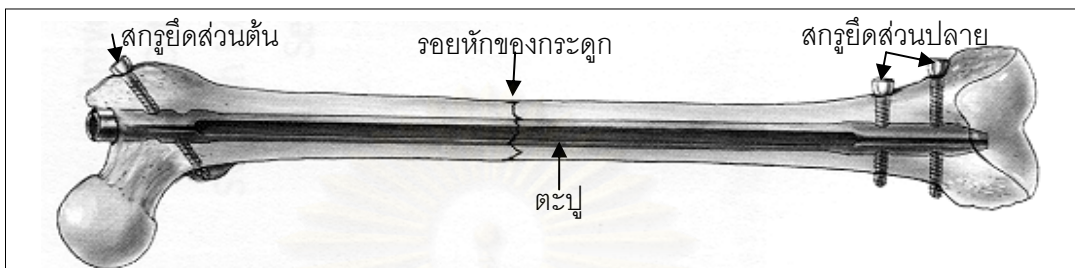
การรักษาผู้ป่วยกระดูกหักโดยการผ่าตัดใส่ตะปูยึดกระดูกภายใน (Intramedullary nail) ดังรูปที่ 1.1 เข้าไปในกระดูก (เพื่อให้กระดูกงอกและเข้าใจ ในงานวิจัยนี้จะขอเรียกตะปูยึดกระดูกภายในว่า ตะปู) ในการยึดตะปู แพทย์ต้องใช้สกรู (Screw) เพื่อยึดกระดูกทั้งส่วนต้น (Proximal locking) และยึดกระดูกส่วนปลาย (Distal locking) ทั้งนี้แพทย์ผู้ผ่าตัดจะเล็งตำแหน่งรูบนตะปูโดยใช้ภาพเอกซเรย์ช่วยให้มองเห็นกระดูกและตะปูในขณะที่ผ่าตัด แล้วจึงกำหนดบริเวณที่จะเจาะกระดูกเพื่อยึดกระดูกให้ติดกับตะปู รูปที่ 1.2 เป็นภาพตัวอย่างที่ใช้ตะปูยึดกระดูกและแสดงตัวอย่างสกรูที่ยึดกระดูกเข้ากับตะปู ในการยึดกระดูกส่วนต้น แพทย์สามารถทำได้สะดวกและใช้เวลาไม่มากเนื่องจากตะปูในส่วนต้นยังไม่บิดตัวมาก และมีเครื่องนำทางส่วนต้น (Proximal guide) ซึ่งสามารถต่อเข้ากับตะปูเพื่อช่วยนำทางในการเล็งรูยึดสกรู (ดังรูปที่ 1.3) แต่การยึดส่วนปลายยังเป็นขั้นตอนที่แพทย์ต้องใช้ความพยายามและใช้เวลานาน เนื่องจากกระดูกส่วนปลายมักจะงอหรือเคลื่อนที่มาก ต้องใช้แรงค่อนข้างมากจึงอาจมีปัญหาที่ตะปูสามารถบิดตัวได้รอบแกนทั้ง 3 แกนในกรอบอ้างอิง (Reference frame) คือแกน x แกน y และแกน z (กรอบอ้างอิงแสดงในรูปที่ 1.4) มีผลให้ทั้งแพทย์และผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีเอกซ์ (X-ray) จากเครื่องฟลูออโรสโคป (Fluoroscope) ซึ่งเป็นเครื่องฉายรังสีเอกซ์และแสดงภาพ (ดังรูปที่ 1.4) มากตามไปด้วย ซึ่งในทางปฏิบัติการผ่าตัดครั้งหนึ่ง ๆ จะต้องฉายรังสีเอกซ์เป็นจำนวนมากกว่า 10 ครั้งและบางขณะหากต้องการดูภาพต่อเนื่องเช่นการกระดูกงอก ก็จำเป็นต้องฉายรังสีต่อเนื่องเป็นเวลาค้างครั้งละนาน ๆ ด้วย และยิ่งการผ่าตัดใช้เวลาเพียงใดก็จะมีผลให้ผู้ป่วยต้องเสียเลือดมากขึ้นและเสี่ยงมากขึ้นกับการดมยาสลบ นานตามไปด้วย



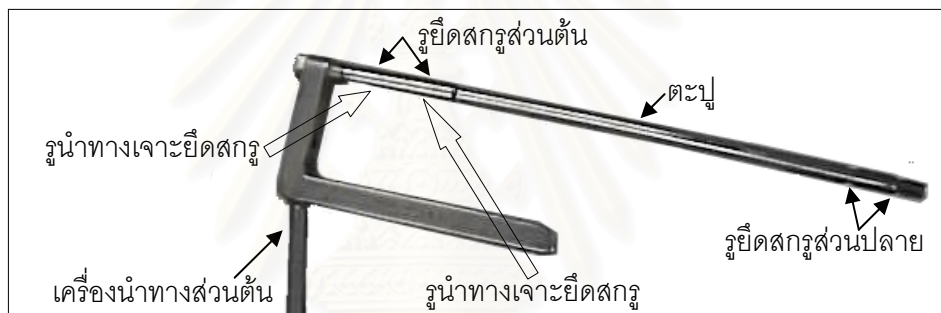
รูปที่ 1.1 ตะปูยึดกระดูกภายใน หรือในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า "ตะปู"

นอกจากนี้ถึงแม้ว่าผู้ป่วยจะได้รับรังสีเอกซ์ในปริมาณมากและรับรังสีโดยตรง แต่ก็อาจผ่าตัดรักษาเพียงครั้งเดียว ในขณะที่แพทย์และผู้ช่วยจำเป็นต้องผ่าตัดรักษาผู้ป่วยและต้องรับรังสีเอกซ์เป็น

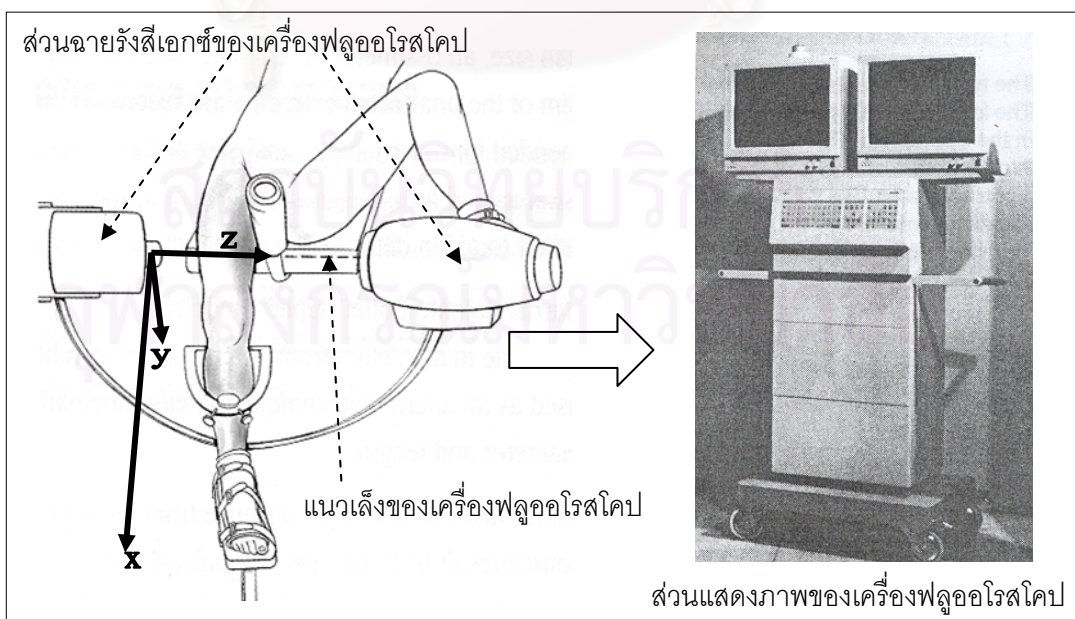
ประจำ ทำให้ปริมาณรังสีสะสมในร่างกายและเกิดเป็นอันตรายได้ จึงมีความพยายามคิดหาวิธีต่าง ๆ เพื่อลดเวลาในการผ่าตัดและลดการใช้รังสีเอกซ์เช่นการหาวิธีช่วยเล็งตำแหน่งเพื่อเจาะรูกระดูกและยึดสกรูส่วนปลาย แต่วิธีส่วนใหญ่ยังไม่เป็นที่นิยมนัก เนื่องจากบางวิธีอาจต้องใช้เทคโนโลยีสูงทำให้เครื่องมือมีราคาแพงมาก บางวิธีก็ทำให้แพทย์สับสนและปฏิบัติได้ยากในขณะผ่าตัด



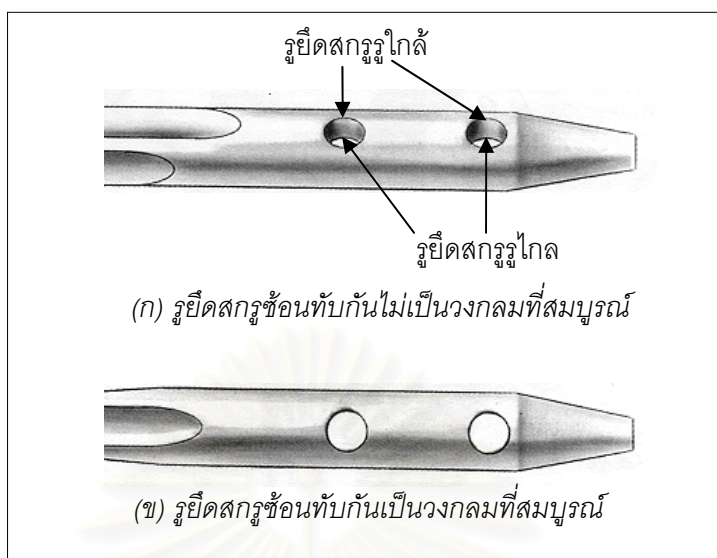
รูปที่ 1.2 ตะปูที่ยึดกับกระดูกแล้ว



รูปที่ 1.3 เครื่องนำทางส่วนต้นใช้ช่วยเล็งเพื่อยึดสกรูส่วนต้น

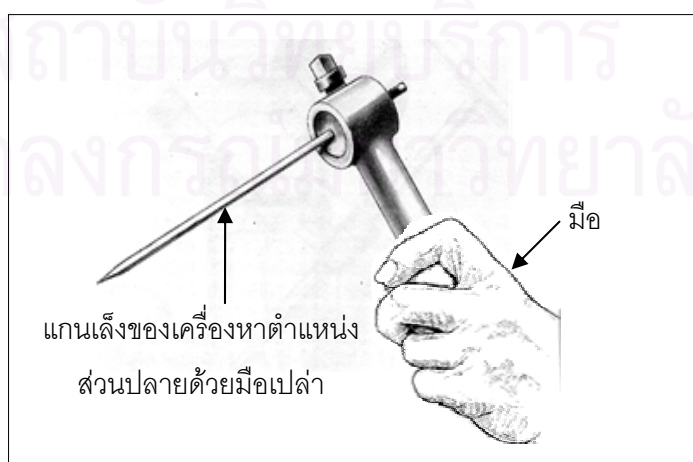


รูปที่ 1.4 เครื่องฟลูออโรสโคปที่ใช้เล็งรูยึดสกรูในการผ่าตัด

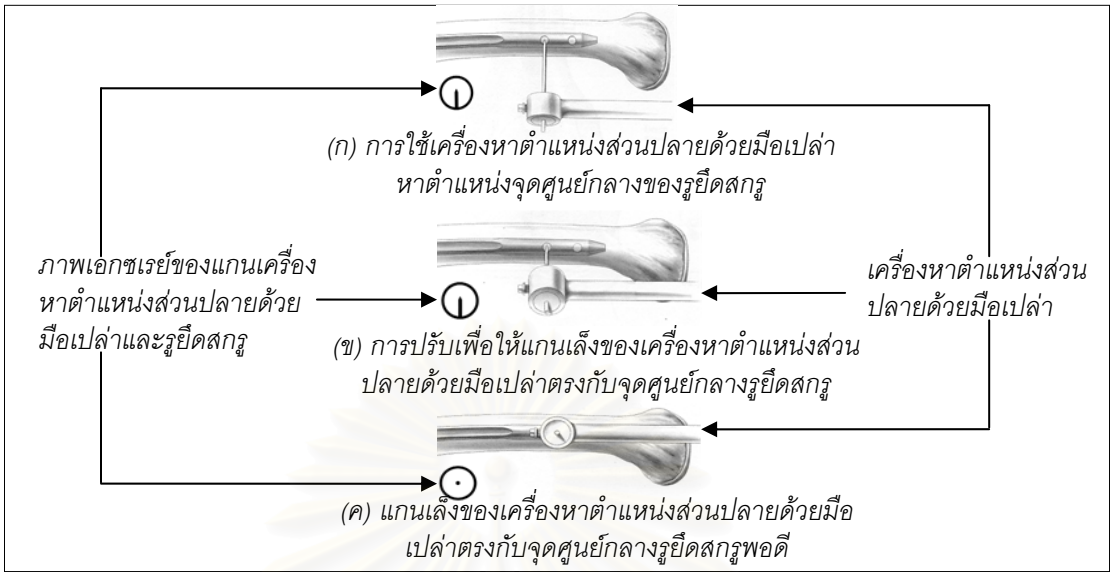


รูปที่ 1.5 การซ้อนทับกันของสกรูรูโก๊ตและรูโก๊ต

ในการผ่าตัดเมื่อแพทย์ใส่ตะปูเข้าไปในกระดูกและยึดสกรูส่วนต้นเข้ากับขาผู้ป่วยแล้ว เครื่องฟลูออโรสโคปจะถูกปรับจนมองเห็นภาพเอกซเรย์ของรูยึดสกรูส่วนปลายทั้งรูโก๊ตและรูโก๊ตซ้อนทับกันจนเป็นวงกลมที่สมบูรณ์ (Perfect circle) ดังรูปที่ 1.5 ข จากนั้นจึงใช้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายด้วยมือเปล่า (Free-hand distal targeting device) ดังรูปที่ 1.6 ซึ่งเป็นวิธีที่แพทย์นิยมใช้ในปัจจุบัน เล็งผ่านเครื่องฟลูออโรสโคปที่ปรับตรงกับรูยึดสกรูแล้วข้างต้น เลื่อนหาตำแหน่งเจาะรูยึดไปเรื่อย ๆ โดยดูจากภาพเอกซเรย์จนกว่าจุดปลายของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายด้วยมือเปล่าจะตรงกับจุดศูนย์กลางของรูยึดสกรู และแกนเล็งของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายด้วยมือเปล่าอยู่ในทิศทางเดียวกับแกนรูยึดสกรู (ดังรูปที่ 1.7 ค) วิธีการนี้มีข้อดีคือใช้อุปกรณ์ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน และใช้เวลาน้อยรับรังสีเอกซ์ไม่มาก แต่แพทย์ต้องมีความชำนาญสูงและยังคงต้องรับรังสีเอกซ์ที่มือโดยตรงจากเครื่องฟลูออโรสโคปหลายครั้งจากการเล็ง

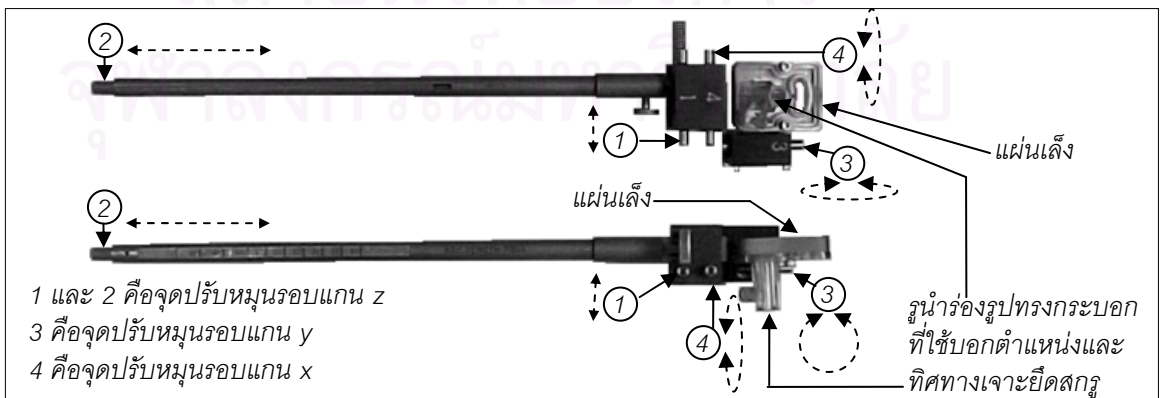


รูปที่ 1.6 เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายด้วยมือเปล่า



รูปที่ 1.7 การใช้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายด้วยมือเปล่า

วิธีแก้ปัญหาอีกวิธีหนึ่งซึ่งโรงพยาบาลภูมิพลอดุลยเดชมีเครื่องมือพร้อมอยู่แล้วแต่แพทย์ไม่นิยมใช้เนื่องจากทำความเข้าใจยากและใช้เวลาผ่าตัดนาน วิธีนี้ใช้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย (Distal target device) ดังรูปที่ 1.8 ช่วยเล็งรูยึดศกฐส่วนปลายที่ต้องปรับระยะและมุมจมองเห็นรูยึดศกฐส่วนปลายเป็นวงกลมที่สมบูรณ์จากภาพเอกซเรย์ (ดังรูปที่ 1.9) โดยเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายสามารถต่อเข้ากับเครื่องนำทางส่วนต้นซึ่งยึดติดกับตะปูอยู่แล้ว (ดังรูปที่ 1.3) และในการต่อจะใช้ข้อต่อเพื่อทำหน้าที่ยึดเครื่องนำทางส่วนต้นกับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย (ดังรูปที่ 1.10) เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายนี้จะสามารถปรับระยะได้ตามความยาวของตะปู รวมทั้งมีกลไกที่ใช้ปรับหมุนให้แผ่นเล็งหมุนรอบแกนทั้งสาม (ดังรูปที่ 1.8) โดยมีเครื่องช่วยปรับหมุนเป็นแท่งเหล็กขนาดยาว (ดังรูปที่ 1.10) ช่วยให้อุ่นไปหมุนจุดหมุนปรับในระยะไกลจากเครื่องฟลูออโรสโคปเพื่อให้รูนำร่องรูปทรงกระบอกที่ใช้บอกตำแหน่งและทิศทางเจาะยึดศกฐตรงกับรูยึดศกฐที่บิดไปตามตะปูได้ วิธีการนี้มีข้อดีคือ แพทย์ไม่ต้องรับรังสีเอกซ์ที่มือโดยตรงและสามารถยืนยันตำแหน่งที่แน่นอนในการเล็งได้

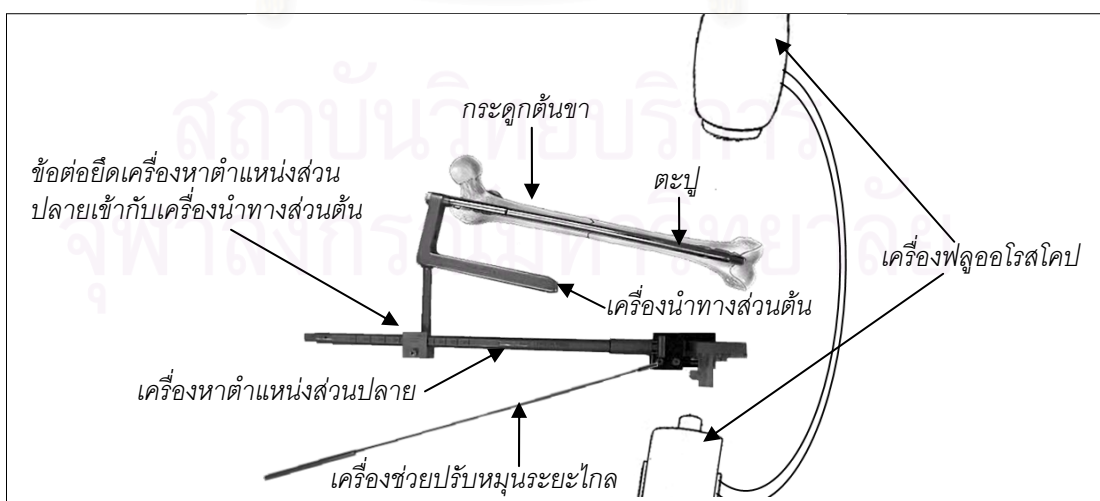


รูปที่ 1.8 เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายมีจุดปรับหมุน 4 จุดทำให้ปรับหมุนได้รอบแกนทั้งสาม



รูปที่ 1.9 การใช้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายด้วยรูยึดกระดูกจากภาพเอกซเรย์

งานวิจัยนี้มีแนวคิดหลักกว่าวิธีในการแก้ปัญหาการยึดกระดูกส่วนปลายควรเป็นวิธีที่สะดวกและปลอดภัย ช่วยลดอันตรายให้กับแพทย์จากรังสีเอกซ์โดยช่วยให้แพทย์ไม่จำเป็นต้องอยู่ใกล้เครื่องฟลูออโรสโคปในขณะฉายรังสี และลดจำนวนครั้งในการฉายรังสีเอกซ์ ซึ่งจะช่วยให้แพทย์และผู้ป่วยได้รับอันตรายจากรังสีน้อยลง และควรเป็นวิธีที่ใช้เครื่องมือที่มีอยู่ทั่วไปเช่นเครื่องฉายรังสีเอกซ์และอุปกรณ์ช่วยเล็ง ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการแก้ปัญหาในระยะต้นนี้คือการช่วยให้การใช้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายที่มีอยู่แล้วทำได้สะดวกขึ้นโดยใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ภาพเอกซเรย์เพื่อช่วยคำนวณหาระยะการปรับเครื่องฟลูออโรสโคป (โดยวิเคราะห์จากภาพเอกซเรย์ของรูยึดกระดูก) ว่าควรหมุนในทิศทางใดและหมุนไปเท่าใดจึงจะเห็นรูยึดกระดูกเป็นวงกลมที่สมบูรณ์ และคำนวณหาระยะการปรับหมุนเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายว่าควรปรับที่จุดใดและปรับเท่าใด (โดยวิเคราะห์จากภาพเอกซเรย์ที่ประกอบด้วยเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายและรูยึดกระดูก) เพื่อให้รูนำร่องรูปทรงกระบอกที่ใช้บอกทิศทางเจาะยึดกระดูก (ดังรูปที่ 1.8) ตรงกับแกนของรูยึดกระดูก



รูปที่ 1.10 เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายต่อเข้ากับเครื่องนำทางส่วนต้นที่ต่ออยู่กับตะปูได้โดยใช้ข้อต่อ และมีเครื่องช่วยปรับหมุนระยะไกลเป็นเครื่องช่วยปรับหมุนจุดปรับหมุนทั้ง 4

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการที่สำคัญที่ใช้ในการวิจัยนี้คือการวิเคราะห์ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปเพื่อหาโครงสร้างของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายและตะปู จากนั้นจึงนำไปคำนวณหาตำแหน่งใน 3 มิติที่เกิดขึ้นจริงของโครงสร้างเหล่านี้เพื่อแนะแนวทางในการยึดสกรูส่วนปลายของตะปู ในบทนี้จึงได้แบ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ส่วนคือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยยึดสกรูส่วนปลายของตะปูดังนี้

1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป

ในปัจจุบันมีงานวิจัยต่าง ๆ ในต่างประเทศหลายงานวิจัยที่สามารถใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับเครื่องฟลูออโรสโคปเป็นเครื่องมือช่วยในการผ่าตัดทางด้านออร์โทพีดิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยงานวิจัยเหล่านี้สามารถช่วยอำนวยความสะดวก เพิ่มความถูกต้อง ลดเวลาและลดปริมาณรังสีเอกซเรย์ที่ใช้ในการผ่าตัดได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงปัญหาต่าง ๆ และวิธีการแก้ปัญหาซึ่งล้วนต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพง ตัวอย่างดังงานวิจัยต่อไปนี้

1) ระบบ FRACAS [1] เป็นระบบที่ใช้ช่วยแนะแนวทางให้กับแพทย์ในกรณีรักษากระดูกหักโดยการผ่าตัดใส่ตะปูโดยใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับเครื่องฟลูออโรสโคปและเครื่อง CT-scan สร้างภาพความเป็นจริงเสมือน (Virtual reality) ทำให้แพทย์สามารถมองเห็นโครงสร้างของกระดูกใน 3 มิติได้

2) การใช้คอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการผ่าตัดใส่สกรูยึดกระดูกสันหลัง [2] งานวิจัยนี้จะใช้ภาพเอกซเรย์หลาย ๆ มุมมองร่วมกับอุปกรณ์นำทางหลายชิ้นซึ่งมีทั้งส่วนที่ติดไว้กับเครื่องฟลูออโรสโคปและส่วนที่ใช้อ้างอิงกับตำแหน่งของลำตัวผู้ป่วย

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในการนำภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปไปใช้ในการคำนวณคือภาพเอกซเรย์นั้นมีการเพี้ยนทางเรขาคณิตอันเนื่องมาจากกระบวนการสร้างภาพของเครื่องฟลูออโรสโคปเอง จึงได้มีงานวิจัยต่าง ๆ ที่พยายามแก้ปัญหานี้ ตัวอย่างดังงานวิจัยต่อไปนี้

1) Yao และคณะ [3] แก้ปัญหานี้โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมที่เยื่อมให้รังสีผ่านได้บางส่วน (Semi-radiolucent aluminum plate) ซึ่งถูกคว้านเป็นร่องลึกเป็นแถวหลาย ๆ แถวตัดกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนเป็นรูปตารางสี่เหลี่ยม นำไปติดเข้ากับส่วนรับรังสีเอกซเรย์ของเครื่องฟลูออโรสโคป แล้วจึงใช้จุดตัดของร่องลึกจากภาพเอกซเรย์ไปคำนวณเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพ

2) Joskowicz และคณะ [1] (ระบบ FRACAS) ใช้แผ่นโลหะผสมอลูมิเนียม (Aluminum alloy) เจาะรูรูปวงกลมหลาย ๆ รูอยู่ในแนวจุดตัดของรูปตารางสี่เหลี่ยม แล้วใช้จุดศูนย์กลางของรูเหล่านี้จากภาพเอกซเรย์ไปคำนวณเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพ

1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยยึดสกรูส่วนปลายของตะปู

งานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการช่วยยึดสกรูส่วนปลายของตะปูมีแนวคิดและวิธีการแก้ปัญหาที่แตกต่างกันไป ผลการทดสอบจากในแต่ละงานวิจัยก็ได้ผลที่ดีแต่ยังมีข้อจำกัดในการปฏิบัติตามแนวทาง

ของงานวิจัยเหล่านี้เนื่องจากต้องมีอุปกรณ์พิเศษหรือต้องมีอุปกรณ์ที่มีราคาแพง ดังงานวิจัยต่อไปนี้

1) **FRACAS: A System for Computer-Aided Image-Guided Long Bone Fracture Surgery** โดย L. Joskowicz C. Milgrom A. Simkin L. Tockus และ Z. Yaniv [1]

งานวิจัยนี้เสนอระบบที่มีชื่อว่า FRACAS เป็นระบบที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยแพทย์ในการผ่าตัดใส่ตะปู ระบบ FRACAS นี้มีจุดประสงค์เพื่อช่วยลดอันตรายจากรังสีในการผ่าตัดทั้งในส่วนของการใส่ตะปูและการยึดส่วนปลายของตะปูด้วย โดยจะเปลี่ยนจากการใช้ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปในการผ่าตัดมาใช้ภาพความเป็นจริงเสมือนแบบ 3 มิติของกระดูก ภาพความเป็นจริงเสมือนนี้จะถูกสร้างขึ้นจากเครื่อง CT-scan ก่อนที่แพทย์จะดำเนินการผ่าตัด ในระหว่างการผ่าตัดจะใช้ภาพจากเครื่องฟลูออโรสโคปในการติดตามและตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งของกระดูกและตะปูซึ่งจะถูกแสดงในภาพความเป็นจริงเสมือน ในการยึดส่วนปลายของตะปูจะมีเครื่องมือพิเศษที่ใช้ยึดตำแหน่งการยึดกระดูก โดยแพทย์จะปรับเครื่องมือนี้ให้ส่วนนำร่องเจาะตรงกับแกนรูยึดกระดูกแล้วจึงเจาะยึดกระดูกโดยดูจากภาพความเป็นจริงเสมือนเช่นกัน งานวิจัยนี้ได้ทดสอบกับสิ่งแวดล้อมจำลองที่ถูกสร้างขึ้นเลียนแบบการผ่าตัดจริง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์มีความถูกต้องเพียงพอที่สามารถปฏิบัติได้ในการผ่าตัดรักษาจริง

2) **Recovery of Distal Hole Axis in Intramedullary Nail Trajectory Planning** โดย Y. Zhu R. Phillips J. G. Griffiths W. Viant A. Mohsen และ M. Bielby [4]

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาแกนของรูยึดกระดูกส่วนปลายโดยเสนอขั้นตอนวิธีในการหาตำแหน่งและทิศทางของรูยึดกระดูกส่วนปลายในพิทัก 3 มิติ ในขั้นตอนแรกจะหาแกนของตะปูโดยใช้ภาพเอกซเรย์ 2 ภาพ จากนั้นหาแกนของรูยึดกระดูกส่วนปลายโดยคำนวณจากภาพเอกซเรย์ที่ถ่ายจากด้านข้าง (Lateral view) ของตะปูด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares method) ซึ่งวิธีนี้จะใช้หาจุดศูนย์กลางของรูยึดกระดูกส่วนปลายทั้งรูใกล้และรูไกลโดยวิธีการวนซ้ำ (Iteration) งานวิจัยนี้ได้ทดสอบขั้นตอนวิธีกับภาพเอกซเรย์จริงโดยใช้กระดูกเทียมและมีอุปกรณ์พิเศษที่ใช้กำหนดตำแหน่งใน 3 มิติของระบบ ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้อง

1.3 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางและสร้างต้นแบบในการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยแนะแนวทางการยึดส่วนปลายของตะปูยึดกระดูกภายในโดยวิเคราะห์จากภาพเอกซเรย์

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1) พัฒนาโปรแกรมต้นแบบเพื่อคำนวณหาระยะการปรับเครื่องฟลูออโรสโคปและเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายจากภาพเอกซเรย์ของเครื่องฟลูออโรสโคป
- 2) ใช้ตะปูยึดกระดูกภายในต้นขา (Femoral intramedullary nail) ของบริษัท Russell-Taylor และเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายของบริษัท Russell-Taylor

- 3) ทราบเส้นผ่าศูนย์กลางของตะปู้ยึดกระดูกภายในและรูยึดสกรูส่วนปลาย
- 4) ภาพเอกซเรย์ที่ใช้ในงานวิจัยมีลักษณะดังนี้
 - เป็นภาพระดับทามมีความเข้มของจุดภาพตั้งแต่ 0 ถึง 255
 - มองเห็นส่วนโค้งคล้ายวงรีเกิดจากการเหลื่อมกันของรูใกล้และรูไกลของรูยึดสกรูส่วนปลาย เต็มทั้งส่วนและชัดเจน
 - มองเห็นแผ่นเล็งของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย เต็มทั้งแผ่นและชัดเจน
 - ตะปู้ยึดกระดูกภายในและเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายภายในภาพเอกซเรย์ต้องอยู่หนึ่งไม่เคลื่อนไหว
- 5) ผลลัพธ์การปรับเครื่องฟลูออโรสโคปคือทิศทางและระยะเป็นองศาในการหมุนแขนรูปตัว C ของส่วนฉายเครื่องฟลูออโรสโคปรอบแกน x และแกน z
- 6) การทดลองใช้ตะปู้ยึดกระดูกภายในใส่เข้ากับกระดูกเทียม

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาขั้นตอนการผ่าตัดยึดกระดูกด้วยตะปู้ยึดกระดูกภายในรวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการผ่าตัด
- 2) ศึกษาลักษณะของภาพเอกซเรย์จากการผ่าตัดยึดสกรูส่วนปลายซึ่งเป็นภาพนำเข้าที่ใช้ในงานวิจัย
- 3) ศึกษาทฤษฎีและเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลและการวิเคราะห์ภาพและการนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยนี้
- 4) ทดลองนำทฤษฎีและเทคนิคในการประมวลผลและการวิเคราะห์ภาพมาประยุกต์ใช้
- 5) พัฒนาขั้นตอนวิธีในการหาตำแหน่งทิศทางของแกนรูยึดสกรูส่วนปลายและตำแหน่งของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายจากภาพเอกซเรย์
- 6) พัฒนาโปรแกรมซึ่งเป็นต้นแบบเพื่อช่วยหาวิธีการปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายให้ตรงกับรูยึดสกรูส่วนปลายของตะปู้ยึดกระดูกภายใน
- 7) ทดสอบและวิเคราะห์ผล
- 8) สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง
- 9) จัดทำรายงาน

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

ผลจากงานวิจัยนี้คือได้ต้นแบบซึ่งเป็นแนวทางช่วยให้สามารถใช้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายในการยึดกระดูกส่วนปลายได้สะดวกและปลอดภัยขึ้น

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการวิจัย และประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยไว้แล้วในบทที่ 1 สำหรับบทที่ 2 จะได้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ส่วนวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ส่วนหลักคือการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป การคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป และการคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทที่ 3 4 และ 5 ตามลำดับ

ส่วนบทที่ 6 และ 7 เป็นส่วนของการทดลอง การวิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง ตลอดจนการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากงานวิจัยนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้นำการประมวลผลและการวิเคราะห์ภาพมาประยุกต์ใช้กับภาพเอกซเรย์ของเครื่องฟลูออโรสโคปเพื่อหาวิธีปรับตำแหน่งของเครื่องฟลูออโรสโคปให้เห็นภาพฉายของรูยัดสกรูซ้อนทับกันเป็นวงกลมที่สมบูรณ์และหาวิธีปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายให้ตรงกับรูยัดสกรูที่ซ้อนทับกันเป็นวงกลมที่สมบูรณ์แล้ว ความรู้และทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยประกอบด้วยภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric transformations) (นำไปใช้ในการปรับแก้การเพี้ยนของภาพเอกซเรย์) การวิเคราะห์ภาพ (Image analysis) และเรขาคณิตเชิงภาพฉายเปอร์สเปคทีฟ (Perspective projection geometry) ดังต่อไปนี้

2.1 ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป

ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปมีความสำคัญอย่างยิ่งในการแพทย์ทางด้านออร์โทพีดิกส์ (Orthopaedics) โดยได้ถูกนำไปใช้เพื่อให้แพทย์สามารถมองเห็นกระดูกและอุปกรณ์ทางการแพทย์อื่น ๆ ซึ่งอยู่ภายในร่างกายของผู้ป่วยในขณะผ่าตัด ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปนี้เป็นภาพ 2 มิติซึ่งเกิดจากการฉายของวัตถุจริงใน 3 มิติ ดังนั้นในขณะดำเนินการผ่าตัด แพทย์จะมองภาพ 2 มิติในมุมมองต่าง ๆ และจินตนาการถึงรูปร่างและตำแหน่งจริงใน 3 มิติของวัตถุ

2.1.1 ภาพเอกซเรย์ [5]

การสร้างภาพจากรังสีเอกซ์เกิดจากแนวความคิดในการใช้รังสีเอกซ์เพื่อสร้างภาพที่สามารถมองเห็นรูปร่างของวัตถุที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าได้เช่น กระดูกที่อยู่ในขาผู้ป่วย เป็นต้น รังสีเอกซ์เป็นรังสีที่มีความสามารถผ่านทะลุสูงโดยวิ่งเป็นเส้นตรงและแพร่ออกเมื่อกระทบกับวัตถุ วัตถุแต่ละชนิดจะมีอัตราการเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน มีผลให้เกิดภาพบนฟิล์มที่รับรังสีจากการแพร่

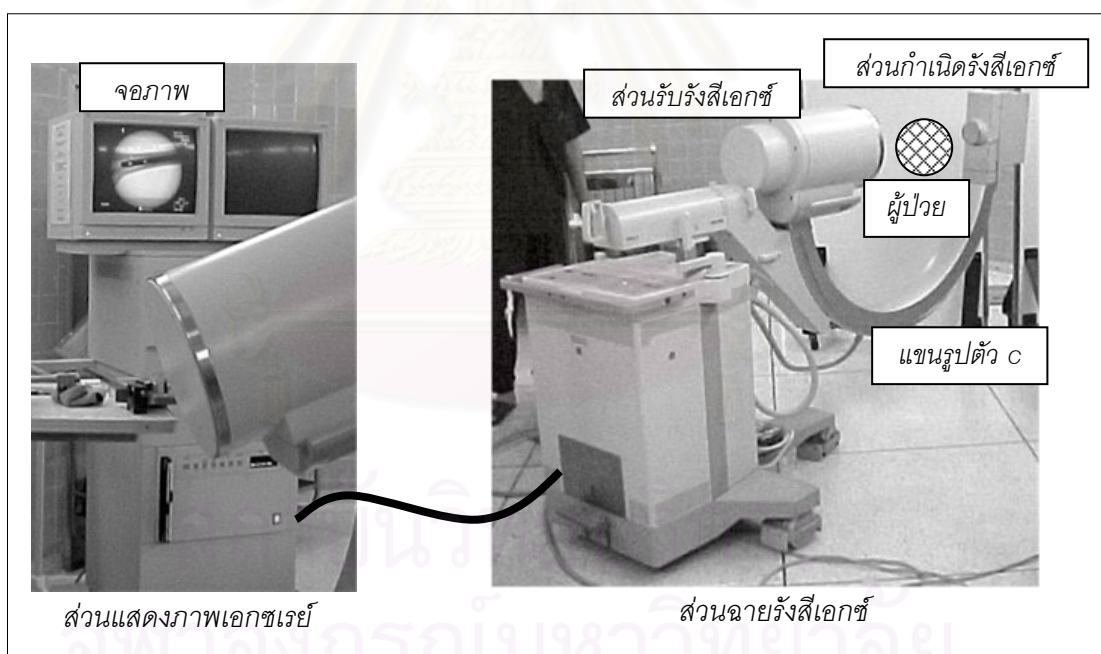
รังสีเอกซ์ที่ถูกส่งออกไปจะต้องมีระบบที่รับรังสี โดยทั่วไปจะใช้ฟิล์มหรือฉากรังสีและฟิล์มรวมกันเป็นตัวรับ ในการใช้ฉากรังสี ฉากรังสีจะเป็นตัวเปลี่ยนรังสีเอกซ์ให้เป็นแสงและภาพจะถูกสร้างขึ้นบนฟิล์ม ซึ่งวิธีนี้จะใช้รังสีน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ไม่ใช้ฉาก

เมื่อรังสีเอกซ์ที่ส่งออกมาตกลงที่ระบบรับรังสี ภาพจะถูกทำให้มองเห็นได้โดยระบบประมวลผลสองแบบคือ แบบที่ใช้ระบบประมวลผลทางเคมีโดยเกิดภาพลงบนฟิล์ม และอีกแบบที่ใช้คอมพิวเตอร์ซึ่งต้องมีขั้นตอนวิธีในการสร้างภาพ

การเอกซเรย์โดยเครื่องฟลูออโรสโคปนั้นใช้ตัวรับรังสีเอกซ์เป็นฉากเรืองแสงซึ่งจะเรืองแสงเมื่อถูกชนโดยรังสีเอกซ์ ฉากเรืองแสงนี้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของหลอดภาพที่มีความซับซ้อนสูงเรียกว่าตัวสร้างภาพ (Image intensifier) ซึ่งภาพที่ได้จากหลอดภาพนี้สามารถถูกบันทึกลงบนแถบแม่เหล็กหรือฟิล์มได้ โดยลักษณะของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปนั้น ส่วนของวัตถุที่รังสีเอกซ์ผ่านได้น้อยกว่าจะมีสีมืดกว่าส่วนของวัตถุที่รังสีผ่านได้มากกว่า

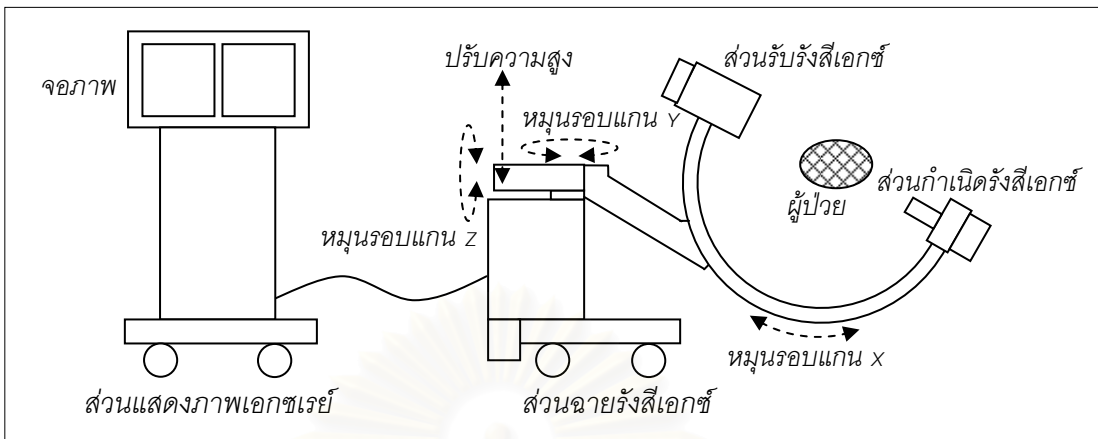
2.1.2 การเอกซเรย์ด้วยเครื่องฟลูออโรสโคป

การเอกซเรย์ด้วยเครื่องฟลูออโรสโคปต่างจากการเอกซเรย์โดยทั่วไปเนื่องจากสามารถเห็นภาพเอกซเรย์ได้แบบทันกาล (Real-time) แทนการใช้ฟิล์ม ส่วนประกอบหลักของเครื่องฟลูออโรสโคปแสดงดังรูปที่ 2.1 ประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนแสดงภาพเอกซเรย์ซึ่งรับสัญญาณภาพและแสดงภาพออกที่จอภาพและส่วนฉายรังสีเอกซ์ซึ่งประกอบด้วยแขนรูปตัว C (C-arm) ที่สามารถปรับหมุนให้เห็นภาพในมุมมองต่าง ๆ ได้ โดยมีส่วนกำเนิดรังสีเอกซ์และส่วนรับรังสีเอกซ์ติดอยู่ที่แต่ละด้านของแขนรูปตัว C นี้ และคร่อมอยู่ระหว่างลำตัวของผู้ป่วย



รูปที่ 2.1 เครื่องฟลูออโรสโคปของบริษัท Philips รุ่น BV29

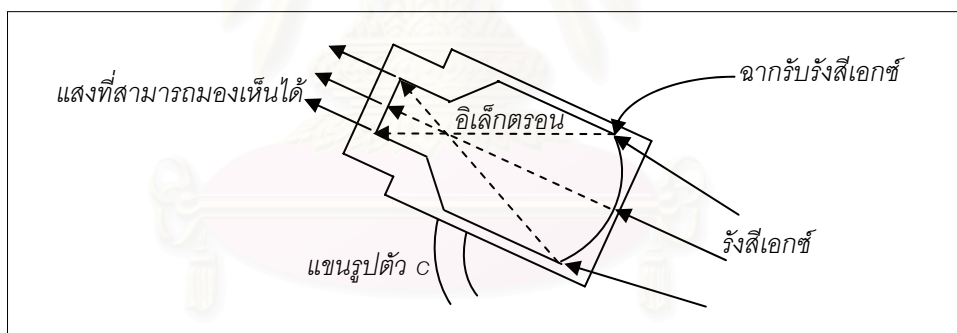
การปรับตำแหน่งของเครื่องฟลูออโรสโคปเพื่อให้เห็นวัตถุในมุมมองต่าง ๆ ที่ต้องการนั้นสามารถทำได้โดยปรับที่ส่วนฉายรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 2.2 คือ การปรับเลื่อนในแนวพื้นทำได้โดยเลื่อนส่วนฉายด้วยล้อเลื่อน และการปรับแขนรูปตัว C โดยสามารถปรับเลื่อนความสูงของแขนรูปตัว C และปรับแขนรูปตัว C ให้หมุนรอบแกน x y และ z สำหรับเครื่องฟลูออโรสโคปของบริษัท Philips รุ่น BV29 ที่ใช้ใน งานวิจัยนี้มีซีตบอกระยะในการปรับแสดงเป็นองศาเฉพาะที่หมุนรอบแกน x และ z เท่านั้น



รูปที่ 2.2 การปรับตำแหน่งการฉายรังสีเอกซ์ของเครื่องฟลูออโรสโคปของบริษัท Philips รุ่น BV29

2.1.3 การกำเนิดภาพเอกซเรย์ของเครื่องฟลูออโรสโคป

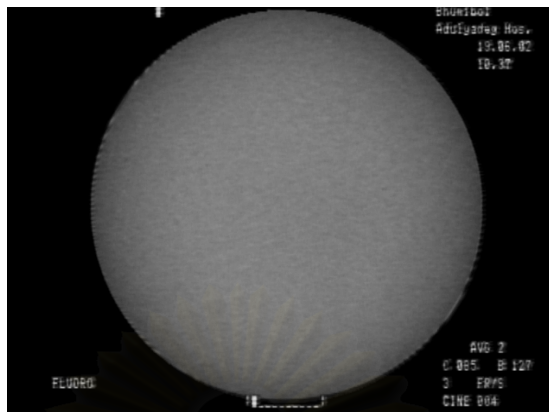
เครื่องฟลูออโรสโคปให้กำเนิดภาพเอกซเรย์จากส่วนรับรังสีเอกซ์ ซึ่งภายในมีตัวสร้างภาพบรรจุอยู่ แสดงภาพตัดขวางดังรูปที่ 2.3 รังสีเอกซ์จะถูกเปลี่ยนเป็นอิเล็กตรอนโดยฉากรับรังสีเอกซ์และผลลัพธ์สุดท้ายจะเป็นเป็นแสงที่สามารถมองเห็นได้ [6]



รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางของส่วนรับรังสีเอกซ์ของเครื่องฟลูออโรสโคปแสดงให้เห็นตัวสร้างภาพ

เนื่องจากฉากรับรังสีเอกซ์ของตัวสร้างภาพเป็นรูปวงกลมที่มีพื้นผิวโค้ง ดังนั้นภาพเอกซเรย์บริเวณที่นำไปใช้งานได้จึงอยู่ภายในบริเวณวงกลมขนาดใหญ่ของภาพที่ได้จากเครื่องฟลูออโรสโคปเท่านั้น ดังจะเห็นได้จากบริเวณวงกลมสีอ่อนของภาพเอกซเรย์เปล่าในรูปที่ 2.4

ความโค้งของพื้นผิวของฉากมีผลกับภาพเอกซเรย์ 2 ประการ ประการแรกคือมีผลกับความเข้มของภาพ โดยภาพในบริเวณที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางจะสว่างกว่าบริเวณที่อยู่ไกลจากจุดศูนย์กลาง (จะเห็นได้จากรูปที่ 2.4) และประการที่ 2 เกิดความเพี้ยนทางเรขาคณิตโดยมีผลทำให้อัตราส่วนของระยะในภาพของแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน กล่าวคืออัตราส่วนจะขยายมากขึ้นเมื่ออยู่ไกลจากจุดศูนย์กลางภาพ ตัวอย่างเช่น ภาพของวัตถุชิ้นเดียวกันจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออยู่ในตำแหน่งที่ไกลจากจุดศูนย์กลางมากขึ้น



รูปที่ 2.4 ภาพเอกซเรย์เปล่า บริเวณวงกลมสีเทาอ่อนขนาดใหญ่คือภาพเอกซเรย์ที่เกิดขึ้นจริง จากเครื่องฟลูออโรสโคป

2.2 การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformation)

เนื่องจากภาพเอกซเรย์ที่เกิดจากเครื่องฟลูออโรสโคปมีการเพี้ยนทางเรขาคณิตดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 2.1.3 ในงานวิจัยนี้จึงแก้ไขการเพี้ยนที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธีการแปลงเชิงเรขาคณิต

กระบวนการแปลงเชิงเรขาคณิตจะปรับปรุงความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ (Spatial relationships) ระหว่างจุดภาพในภาพ ซึ่งมักจะถูกเรียกว่าการแปลงแบบแผ่นยาง (Rubber-sheet transformations) เนื่องจากสามารถทำความเข้าใจกระบวนการนี้ได้ในการทำงานเดียวกันกับการพิมพ์ภาพลงบนแผ่นของยาง แล้วยืดแผ่นยางตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น ในการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลนั้น การแปลงเชิงเรขาคณิตประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน 2 กระบวนการคือ การแปลงเชิงพื้นที่ (Spatial transformation) และการประมาณค่าในช่วงของค่าระดับเทา (Gray-level interpolation) [7] ดังต่อไปนี้

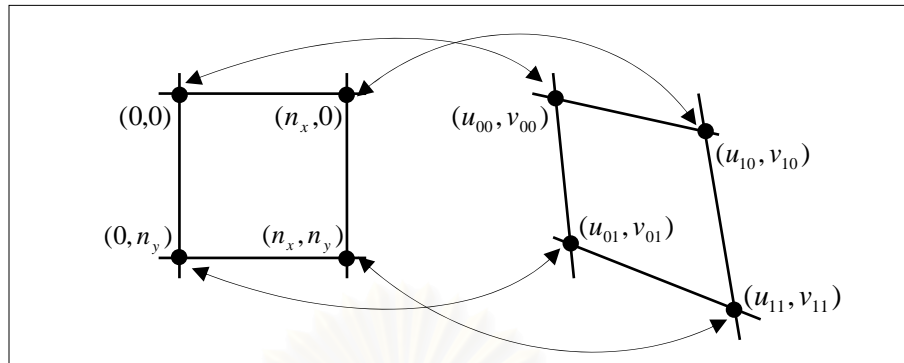
2.2.1 การแปลงเชิงพื้นที่ (Spatial Transformation)

กำหนดให้ตำแหน่งของจุดภาพที่พิกัดจริง (x, y) เกิดการเพี้ยนทางเรขาคณิตซึ่งทำให้ตำแหน่งเปลี่ยนไปเป็นพิกัด (u, v) และเลือกให้กระบวนการของการเพี้ยนนี้เป็นรูปแบบของการแปลงแบบเชิงเส้นคู่ (Bilinear transformation) [8] ดังสมการที่ 2.1

$$\begin{aligned} u &= c_1x + c_2y + c_3xy + c_4 \\ v &= c_5x + c_6y + c_7xy + c_8 \end{aligned} \quad \dots (2.1)$$

เมื่อ c_1, c_2, \dots, c_8 คือพารามิเตอร์ของการแปลงแบบเชิงเส้นคู่

จากสมการที่ 2.1 ถ้ากำหนดให้ตำแหน่งของจุดภาพที่พิกัด $(0,0)$ $(n_x,0)$ $(0,n_y)$ และ (n_x,n_y) การเพี้ยนทางเรขาคณิตทำให้ตำแหน่งเปลี่ยนไปอยู่ที่ (u_{00},v_{00}) (u_{10},v_{10}) (u_{01},v_{01}) และ (u_{11},v_{11}) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.5 จึงสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.2



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของจุดภาพที่เกิดการเพี้ยน

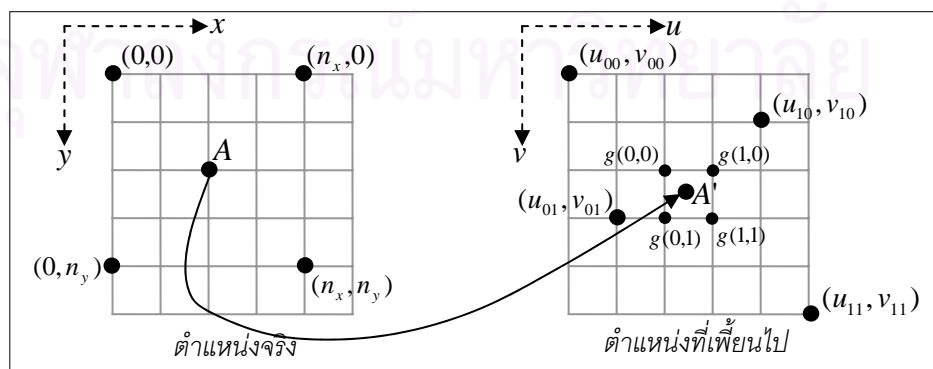
$$\begin{aligned}
 u &= u_{00} + (u_{10} - u_{00}) \frac{x}{n_x} + (u_{01} - u_{00}) \frac{y}{n_y} + (u_{11} - u_{10} - u_{01} + u_{00}) \frac{xy}{n_x n_y} \\
 v &= v_{00} + (v_{10} - v_{00}) \frac{x}{n_x} + (v_{01} - v_{00}) \frac{y}{n_y} + (v_{11} - v_{10} - v_{01} + v_{00}) \frac{xy}{n_x n_y}
 \end{aligned} \quad \dots (2.2)$$

2.2.2 การประมาณค่าในช่วงของค่าระดับเทา (Gray-Level Interpolation)

จากหัวข้อที่ 2.2.1 การคำนวณนั้นจะทำจากตำแหน่งจริงกลับไปว่าตรงกับตำแหน่งใดในภาพที่เพี้ยนไป ซึ่งมักจะได้ผลลัพธ์คือตำแหน่งของจุดภาพเป็นค่าจำนวนจริงและอยู่ระหว่างจุดของภาพที่เพี้ยนไป แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.6 จึงทำให้ต้องมีการประมาณค่าในช่วงของค่าระดับเทาของตำแหน่งที่คำนวณได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้นคู่ (Bilinear interpolation) เพื่อหาค่าระดับเทาซึ่งเป็นตัวแทนจากภาพ [9] ดังสมการที่ 2.3

$$f(u, v) = \alpha u + \beta v + \gamma uv + \delta \quad \dots (2.3)$$

เมื่อ $f(u, v)$ คือค่าระดับเทาของพิกัด (u, v) และ α β γ และ δ คือพารามิเตอร์ของการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้นคู่



รูปที่ 2.6 การคำนวณจากตำแหน่งจริง A ได้ผลลัพธ์เป็นตำแหน่ง A' ในภาพที่เพี้ยน

จากสมการที่ 2.3 และรูปที่ 2.6 กำหนดให้จุด A' มีค่าระดับเทาคือ $f(u, v)$ โดยตำแหน่งบนซ้ายมีค่าระดับเทา $g(0,0) = f(\lfloor u \rfloor, \lfloor v \rfloor)$ ตำแหน่งบนขวามีค่าระดับเทา $g(1,0) = f(\lfloor u \rfloor + 1, \lfloor v \rfloor)$ ตำแหน่งล่างซ้ายมีค่าระดับเทา $g(0,1) = f(\lfloor u \rfloor, \lfloor v \rfloor + 1)$ ตำแหน่งล่างขวามีค่าระดับเทา $g(1,1) = f(\lfloor u \rfloor + 1, \lfloor v \rfloor + 1)$ และกำหนดให้ $u' = u - \lfloor u \rfloor$ และ $v' = v - \lfloor v \rfloor$ ดังนั้นค่าระดับเทาของจุด A' คำนวณได้ดังสมการที่ 2.4

$$f(u, v) = \begin{aligned} & [g(1,0) - g(0,0)]u' + [g(0,1) - g(0,0)]v' \\ & + [g(1,1) + g(0,0) - g(0,1) - g(1,0)]u'v' + g(0,0) \end{aligned} \quad \dots (2.4)$$

2.3 การประมวลผลและการวิเคราะห์ภาพ (Image Processing and Analysis)

การวิเคราะห์ภาพคือขั้นตอนหนึ่งในการประมวลผลภาพดิจิทัล ซึ่งเป็นการดำเนินการกับภาพด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อแก้ปัญหาให้ง่ายขึ้นและอธิบายภาพเพื่อตอบคำถามที่เกิดขึ้น โดยได้ถูกนำไปใช้กับภาพทุกชนิดและมีระดับของความสำเร็จที่แตกต่างกันไป

2.3.1 การกรองสัญญาณรบกวน (Noise Filtering) [10]

การกรองสัญญาณรบกวนมีความสำคัญต่อการคำนวณกับค่าของจุดภาพซึ่งอาจเกิดการเพี้ยนจากผลของสัญญาณรบกวน วิธีการทั่วไปที่สามารถทำให้สัญญาณรบกวนเรียบลงได้คือการกรองแบบเชิงเส้น (Linear filtering) ทำได้โดยใช้เมทริกซ์คางที่เรียกว่าหน้ากาก (Mask) ทำการคอนโวลูท (Convolute) เพื่อเฉลี่ยค่าของจุดภาพ

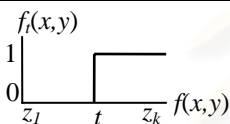
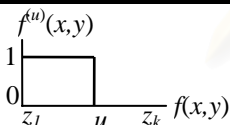
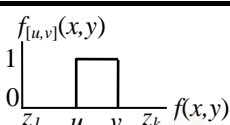
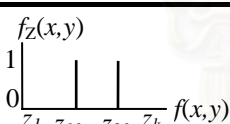
การทำให้เรียบด้วยวิธีเกาส์เซียน (Gaussian smoothing) เป็นการกรองแบบเชิงเส้นวิธีหนึ่งโดยค่าในหน้ากากแบบ 2 มิติที่เป็นตัวกรองอยู่รูปฟังก์ชันเกาส์เซียน และหน้ากากนี้ยังมีคุณสมบัติแบ่งแยกได้ (Separability) ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังสมการที่ 2.5

$$\begin{aligned} f_G(x, y) &= f(x, y) * G(x, y) \\ &= \sum_{h=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \sum_{k=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} G(h, k) f(x-h, y-k) \\ &= \sum_{h=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \sum_{k=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} e^{-\frac{h^2+k^2}{2\delta^2}} f(x-h, y-k) \\ &= \sum_{h=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} e^{-\frac{h^2}{2\delta^2}} \sum_{k=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} e^{-\frac{k^2}{2\delta^2}} f(x-h, y-k) \end{aligned} \quad \dots (2.5)$$

- เมื่อ $f(x, y)$ คือภาพที่จะทำให้เรียบ
 $f_G(x, y)$ คือภาพที่ทำให้เรียบแล้ว
 $G(x, y)$ คือหน้ากากที่สมาชิกมีค่าอยู่ในรูปฟังก์ชันเกาส์เซียน
 m คือขนาดของหน้ากาก
 δ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันเกาส์เซียน

2.3.2 การหาค่าขีดแบ่ง (Thresholding) [11]

วิธีที่เป็นรู้จักกันดีในการแบ่งแยกวัตถุจากภาพคือการแบ่งส่วนภาพโดยใช้ค่าขีดแบ่งภาพ โดยถ้ามีภาพ f ซึ่งมีค่าระดับเทาอยู่ในช่วง $[z_1, \dots, z_k]$ และ t เป็นจำนวนใด ๆ ที่อยู่ระหว่าง z_1 และ z_k ผลจากการแบ่งส่วนภาพ f ด้วยค่าขีดแบ่ง t คือภาพ f_t ซึ่งมีค่าสองค่าดังสมการที่ 2.6

| | |
|---|---|
|  | $f_t(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x, y) \geq t \\ 0 & \text{if } f(x, y) < t \end{cases} \quad \dots (2.6)$ |
|  | $f^{(u)}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x, y) \leq u \\ 0 & \text{if } f(x, y) > u \end{cases} \quad \dots (2.7)$ |
|  | $f_{[u,v]}(x, y) = \begin{cases} 1 & u \leq f(x, y) \leq v \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots (2.8)$ |
|  | $f_Z(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x, y) \in Z \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots (2.9)$ |

การดำเนินการหาค่าขีดแบ่งสามารถพิจารณาในรูปแบบของการจัดให้ค่าระดับเทาที่อยู่ในช่วงที่ต้องการมีค่าเป็น 1 และค่าระดับเทาที่อยู่นอกเหนือช่วงที่ต้องการมีค่าเป็น 0 ตัวอย่างภาพที่มีค่าสองค่า $f^{(u)}$ และ $f_{[u,v]}$ กำหนดได้ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

แต่ถ้า Z เป็นเซตของค่าระดับเทา โดย $Z \subseteq [z_1, \dots, z_k]$ การดำเนินการหาค่าขีดแบ่งโดยจัดให้ค่าระดับเทาที่อยู่ใน Z มีค่าเป็น 1 และค่าระดับเทาที่ไม่อยู่ใน Z มีค่าเป็น 0 แสดงดังสมการที่ 2.9

2.3.3 การประมวลผลภาพเชิงสัณฐานวิทยา (Morphological Image Processing) [7]

วิธีการประมวลผลภาพเชิงสัณฐานวิทยาใช้หลักการของสัณฐานวิทยาทางคณิตศาสตร์ (Mathematical morphology) เป็นเครื่องมือในการแบ่งแยกเอาส่วนประกอบของภาพซึ่งเป็นประโยชน์ในการแสดงและอธิบายรูปร่างของพื้นที่

สัจฐานวิทยาทางคณิตศาสตร์นั้นอาศัยทฤษฎีเรื่องเซตในการแสดงเทคนิคต่าง ๆ ซึ่งเซตนี้จะเป็นตัวแทนของวัตถุต่าง ๆ โดยในภาพลักษณะฐานสอง (Binary image) นั้นเซตคือสมาชิกของปริภูมิเลขจำนวนเต็ม (Integer space) แบบ 2 มิติ Z^2 เมื่อสมาชิกแต่ละตัวของเซตคือจุดภาพที่มีพิกัด (x, y)

นิยามเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับสัจฐานวิทยาที่ไม่ปรากฏทั่วไปในทฤษฎีเรื่องเซตมี 2 นิยามคือการสะท้อน (Reflection) ของเซต B แสดงด้วย \hat{B} นิยามดังสมการที่ 2.10

$$\hat{B} = \{w \mid w = -b, \text{ for } b \in B\} \quad \dots (2.10)$$

การเลื่อนขนาน (Translation) ของเซต A โดยจุด $z = (z_1, z_2)$ แสดงด้วย $(A)_z$ นิยามดังสมการที่ 2.11

$$(A)_z = \{c \mid c = a + z, \text{ for } a \in A\} \quad \dots (2.11)$$

เทคนิคทางสัจฐานวิทยาพื้นฐานที่ใช้สำหรับการประมวลผลก่อนขั้นตอนดำเนินงาน (Preprocessing) ที่จะอธิบายในหัวข้อนี้มีดังนี้

1) การขยายขนาด (Dilation)

กำหนดให้ A และ B คือเซตที่อยู่ใน Z^2 การขยายขนาดของ A ด้วย B แสดงด้วย $A \oplus B$ นิยามดังสมการที่ 2.12

$$A \oplus B = \{z \mid [(B)_z \cap A] \subseteq A\} \quad \dots (2.12)$$

เมื่อเซต B คือสมาชิกของโครงสร้าง (Structuring element) ในการขยายขนาด เช่นเดียวกันกับกระบวนการทางสัจฐานวิทยาอื่น ๆ

2) การกร่อน (Erosion)

กำหนดให้ A และ B คือเซตที่อยู่ใน Z^2 การกร่อนของ A ด้วย B แสดงด้วย $A \ominus B$ นิยามดังสมการที่ 2.13

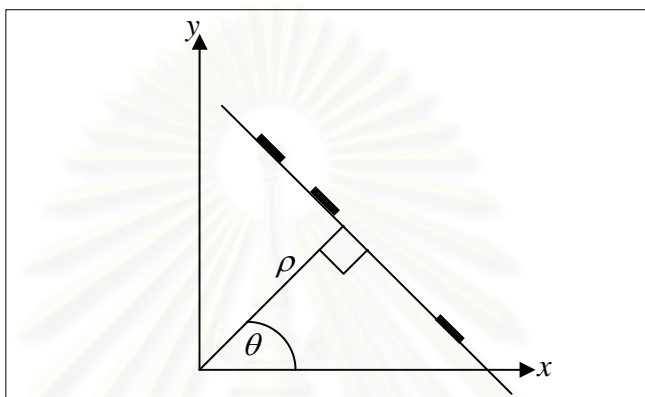
$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\} \quad \dots (2.13)$$

2.3.4 การอธิบายเส้น (Line Descriptions)

วิธีที่ใช้ในการอธิบายเส้นหรือภาพที่มีลักษณะคล้ายเส้นมีอยู่หลายวิธี วิธีการโดยทั่วไปจะจัดให้ภาพอยู่ในรูปของเส้นตรงเส้นเดียวหรือหลายเส้นหรืออาจเป็นเส้นโค้งก็ได้ ปัญหาที่เกิดขึ้นก็คือทำอย่างไรจึงจะสามารถจัดเส้นให้กับภาพได้ เมื่อสมมติให้เซตของจุดภาพที่ต้องการจะจัดเส้นอยู่ในระนาบ $x - y$ วิธีการแก้ปัญหอย่างง่ายมีดังต่อไปนี้

1) การแปลงจุดให้เป็นส่วนโค้ง [12]

การแปลงจุดให้เป็นส่วนโค้งคือการจัดจำนวนของส่วนโค้งที่ยังไม่ตัดสินใจให้กับจุด n จุด คือ $\{(x_i, y_i)\}$ โดยที่ $i = 1, \dots, n$ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวิธี Hough transform โดยวิธีนี้จะเปลี่ยนจุด (x_i, y_i) ให้อยู่ในรูปของส่วนโค้งแล้วส่งเข้าไปในปริภูมิของพารามิเตอร์ (Parameter space) ซึ่งจะทำให้จุดที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกันถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันจากจุดตัดของส่วนโค้งเหล่านี้ได้



รูปที่ 2.7 พารามิเตอร์ของเส้นตรง

ตัวอย่างดังรูปที่ 2.7 แสดงการกำหนดพารามิเตอร์ให้กับเส้นตรงในระนาบ $x - y$ โดย θ คือมุมของเส้นปกติที่มีระยะทาง ρ จากจุดกำเนิด โดยมีสมการของเส้นตรงแสดงดังสมการที่ 2.14

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad \dots (2.14)$$

ต่อมาส่งแต่ละจุด (x_i, y_i) เข้าไปยังส่วนโค้งในระนาบ $\theta - \rho$ ดังสมการที่ 2.15

$$\rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta \quad \dots (2.15)$$

การเปลี่ยนรูปให้เป็นอย่างสมการที่ 2.15 ทำได้โดยกำหนดให้แต่ละจุด (x_i, y_i) คงที่ ส่วน (θ, ρ) เป็นตัวแปร โดยถ้ามีจุด (x_i, y_i) หลาย ๆ จุดในระนาบ $x - y$ วางอยู่บนเส้น $x \cos \theta + y \sin \theta = \rho_0$ แสดงว่าจุดเหล่านี้เป็นส่วนโค้งในระนาบ $\theta - \rho$ ซึ่งจะต้องผ่านและตัดกันที่จุด (θ_0, ρ_0) และดังสมการที่ 2.16 เมื่อจุด (x_i, y_i) วางอยู่บนส่วนโค้งที่กำหนดโดย (θ_0, ρ_0)

$$\rho = x_i \cos \theta + \left[\frac{\rho_0 - x_i \cos \theta_0}{\sin \theta_0} \right] \sin \theta \quad \dots (2.16)$$

สมการที่ 2.16 จะถูกต้องได้โดย $\theta = \theta_0$ และ $\rho = \rho_0$ ดังนั้นจุด (x_i, y_i) ที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกันจะผ่านจุด (θ_0, ρ_0) เสมอ

2) การจัดวงรีให้กับจุดภาพ [10]

วัตถุใน 3 มิติที่มีรูปร่างเป็นวงกลมในระนาบนั้นเมื่อปรากฏอยู่ในภาพ 2 มิติจะมีรูปร่างเป็นรูปวงรี ด้วยสาเหตุนี้การตรวจหาวงรีในภาพจึงเป็นประโยชน์สำหรับงานทางด้านคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer vision) โดยทั่วไปแล้วการตรวจหาวงรีจะพิจารณาจุดภาพที่เป็นขอบภาพจากนั้นจึงหาวงรีที่ดีที่สุดที่สามารถจัดให้กับจุดภาพเหล่านั้นได้

ปัญหาในการจัดวงรีให้กับจุดภาพสามารถนิยามได้โดยกำหนดให้ p_1, \dots, p_N คือเซตของจุดภาพ N จุดภาพ, $p_i = [x_i, y_i]^T$, $X = [x^2, xy, y^2, x, y, 1]^T$ และ $P = [x, y]^T$ ดังนั้นสมการทั่วไปของวงรีที่กำหนดโดยเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ $A = [a, b, c, d, e, f]^T$ กำหนดดังสมการที่ 2.17

$$f(P, A) = X^T A = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad \dots (2.17)$$

การหาเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ A_0 ที่สัมพันธ์กับวงรีที่เหมาะสมกับจุดภาพ p_1, \dots, p_N ที่สุดนั้นสามารถนิยามในรูปกำลังสองน้อยที่สุดได้คือ $\min_A \sum_{i=1}^N [D(p_i, A)]^2$ เมื่อ $D(p_i, a)$ คือระยะทางที่เหมาะสม

ระยะทางแบบหนึ่งที่ถูกใช้ในการจัดวงรีให้กับจุดภาพคือระยะทางพีชคณิต (Algebraic distance) ซึ่งจะเปลี่ยนปัญหาให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถแก้ปัญหาได้ง่ายขึ้น โดยจะเปลี่ยนจาก $\min_A \sum_{i=1}^N [D(p_i, A)]^2$ ให้เป็น $\min_A \sum_{i=1}^N |X_i^T A|^2$

จากนั้นจึงกำหนดเงื่อนไขในการแก้ปัญหาเพื่อให้คำตอบที่ได้เป็นวงรีเท่านั้น ดังสมการที่ 2.18

$$b^2 - 4ac = A^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} A = A^T C A = -1 \quad \dots (2.18)$$

ดังนั้นสามารถนิยามปัญหาได้ใหม่ดังสมการที่ 2.19

$$\min_A \|A^T X^T X A\| = \min_A \|A^T S A\| \quad \dots (2.19)$$

$$\text{เมื่อ } X = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_N^2 & x_N y_N & y_N^2 & x_N & y_N & 1 \end{bmatrix}$$

ในหลักวิชาทางด้านวิธีกำลังสองน้อยที่สุดนั้น X เรียกว่าเมทริกซ์แบบแผน (Design matrix) ส่วน $S = X^T X$ เรียกว่าเมทริกซ์ขงาย (Scatter matrix) และ C เรียกว่าเมทริกซ์เงื่อนไขบังคับ (Constraint matrix) และเมื่อใช้ตัวคูณลากรองจ์ (Lagrange multipliers) λ และหาอนุพันธ์ มีผลทำให้สมการที่ 2.19 หาคำตอบได้ตั้งสมการที่ 2.20

$$SA = \lambda CA \quad \dots (2.20)$$

ปัญหาในการหาคำตอบจากสมการที่ 2.20 เรียกว่าปัญหาค่าเจาะจงแบบวงนัยทั่วไป (Generalized eigenvalue problem) โดยคำตอบ A_0 ที่ได้นั้นคือเวกเตอร์เจาะจงที่สัมพันธ์กับค่าเจาะจงที่เป็นลบ

2.3.5 การตรวจหาขอบภาพ (Edge Detection)

การตรวจหาขอบภาพคือกระบวนการเพื่อหาขอบเขตและกำหนดตำแหน่งในภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้ม (Intensity) ของภาพอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการหาพีค (Peak) ของอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง (First directional derivative) และการหาจุดผ่านศูนย์ (Zero-crossing) ของอนุพันธ์ลำดับที่สอง (Second directional derivative) ของภาพ [13]

1) ตัวดำเนินการเกรเดียนต์ (Gradient Operator) [7]

อนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของภาพดิจิทัลคำนวณได้จากการประมาณค่าเกรเดียนต์ใน 2 มิติ โดยเกรเดียนต์ของภาพ $f(x, y)$ ที่ตำแหน่ง (x, y) คือคุณสมบัติซึ่งแสดงความแตกต่างของระดับความเข้มภาพตั้งสมการที่ 2.21

$$\nabla f = (G_x, G_y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right) \quad \dots (2.21)$$

ปริมาณที่สำคัญในการตรวจหาขอบภาพคือขนาด (Magnitude) เวกเตอร์ของเกรเดียนต์ซึ่งแสดงปริมาณการเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มภาพ โดยทั่วไปแล้วขนาดเกรเดียนต์ยกกำลังสอง (Squared gradient magnitude) ตั้งสมการที่ 2.22 หรือค่าสัมบูรณ์ตั้งสมการที่ 2.23 จะถูกใช้ในงานการประมวลผลภาพเพื่อหลีกเลี่ยงการคำนวณหาค่ารากที่สอง

$$\|\nabla f\|^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \quad \dots (2.22)$$

$$\|\nabla f\| = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \quad \dots (2.23)$$

ทิศทางคืออีกคุณสมบัติหนึ่งที่เป็นปริมาณที่สำคัญ กำหนดให้ $\alpha(x, y)$ แสดงมุมของทิศทางของเวกเตอร์ ∇f ที่ตำแหน่ง (x, y) ดังสมการที่ 2.24

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{G_y}{G_x} \right) \quad \dots (2.24)$$

2) ลาปลาเซียน (The Laplacian) [7]

ตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์ลำดับที่สองของฟังก์ชันสองมิติคือลาปลาเซียนของภาพ $f(x, y)$ กำหนดได้ดังสมการที่ 2.25

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad \dots (2.25)$$

ตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์ลำดับที่สองนี้สมมาตรในแบบการหมุน (Rotationally symmetric) และยังคงรักษาเครื่องหมายความแตกต่างของความสว่างระหว่างขอบภาพไว้ด้วย โดยจุดผ่านศูนย์ (จุดที่เครื่องหมายเปลี่ยน) ของ $\nabla^2 f$ คือจุดที่แสดงถึงความเป็นขอบในภาพ และเครื่องหมายบวกลบแสดงถึงด้านของขอบที่สว่างกว่า

3) การตรวจหาขอบภาพด้วยวิธีแคนนี่ (Canny Edge Eetection)

ตัวดำเนินการหาขอบภาพแคนนี่นั้นถูกสร้างขึ้นโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้ตัวดำเนินการหาขอบภาพที่ดีที่สุดซึ่งมีหลักเกณฑ์คือ [9]

- มี SNR (Signal to Noise Ratio) ที่ดี
- ขอบภาพที่หาได้ควรเป็นขอบภาพที่มีอยู่จริง
- สัญญาณรบกวนควรถูกแสดงออกมาว่าเป็นขอบน้อยที่สุด

โดยขั้นตอนวิธีในการหาขอบภาพด้วยวิธีแคนนี่มีดังนี้ [10]

ก) การกำจัดสัญญาณรบกวน

เมื่อภาพ f ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวน และกำหนดให้ G คือฟังก์ชันเกาส์เซียนซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ σ การกำจัดสัญญาณรบกวนมีขั้นตอนดังนี้

- ทำภาพให้เรียบโดยใช้ฟังก์ชันเกาส์เซียน โดยผลที่ได้คือ $f_G = f * G$
- ในแต่ละจุดภาพที่ (x, y)
 - คำนวณส่วนประกอบเกรเดียนต์ G_x และ G_y
 - ประมาณค่าขนาดของขอบภาพโดย

$$|\nabla f_G(x, y)| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

- ประมาณค่าทิศทางตั้งฉากกับขอบภาพโดย

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$$

ผลที่ได้คือภาพเกรเดียนต์ E_s จากค่าของ $|\nabla f_G(x, y)|$ และภาพทิศทาง E_0 จากค่าของ $\alpha(x, y)$

ข) การขจัดค่าที่ไม่มากที่สุด (Non-maximum Suppression)

เมื่อพิจารณาทิศทาง 4 ทิศทางคือ $d_1 \dots d_4$ ซึ่งกำหนดโดย 0° 45° 90° และ 135°

ในแต่ละจุดภาพ (x, y)

- หาทิศทาง \hat{d}_k ซึ่งใกล้เคียงกับ $E_0(x, y)$ ที่สุด
- ถ้า $E_s(x, y)$ มีค่าน้อยกว่าค่าใดค่าหนึ่งของจุดภาพ 2 จุดระหว่างทิศทางของ \hat{d}_k ให้กำหนด $I_N(x, y) = 0$ แต่ในทางตรงกันข้าม กำหนดให้ $I_N(x, y) = E_s(x, y)$

ผลลัพธ์ที่ได้คือภาพ $I_N(x, y)$ ซึ่งคือภาพ $E_s(x, y)$ หลังจากขจัดจุดของขอบภาพที่ไม่มากที่สุดออกไปแล้ว

ค) การแก้ไขขีดแบ่งโดยลดค่าขีดแบ่ง (Hysteresis Thresholding)

กำหนดค่าขีดแบ่ง 2 ค่า τ_l และ τ_h โดย $\tau_l < \tau_h$

สำหรับทุกจุดภาพที่เป็นขอบภาพใน I_N

- กำหนดให้จุดภาพที่ $I_N(x, y) > \tau_h$ เป็นขอบภาพใหม่
- จากจุดที่เป็นขอบภาพใหม่ จุดภาพที่ $I_N(x, y) > \tau_l$ และอยู่ติดกับจุดภาพที่เป็นขอบภาพใหม่ถือว่าเป็นขอบภาพใหม่เช่นกัน

ผลลัพธ์ที่ได้คือขอบภาพใหม่ซึ่งเป็นภาพลักษณะพื้นฐานสองที่ได้จากวิธีแคนนี่นี้

2.4 เรขาคณิตเชิงภาพฉายเปอร์สเปคทีฟ (Perspective Projection Geometry)

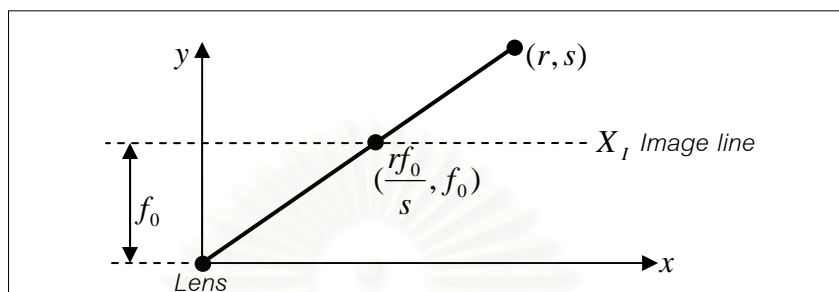
ปัญหาอย่างหนึ่งของคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer vision) คือการหาตำแหน่งของวัตถุใน 3 มิติจากภาพ 2 มิติ การแก้ปัญหานี้ต้องเข้าใจการแปลงแบบเปอร์สเปคทีฟซึ่งจะครอบคลุมวิถีทางของข้อมูลเรขาคณิต 3 มิติที่ถูกฉายกลายเป็นภาพ 2 มิติ

2.4.1 ภาพฉายเปอร์สเปคทีฟแบบ 1 มิติ (One-Dimensional Perspective Projection) [14]

สมมติว่ามีกล้องซึ่งถ่ายได้ภาพ 1 มิติจากภาพจริงใน 2 มิติดังรูปที่ 2.8 โดยเลนส์ของกล้องอยู่ที่จุดกำเนิดและชี้ตรงไปตามแกน y และสมมติให้เส้นของภาพ (Image line) ซึ่งขนานกับแกน x อยู่ห่างจากด้านหน้าของเลนส์เป็นระยะ f_0

เมื่อเส้นของภาพขนานกับแกน x ในระยะ f_0 จากด้านหน้าเลนส์ จากรูปที่ 2.8 เลนส์จะโฟกัสจุด (r, s) ไปยังเส้นของภาพ โดยตำแหน่งบนเส้นของภาพหาได้จากจุดตัดของเส้นของภาพกับเส้นที่ลาก

จากจุด (r, s) ไปยังจุดกำเนิด ดังนั้นพิกัดใน 2 มิติของภาพฉายเปอร์สเปคทีฟคือ $(\frac{rf_0}{s}, f_0)$ ซึ่งจะสัมพันธ์กับพิกัด $\frac{rf_0}{s}$ ใน 1 มิติของเส้นของภาพ



รูปที่ 2.8 ภาพฉายเปอร์สเปคทีฟ $(\frac{rf_0}{s}, f_0)$ ของจุด (r, s)

จะเห็นว่าทั้งตัวเศษและตัวส่วนของ $\frac{rf_0}{s}$ คือการรวมกันแบบเป็นเชิงเส้นของ r และ s แสดงว่าทั้งตัวเศษและตัวส่วนสามารถถูกคำนวณได้ด้วยการแปลงเชิงเส้น การแปลงนี้สามารถแสดงได้โดยใช้พิกัดแบบเอกพันธ์ (Homogeneous coordinate) ซึ่งแทนจุด (r, s) ด้วย $(r, s, 1)$ ในระบบพิกัดแบบเอกพันธ์ โดยในการแปลงเชิงเส้นแรกจะเลื่อนจุด $(r, s, 1)$ ลงตามแกน y ด้วยระยะ f_0 และการแปลงเชิงเส้นที่สองคือการแปลงเปอร์สเปคทีฟของเส้นภาพ ดังสมการที่ 2.26

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/f_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -f_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ s \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (2.26)$$

ดังนั้นพิกัดของเส้นภาพใน 1 มิติสำหรับจุดใด ๆ สามารถกำหนดได้โดย $X_I = \frac{u}{v} = \frac{rf_0}{s}$

2.4.2 ภาพฉายเปอร์สเปคทีฟใน 3 มิติ (The Perspective Projection in 3D) [14]

สมมติให้แกนของเลนส์วางอยู่ในแนวของเส้นที่ขนานกับแกน z การหาพิกัดของกรอบภาพเมื่อทราบจุดในปริภูมิ 3 มิติทำได้โดย ขั้นตอนแรกเลื่อนจุดใน 3 มิติไปยังระบบพิกัดแบบ 3 มิติซึ่งมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่เลนส์ จากนั้นเลื่อนไปตามแกน z ด้วยระยะ f_0 เพื่อไปยังตำแหน่งระนาบของภาพฉายและทำการแปลงแบบเปอร์สเปคทีฟในขั้นตอนสุดท้าย

การหาพิกัดของกรอบภาพนี้สามารถทำได้โดยใช้ระบบพิกัดแบบเอกพันธ์ซึ่งจะสมมติจุดใด ๆ จุดหนึ่งให้เป็นตำแหน่งเลนส์ โดยเมื่อกำหนดให้ (x, y, z) เป็นพิกัดของจุดในปริภูมิ 3 มิติ (x_0, y_0, z_0) เป็นตำแหน่งเลนส์ และ (u, v) เป็นพิกัดของภาพฉายเปอร์สเปคทีฟ (x, y, z) บน

ระนาบภาพฉาย ดังนั้น $u = \frac{x^*}{t^*}$ และ $v = \frac{y^*}{t^*}$ เมื่อกำหนดดังสมการที่ 2.27

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ t^* \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f_0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Perspective projection}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -f_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Translation to projection}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Translation to lens}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ (z - z_0)/f_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \dots (2.27)$$

$$\text{ดังนั้น } u = f_0 \frac{x - x_0}{z - z_0} \quad \text{และ} \quad v = f_0 \frac{y - y_0}{z - z_0}$$

2.4.3 ภาพฉายเปอร์สเปคทีฟผกผัน (Inverse Perspective Projection) [14]

จุดซึ่งมี (u, v) เป็นภาพฉายเปอร์สเปคทีฟ โดย (u, v) อยู่ในระบบพิกัดของระนาบของภาพฉาย และระนาบของภาพฉายนี้มีระยะ f_0 จากเลนส์และมีพิกัดใน 3 มิติเป็น (u, v, f_0) และนอกจากนี้เมื่อเลนส์คือจุดกำเนิดและเป็นจุดศูนย์กลางเปอร์สเปคทีฟโดยเป็นจุดกำเนิดของเส้นรังสีทั้งหมดที่ลากผ่าน (u, v, f_0) ดังนั้นจุดใน 3 มิติใด ๆ ที่อยู่บนเส้นรังสี จะมีภาพฉายเปอร์สเปคทีฟคือ (u, v) ดังสมการที่ 2.28

$$L = \left\{ \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \mid \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ f_0 \end{bmatrix} \right\} \quad \dots (2.28)$$

โดยที่เส้น L คือภาพฉายเปอร์สเปคทีฟผกผันของ (u, v)

2.4.4 การอนุมานจาก 2 มิติไปยัง 3 มิติโดยใช้ภาพฉายเปอร์สเปคทีฟ

การอนุมานจากภาพฉาย 2 มิติของวัตถุไปยังวัตถุจริงที่อยู่ปริภูมิใน 3 มิติ นั้นสามารถทำได้โดยใช้โมเดลของวัตถุใน 3 มิติที่ทราบรวมกับเงื่อนไขของภาพฉายเปอร์สเปคทีฟคำนวณร่วมกัน ซึ่งเพียงพอสามารถทำให้ได้คำตอบเดียวใน 3 มิติของวัตถุได้

1) ส่วนของเส้นตรงที่ทราบทิศทางโคไซน์และขนาด [14]

กำหนดให้ $[a \ b \ c]^T$ คือจุดปลายด้านหนึ่งและ $\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} + \rho \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix}$ คือจุดปลายอีกด้านหนึ่ง

ของส่วนของเส้นตรงใน 3 มิติ โดย ρ คือระยะทางที่มีทิศทางและ $[m_1 \ m_2 \ m_3]^T$ คือทิศทางโคไซน์ของสองจุดนี้ และกำหนดให้ $[u_1 \ v_1]^T$ และ $[u_2 \ v_2]^T$ คือภาพฉายเปอร์สเปคทีฟของทั้งสองจุดเมื่อทราบทิศทางโคไซน์ของส่วนของเส้นตรงใน 3 มิติแล้ว สามารถคำนวณหาตำแหน่งของจุดปลายของส่วนของเส้นตรงนี้ได้ดังสมการที่ 2.29

$$c = \frac{\rho[(u_2 - u_1)(f_0 m_1 - u_2 m_3) + (v_2 - v_1)(f_0 m_2 - v_2 m_3)]}{(u_2 - u_1)^2 + (v_1 - v_2)^2}$$

$$a = \frac{u_1}{f_0} c$$

$$b = \frac{v_1}{f_0} c$$

... (2.29)

2) เส้นขนาน [14]

กำหนดให้เส้นขนาน N เส้นใน 3 มิติที่มีทิศทางโคไซน์ $[b_1 \ b_2 \ b_3]^T$ และมีภาพฉายเปอร์สเปคทีฟคือ $L_n = \left\{ \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \middle| \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_n \\ d_n \end{bmatrix} + \eta \begin{bmatrix} g_n \\ h_n \end{bmatrix} \right\}$ เมื่อ $n=1, \dots, N$ ดังนั้นสามารถหาทิศทางโคไซน์ใน 3 มิติของเส้นขนานนี้ได้ดังสมการที่ 2.30

$$\underbrace{\begin{bmatrix} h_1 f & -g_1 f & d_1 g_1 & -c_1 h_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_N f & -g_N f & d_N g_N & -c_N h_N \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

... (2.30)

การแก้ปัญหสมการที่ 2.30 ทำได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อหาค่าต่ำที่สุดของ $\|Ab\|^2$ โดยคำตอบคือ b ที่ตรงกับเวกเตอร์เอกฐานด้านขวา (Right singular vector) ของ A ที่มีค่าเอกฐาน (Singular value) น้อยที่สุด

ในกรณีพิเศษที่มีเส้นตรง 2 เส้นหรือ $N=2$ สามารถหาทิศทางโคไซน์ใน 3 มิติของเส้นขนานได้ดังสมการที่ 2.31

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \pm \frac{\begin{bmatrix} h_1 f_0 \\ -g_1 f_0 \\ d_1 g_1 - c_1 h_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} h_2 f_0 \\ -g_2 f_0 \\ d_2 g_2 - c_2 h_2 \end{bmatrix}}{\left\| \begin{bmatrix} h_1 f_0 \\ -g_1 f_0 \\ d_1 g_1 - c_1 h_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} h_2 f_0 \\ -g_2 f_0 \\ d_2 g_2 - c_2 h_2 \end{bmatrix} \right\|}$$

... (2.31)

3) เส้นตรง 3 เส้นในระนาบที่มีเส้นหนึ่งตั้งฉากกับอีก 2 เส้น [14]

กำหนดเส้นตรงใน 3 มิติที่วางอยู่ในระนาบเดียวกัน 3 เส้นคือ

$$L_1 = \left\{ \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \mid \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \right\}$$

$$L_2 = \left\{ \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \mid \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \right\}$$

$$L_3 = \left\{ \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \mid \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \right\}$$

โดยเส้นตรง L_3 ตั้งฉากกับเส้นตรง L_1 และ L_2 ในกรณีนี้ทำให้เส้นตรง L_1 และ L_2 ขนานกัน มีผลให้มีทิศทางโคไซน์เหมือนกันด้วย และภาพฉายเปอร์สเปคทีฟของเส้นตรงทั้ง 3 เส้นคือ

$$M_1 = \left\{ \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \mid \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 \\ h_1 \end{bmatrix} + \eta \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \end{bmatrix} \right\}$$

$$M_2 = \left\{ \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \mid \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_2 \\ h_2 \end{bmatrix} + \eta \begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \end{bmatrix} \right\}$$

$$M_3 = \left\{ \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \mid \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_3 \\ h_3 \end{bmatrix} + \eta \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \end{bmatrix} \right\}$$

สามารถหาทิศทางโคไซน์ของเส้นตรง L_1 และ L_2 ได้ดังสมการที่ 2.32

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = \pm \frac{\begin{bmatrix} \beta_1 f_0 \\ -\alpha_1 f_0 \\ h_1 \alpha_1 - g_1 \beta_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_2 f_0 \\ -\alpha_2 f_0 \\ h_2 \alpha_2 - g_2 \beta_2 \end{bmatrix}}{\left\| \begin{bmatrix} \beta_1 f_0 \\ -\alpha_1 f_0 \\ h_1 \alpha_1 - g_1 \beta_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_2 f_0 \\ -\alpha_2 f_0 \\ h_2 \alpha_2 - g_2 \beta_2 \end{bmatrix} \right\|} \quad \dots (2.32)$$

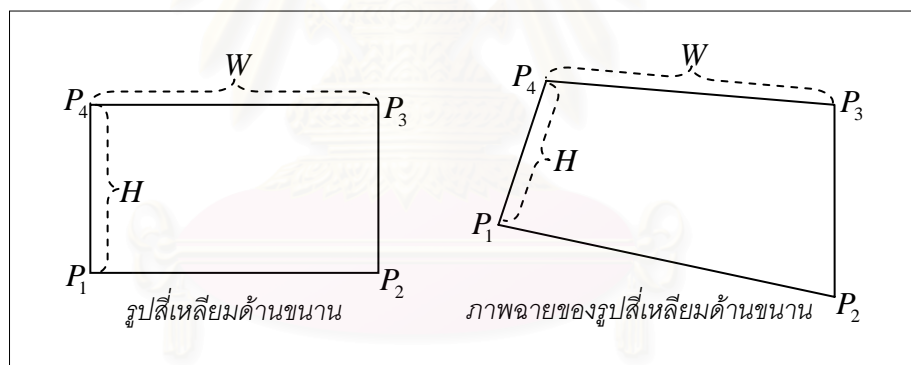
และสามารถหาทิศทางโคไซน์ของเส้นตรง L_3 ได้ดังสมการที่ 2.33

$$\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} = \pm \frac{\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_3 f_0 \\ -\alpha_3 f_0 \\ h_3 \alpha_3 - g_3 \beta_3 \end{bmatrix}}{\left\| \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_3 f_0 \\ -\alpha_3 f_0 \\ h_3 \alpha_3 - g_3 \beta_3 \end{bmatrix} \right\|} \quad \dots (2.33)$$

4) รูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน [14]

กำหนดจุดมุม 4 จุดของสี่เหลี่ยมด้านขนานใน 3 มิติดังรูปที่ 2.9 คือ

$$\begin{aligned} P_1 &= \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}, & P_2 &= \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} + W \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} + H \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \\ P_3 &= \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}, & P_4 &= \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} - W \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} - H \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$



รูปที่ 2.9 รูปสี่เหลี่ยมด้านขนานและภาพฉายของรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน

เมื่อด้านตรงข้ามกันของสี่เหลี่ยมด้านขนานคือเส้นขนาน จึงสามารถใช้เทคนิคในข้อ 2 คำนวณหาทิศทางโคไซน์ $[m_1 \ m_2 \ m_3]^T$ และ $[n_1 \ n_2 \ n_3]^T$ ได้
เมื่อกำหนดให้ระนาบที่สี่เหลี่ยมด้านขนานนี้วางอยู่คือ

$$\left\{ \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \middle| Ax + By + Cz + D = 0 \right\}$$

จึงสามารถคำนวณหาเส้นปกติไปยังระนาบที่สี่เหลี่ยมด้านขนานนี้วางอยู่ได้ดังสมการที่ 2.34

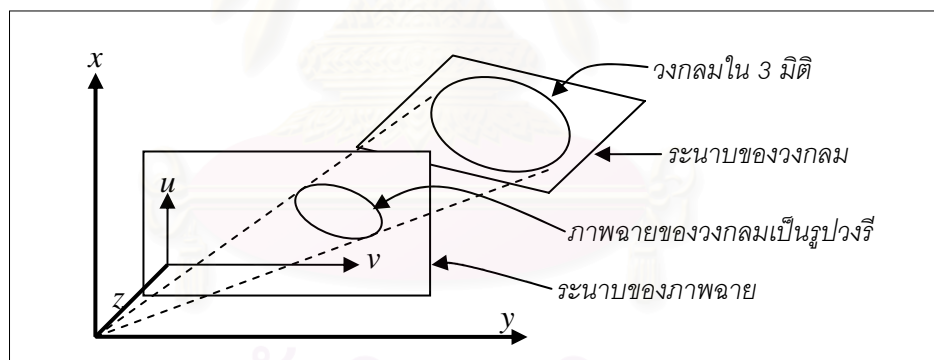
$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}}{\left\| \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \right\|} \quad \dots (2.34)$$

ถ้าหากทราบความยาวของด้านสี่เหลี่ยม W หรือ H จะทำให้สามารถใช้เทคนิคในข้อ 1 คำนวณหาตำแหน่งจุดมุมของสี่เหลี่ยมด้านขนานนี้ได้

5) วงกลม [14, 15]

ภาพฉายเปอร์สเปคทีฟของวงกลมใน 3 มิติ นั่นคือรูปวงรี แสดงดังรูปที่ 2.10 เมื่อกำหนดให้วงกลมมีรัศมี R และมีจุดศูนย์กลาง (r_0, s_0) ในแนวระนาบของวงกลม ดังนั้นสามารถสร้างวงกลมได้ดังสมการที่ 2.35

$$\left\{ \begin{bmatrix} r \\ s \end{bmatrix} \middle| (r - r_0)^2 + (s - s_0)^2 = R^2 \right\} \quad \dots (2.35)$$



รูปที่ 2.10 ภาพฉายของวงกลมใน 3 มิติคือวงรี

เมื่อกำหนดให้ δ คือระยะตั้งฉากจากระนาบของวงกลมไปจนถึงจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิง กล้อง พิกัด (x, y, z) ใน 3 มิติของจุดใด ๆ สามารถแสดงในรูปของกรอบคู่อันดับของระนาบ (Plane coordinate frame) ได้ดังสมการที่ 2.36

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1x} \\ e_{1y} \\ e_{1z} \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} e_{2x} \\ e_{2y} \\ e_{2z} \end{bmatrix} s + \begin{bmatrix} e_{3x} \\ e_{3y} \\ e_{3z} \end{bmatrix} \delta \quad \dots (2.36)$$

เมื่อ $[e_{1x} \ e_{1y} \ e_{1z}]^T$ และ $[e_{2x} \ e_{2y} \ e_{2z}]^T$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน

และวางอยู่ในแนวขนานกับระนาบของวงกลม และ $[e_{3x} \ e_{3y} \ e_{3z}]^T$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับระนาบของวงกลม ดังนั้นเมื่อ $[e_{3x} \ e_{3y} \ e_{3z}]^T$ มีเครื่องหมายที่ถูกต้องแล้ว สามารถแสดงคู่อันดับของจุดใด ๆ บนระนาบของวงกลมได้ดังสมการที่ 2.37

$$\begin{bmatrix} r \\ s \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \\ e_{3x} & e_{3y} & e_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \dots (2.37)$$

เมื่อใช้การแปลงแบบเปอร์สเปคทีฟโดยมี f_0 คือระยะโฟกัสจึงสามารถแทน x และ y ให้อยู่ในรูปของ u v และ z ได้ดังสมการที่ 2.38

$$\begin{bmatrix} r \\ s \\ \delta \end{bmatrix} = \frac{1}{f_0} \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \\ e_{3x} & e_{3y} & e_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ f_0 \end{bmatrix} z \quad \dots (2.38)$$

$$\text{เมื่อ } z = \frac{\delta f_0}{e_{3x}u + e_{3y}v + e_{3z}f_0}$$

ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} r \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ f_0 \end{bmatrix} \frac{\delta f_0}{e_{3x}u + e_{3y}v + e_{3z}f_0} \quad \dots (2.39)$$

เมื่อแทนค่านิพจน์สำหรับ r และ s จากสมการที่ 2.39 ลงในสมการที่ 2.35 จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ 2.40

$$\begin{aligned} & [(e_{1x}\delta - r_0e_{3x})u + (e_{1y}\delta - r_0e_{3y})v + (e_{1z}\delta - r_0e_{3z})f_0]^2 + \\ & [(e_{2x}\delta - s_0e_{3x})u + (e_{2y}\delta - s_0e_{3y})v + (e_{2z}\delta - s_0e_{3z})f_0]^2 \\ & = R^2(e_{3x}u + e_{3y}v + e_{3z}f_0)^2 \end{aligned} \quad \dots (2.40)$$

จากสมการที่ 2.40 เมื่อรวมพจน์ที่เกี่ยวข้องกันในรูปการยกกำลังของ u และ v จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ 2.41

$$A'u^2 + 2B'uv + C'v^2 + 2f_0D'u + 2f_0E'v + f^2F' = 0 \quad \dots (2.41)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 A' &= (e_{1x}^2 + e_{2x}^2)\delta^2 - 2\delta e_{3x}(e_{1x}r_0 + e_{2x}s_0) + e_{3x}^2(r_0^2 + s_0^2 - R^2) \\
 B' &= (e_{1x}e_{1y} + e_{2x}e_{2y})\delta^2 - \delta e_{3y}(e_{1x}r_0 + e_{2x}s_0) - \delta e_{3x}(e_{1y}r_0 + e_{2y}s_0) + e_{3x}e_{3y}(r_0^2 + s_0^2 + R^2) \\
 C' &= (e_{1y}^2 + e_{2y}^2)\delta^2 - 2\delta e_{3y}(e_{1y}r_0 + e_{2y}s_0) + e_{3y}^2(r_0^2 + s_0^2 - R^2) \\
 D' &= (e_{1x}e_{1z} + e_{2x}e_{2z})\delta^2 - \delta e_{3z}(e_{1x}r_0 + e_{2x}s_0) - \delta e_{3x}(e_{1z}r_0 + e_{2z}s_0) + e_{3x}e_{3z}(r_0^2 + s_0^2 + R^2) \\
 E' &= (e_{1y}e_{1z} + e_{2y}e_{2z})\delta^2 - \delta e_{3z}(e_{1y}r_0 + e_{2y}s_0) - \delta e_{3y}(e_{1z}r_0 + e_{2z}s_0) + e_{3y}e_{3z}(r_0^2 + s_0^2 + R^2) \\
 F' &= (e_{1z}^2 + e_{2z}^2)\delta^2 - 2\delta e_{3z}(e_{1z}r_0 + e_{2z}s_0) + e_{3z}^2(r_0^2 + s_0^2 - R^2)
 \end{aligned}$$

ในทางกลับกันเมื่อทราบรัศมี R ของวงกลมทำให้สามารถคำนวณหาวงกลมใน 3 มิติจากภาพฉายเปอร์สเปกทีฟที่เป็นวงรีของวงกลมได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

ก) **คำนวณหาสมการของกรวย**

กำหนดให้กรอบอ้างอิง (Reference frame) ของกล้องใน 3 มิติคือ $x - y - z$ และกรอบอ้างอิงของภาพฉายคือ $u - v$ ดังนั้นสามารถกำหนดสมการของวงกลมใน 3 มิติที่ถูกฉายเป็นรูปวงรีได้ดังสมการที่ 2.42

$$au^2 + buv + cv^2 + du + ev + f = 0 \quad \dots (2.42)$$

แต่ละจุด (u, v) ของภาพฉายนี้คือจุดที่อยู่บนเส้นตรงที่ลากจากจุด $(0,0,0)$ ไปยัง (u, v, f_0) เมื่อ f_0 คือระยะโฟกัสของกล้อง และเมื่อแปลงสมการที่ 2.42 ด้วยการแปลงแบบเปอร์สเปกทีฟทำให้ได้สมการของกรวยในรูปของพารามิเตอร์ของวงรีและระยะโฟกัสดังสมการที่ 2.43

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dxy + Eyz + Fz^2 = 0 \quad \dots (2.43)$$

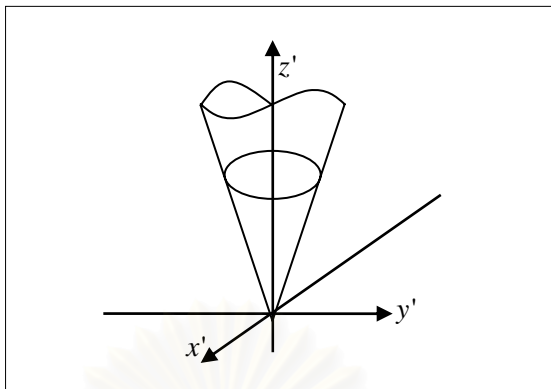
เมื่อ $A = af_0^2, B = bf_0^2, C = cf_0^2, D = df_0, E = ef_0$ และ $F = f_0$

ข) **คำนวณหากรอบอ้างอิงใหม่และกำหนดลักษณะของกรวย**

เพื่อให้การแก้ปัญหาทาง่ายขึ้นจึงต้องเปลี่ยนกรอบอ้างอิงของกรวยใหม่ กำหนดให้เป็น $x' - y' - z'$ โดยมีจุดกำเนิดเช่นเดียวกับกล้องและแกน z' คือแกนใหม่ของกรวย (ทำให้กรวยอยู่ในรูปแบบมาตรฐาน) สามารถทำได้โดยเปลี่ยนสมการของกรวยให้อยู่ในรูปของสมการที่ 2.44 ดังรูปที่ 2.11

$$\lambda_1 x'^2 + \lambda_2 y'^2 + \lambda_3 z'^2 = 0 \quad \dots (2.44)$$

โดย λ_1, λ_2 และ λ_3 คือค่าเฉพาะของเมทริกซ์ Q ที่เป็นรูปแบบกำลังสอง (Quadratic form) ของสมการที่ 2.43 โดย Q กำหนดได้ดังสมการที่ 2.45



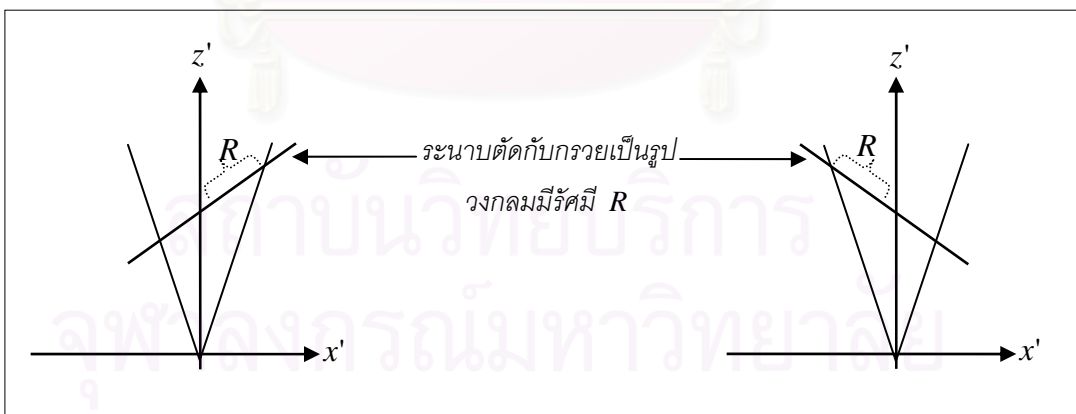
รูปที่ 2.11 กรวยที่ถูกทำให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานแล้ว

$$[x \ y \ z] Q \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = 0 \quad \dots (2.45)$$

เมื่อ $Q = \begin{bmatrix} A & B/2 & D/2 \\ B/2 & C & E/2 \\ D/2 & E/2 & F \end{bmatrix}$

ค) **คำนวณหาส่วนตัดของวงกลมในกรวย**

การคำนวณหาส่วนตัดของวงกลมในกรวยนี้คือการคำนวณหาระนาบที่ตัดกรวยแล้วทำให้ได้ส่วนที่ตัดกันระหว่างระนาบกับกรวยเป็นรูปวงกลมตามรัศมีที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การตัดกันของระนาบกับกรวย

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าระนาบที่เป็นไปได้ที่ตัดกับกรวยแล้วได้ส่วนตัดเป็นรูปวงกลมนั้นมี 2 ระนาบ เมื่อกำหนดให้รัศมีของวงกลมคือ R สามารถคำนวณหาจุดศูนย์กลาง $(x'_{01}, y'_{01}, z'_{01})$ และ $(x'_{02}, y'_{02}, z'_{02})$ ของวงกลมที่อยู่บนระนาบทั้งสองได้ดังสมการที่ 2.46

$$\begin{aligned}
 x'_{01} &= R \sqrt{\frac{|\lambda_3| (|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{|\lambda_1| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}}, \quad y'_{01} = 0, \quad z'_{01} = R \sqrt{\frac{|\lambda_1| (|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{|\lambda_1| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}}, \\
 x'_{02} &= -R \sqrt{\frac{|\lambda_3| (|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{|\lambda_1| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}}, \quad y'_{02} = 0, \quad z'_{02} = R \sqrt{\frac{|\lambda_1| (|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{|\lambda_1| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \dots (2.46)
 \end{aligned}$$

และสามารถคำนวณหาเส้นปกติ $[v'_{1x} \ v'_{1y} \ v'_{1z}]$ และ $[v'_{2x} \ v'_{2y} \ v'_{2z}]$ ของระนาบของวงกลมที่มี $(x'_{01}, y'_{01}, z'_{01})$ และ $(x'_{02}, y'_{02}, z'_{02})$ เป็นจุดศูนย์กลางได้ดังสมการที่ 2.47

$$\begin{aligned}
 v'_{1x} &= \sqrt{\frac{|\lambda_1| - |\lambda_2|}{|\lambda_1| + |\lambda_3|}}, \quad v'_{1y} = 0, \quad v'_{1z} = -\sqrt{\frac{|\lambda_2| + |\lambda_3|}{|\lambda_1| + |\lambda_3|}}, \\
 v'_{2x} &= -\sqrt{\frac{|\lambda_1| - |\lambda_2|}{|\lambda_1| + |\lambda_3|}}, \quad v'_{2y} = 0, \quad v'_{2z} = -\sqrt{\frac{|\lambda_2| + |\lambda_3|}{|\lambda_1| + |\lambda_3|}} \dots (2.47)
 \end{aligned}$$

จากคำตอบที่ได้คือวงกลมซึ่งอยู่ในระนาบ $x'-y'-z'$ การคำนวณย้อนกลับเพื่อให้ได้คำตอบในระนาบ $x-y-z$ ต้องทำการหมุนแกนโดยแปลงคำตอบที่ได้ด้วยเมทริกซ์ P ซึ่งคือเมทริกซ์ของเวกเตอร์เจาะจง $[e_1 \ e_2 \ e_2]$ ที่สัมพันธ์กับค่าเจาะจง $\lambda_1 \ \lambda_2$ และ λ_3 ดังสมการที่ 2.48

$$P = [e_1 \ e_2 \ e_2] = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{2x} & e_{3x} \\ e_{1y} & e_{2y} & e_{3y} \\ e_{1z} & e_{2z} & e_{3z} \end{bmatrix} \dots (2.48)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป

เนื่องจากภาพเอกซเรย์ที่ได้จากเครื่องฟลูออโรสโคปนั้นมีการเพี้ยนทางเรขาคณิตอันเนื่องมาจากกระบวนการสร้างภาพของเครื่องฟลูออโรสโคปเองดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1.3 และภาพเอกซเรย์นี้จะต้องถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาระยะใน 3 มิติต่อไป ดังนั้นหากภาพเอกซเรย์มีการเพี้ยนไปมากเท่าใดก็จะทำให้ผลการคำนวณหาตำแหน่งจริงใน 3 มิติผิดพลาดไปมาก และทำให้การคำนวณการปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปและเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายผิดพลาดไปด้วย

งานวิจัยนี้จึงทำการปรับภาพเอกซเรย์ให้มีความถูกต้องมากขึ้นโดยได้ประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ใช้อ้างอิงตำแหน่งและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความถูกต้อง และนำเสนอวิธีการเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปด้วยอุปกรณ์นี้เพื่อใช้แก้ไขการเพี้ยนของภาพก่อนที่จะนำไปคำนวณหาวิธีปรับเครื่องฟลูออโรสโคปและวิธีปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายต่อไป

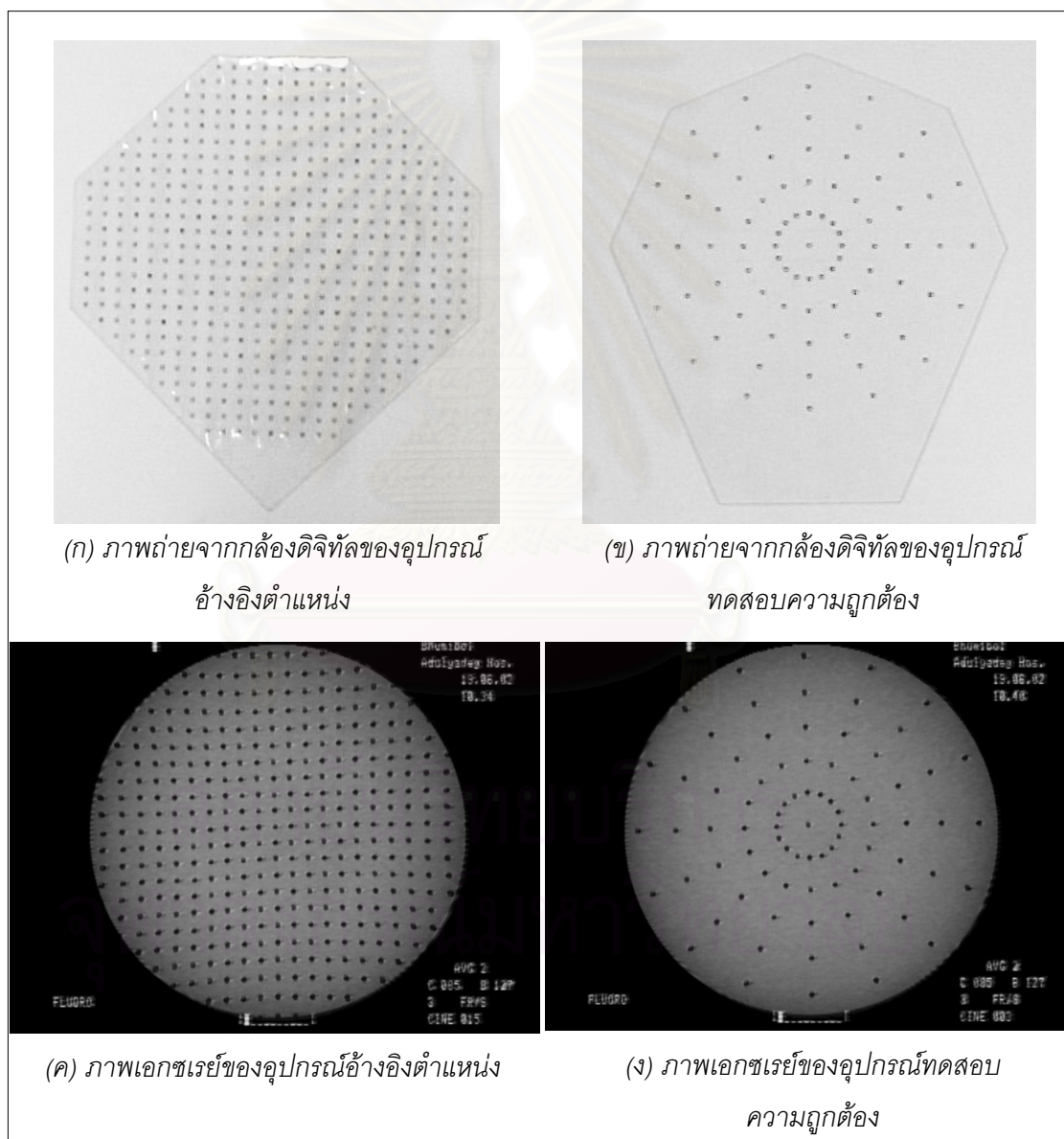
3.1 เครื่องมือที่ออกแบบเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์

จากงานวิจัยที่ได้มีการประดิษฐ์และนำเสนออุปกรณ์แก้ไขการเพี้ยนทางเรขาคณิตของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปขึ้นมานั้น [1, 3] ล้วนใช้วัสดุที่มีราคาแพงและประดิษฐ์ขึ้นมาใช้งานเองได้ยาก ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการประดิษฐ์อุปกรณ์โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่าย มีราคาถูกและสามารถประดิษฐ์ขึ้นใช้ได้เองโดยต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือต้องสามารถอ้างอิงตำแหน่งของอุปกรณ์กับตำแหน่งในภาพเอกซเรย์ของตัวอุปกรณ์เองได้ และคำนวณเพื่อแก้การเพี้ยนจากจุดอ้างอิงเหล่านี้ได้โดยง่าย

งานวิจัยนี้จึงได้ประดิษฐ์ “อุปกรณ์ที่ใช้อ้างอิงตำแหน่ง” และ “อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความถูกต้อง” จากการแก้ไขการเพี้ยน โดยอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งนี้เป็นเครื่องมือในการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกใสเจาะรูและบรรจุลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร เรียงตัวกันในแนวจุดตัดของตารางสี่เหลี่ยม โดยแต่ละช่องของตารางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส จุดศูนย์กลางของลูกเหล็กแต่ละลูกห่างกัน 10 มิลลิเมตรในแนวตั้งและแนวนอน ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลและภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ก และ ค ตามลำดับ

อุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งนี้จะถูกนำไปวางติดกับส่วนรับรังสีเอกซเรย์ของเครื่องฟลูออโรสโคปเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของจุดภาพที่เพี้ยนในภาพเอกซเรย์กับตำแหน่งที่ถูกต้อง ซึ่งก็คือการนำตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กในภาพเอกซเรย์มาคำนวณหาความสัมพันธ์เพื่อปรับแก้ให้จุดศูนย์กลางเหล่านี้เรียงตัวกันเป็นตารางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเหมือนกับอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง

ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความถูกต้องนั้นใช้วัสดุเช่นเดียวกันกับอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง แตกต่างกันที่ตำแหน่งการเจาะรูฝังลูกเหล็กโดยฝังที่จุดศูนย์กลาง 1 ลูกและฝังตามแนวเส้นรอบวงของ วงกลมจากจุดศูนย์กลาง 5 วง โดยวงกลมแต่ละวงมีรัศมี 20 40 60 80 และ 100 มิลลิเมตรตามลำดับ ในแนวเส้นรอบวงแต่ละวงฝังลูกเหล็ก 16 ลูก และให้ลูกเหล็กเรียงตัวกันในแนวรัศมีห่างกัน 22.5 องศา ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลและภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความถูกต้องแสดงในรูปที่ 3.1 ข และ รูปที่ 3.1 ง ตามลำดับ ในการทดสอบความถูกต้องทำได้โดยนำภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์นี้ไปปรับแก้การ เพี้ยนแล้ววัดระยะลูกเหล็กแต่ละลูกจากลูกที่อยู่จุดศูนย์กลางเปรียบเทียบกับระยะจริงของอุปกรณ์



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลและภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง และอุปกรณ์ทดสอบความถูกต้อง

3.2 วิธีแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์

วิธีการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนแรก กำหนดบริเวณภาพเอกซเรย์ ขั้นตอนที่สองหาจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กในภาพเอกซเรย์ และขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการคำนวณเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพ ดังต่อไปนี้

3.2.1 การกำหนดบริเวณภาพเอกซเรย์

เนื่องจากภาพเอกซเรย์ที่เกิดขึ้นจริงที่ได้จากเครื่องฟลูออโรสโคปนั้นคือบริเวณที่เป็นวงกลมสีอ่อนขนาดใหญ่ดังรูปที่ 2.4 ในบทที่ 2 ดังนั้นจึงต้องทำการกำหนดบริเวณที่เป็นภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปก่อนการประมวลผลภาพในขั้นตอนอื่น ๆ โดยขั้นตอนในการกำหนดบริเวณภาพเอกซเรย์ประกอบด้วย การขจัดสัญญาณรบกวน การหาค่าขีดแบ่ง และการกำหนดบริเวณวงกลม ดังนี้

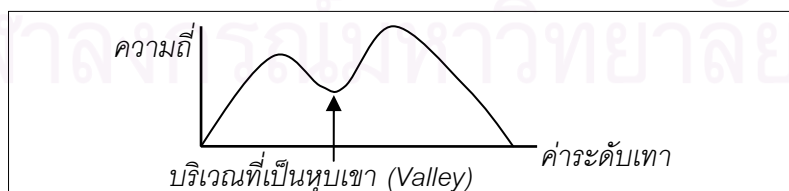
1) การขจัดสัญญาณรบกวน

ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปมีคุณสมบัติที่เป็นปัญหาต่อการวิเคราะห์ภาพอยู่หลายประการ นอกจากมีการเพี้ยนของความเข้มแสงของภาพและการเพี้ยนทางเรขาคณิตแล้ว ยังมีความเปรียบต่าง (Contrast) ต่ำและมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปในงานวิจัยนี้จึงขจัดสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองแบบเกาส์เซียนก่อนเป็นอันดับแรก

2) การหาค่าขีดแบ่ง

ส่วนที่เป็นวงกลมสีอ่อนซึ่งคือส่วนที่เป็นภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปนั้นมีสีแตกต่างจากส่วนที่เป็นบริเวณรอบ ๆ ซึ่งมีสีเข้มค่อนข้างชัดเจนยกเว้นส่วนที่เป็นตัวหนังสือเท่านั้น แต่บริเวณที่เป็นตัวหนังสือนั้นมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีหาค่าขีดแบ่งเพื่อแยกแยะระหว่างจุดภาพที่มีสีอ่อนซึ่งเป็นภาพเอกซเรย์จริงและส่วนที่เป็นบริเวณรอบ ๆ ซึ่งมีสีเข้มและไม่ใช่ส่วนของภาพเอกซเรย์

โดยทั่วไปแล้วการหาค่าขีดแบ่งจากภาพระดับเทาที่มีวัดอยู่ 2 ชนิดและการกระจายมีลักษณะคล้ายทวิภาวะ (Bimodal) นั้นสามารถกำหนดได้คร่าว ๆ จากบริเวณที่เป็นหุบเขา (Valley) ของฮิสโทแกรมของภาพ แสดงดังรูปที่ 3.2

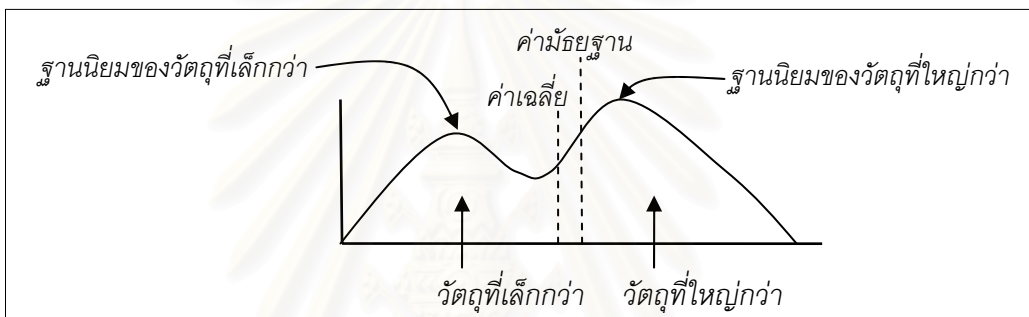


รูปที่ 3.2 ฮิสโทแกรมของภาพระดับเทา

วิธีการหาค่าขีดแบ่งในงานวิจัยนี้มีแนวคิดในการคำนวณหาบริเวณที่เป็นหุบเขาของฮิสโทแกรมเพื่อกำหนดให้เป็นค่าขีดแบ่งของภาพและนำวิธีหาค่าขีดแบ่งนี้ไปใช้กับขั้นตอนการประมวลผลภาพอื่น ๆ ในงานวิจัยนี้ด้วย

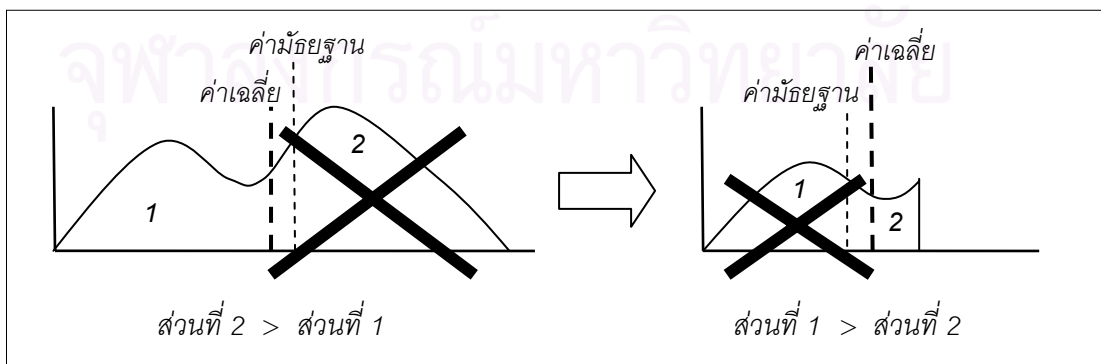
แนวคิดของวิธีการหาค่าขีดแบ่งในงานวิจัยนี้อาศัยหลักทางด้านสถิติโดยใช้คุณสมบัติของค่ากลางในการคำนวณหาบริเวณที่เป็นแอ่งลึกของฮิสโทแกรม โดยค่ากลางที่นำมาใช้คือค่าเฉลี่ย (Mean) และค่ามัธยฐาน (Median) ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่ามัธยฐานคือ ค่าเฉลี่ยจะมีความไวต่อข้อมูลที่อยู่ไกลจากค่ากลางออกไปหรือข้อมูลรบกวน (Outlier) มากกว่าค่ามัธยฐาน หรือในทางกลับกันค่ามัธยฐานจะทนทานต่อข้อมูลรบกวนมากกว่าค่าเฉลี่ย [16]

งานวิจัยนี้จึงนำเอาคุณสมบัติที่สำคัญระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่ามัธยฐานมาประยุกต์ใช้กับฮิสโทแกรมของภาพระดับเทาโดยเมื่อภาพระดับเทาประกอบด้วยวัตถุ 2 ชนิดที่มีขนาดไม่เท่ากันและฮิสโทแกรมมีรูปร่างคล้ายทวิภาวะแล้ว ค่าเฉลี่ยจะอยู่ไกลจากฐานนิยม (Mode) ของวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่าแต่ค่ามัธยฐานจะอยู่ใกล้กับฐานนิยมของวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่า แสดงดังรูปที่ 3.3



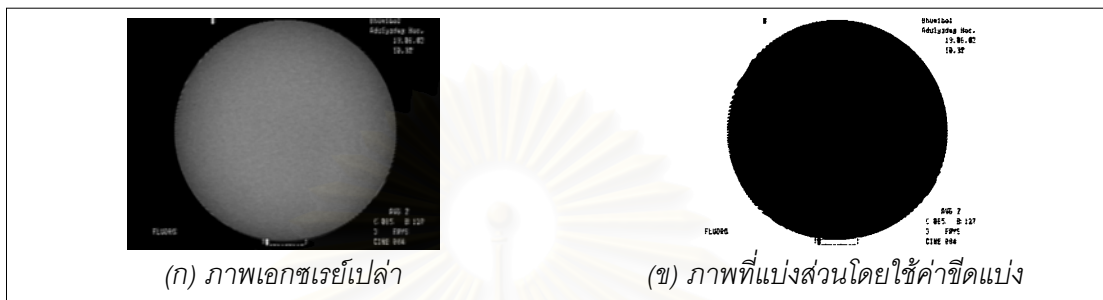
รูปที่ 3.3 คุณสมบัติของค่าเฉลี่ยและมัธยฐานของฮิสโทแกรม

ขั้นตอนวิธีในการหาค่าขีดแบ่งนั้นทำได้ง่าย แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยนำฮิสโทแกรมของภาพมาหาค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐาน จากนั้นแบ่งฮิสโทแกรมออกเป็น 2 ส่วนด้วยค่าเฉลี่ยที่หาได้ โดยส่วนที่ 1 คือส่วนที่น้อยกว่าค่าเฉลี่ยและส่วนที่ 2 คือส่วนที่มากกว่าค่าเฉลี่ย จากนั้นตัดส่วนของฮิสโทแกรมที่มีค่ามัธยฐานอยู่หรือส่วนของวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่าทิ้งแล้วนำส่วนที่เหลือมาหาค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานอีกครั้งและพิจารณาตัดส่วนของฮิสโทแกรมทิ้งเช่นเดิม ทำเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานของฮิสโทแกรมที่เหลือคือค่าเดียวกันจากนั้นจึงกำหนดให้ค่าที่ได้เป็นค่าขีดแบ่ง



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนวิธีการหาค่าขีดแบ่งด้วยวิธีที่นำเสนอง

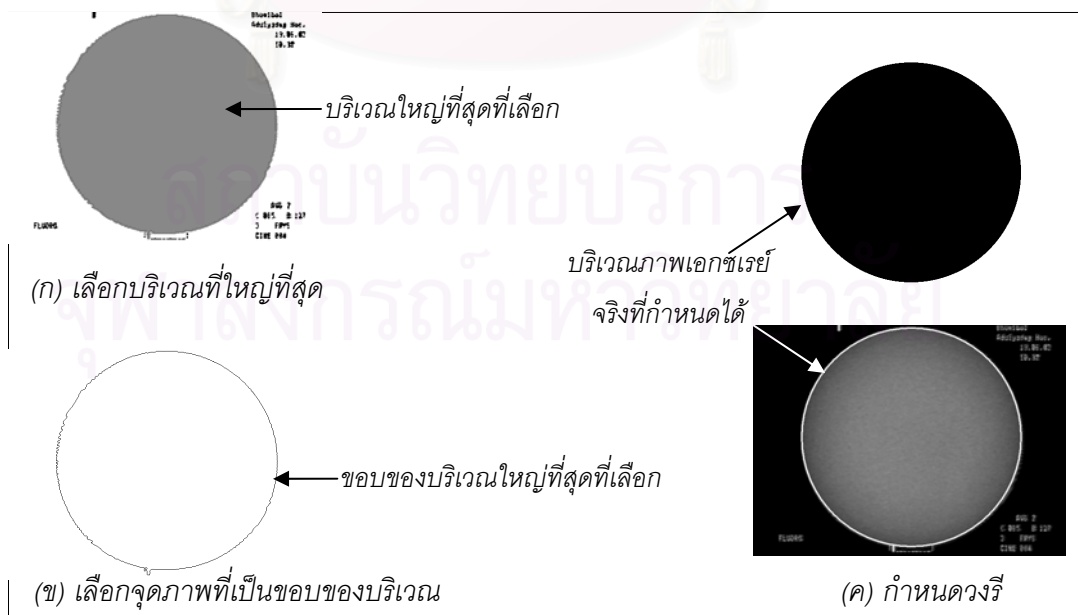
การแบ่งส่วนภาพเอกซเรย์เปล่าของเครื่องฟลูออโรสโคปโดยใช้ค่าขีดแบ่งจากวิธีที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยส่วนพื้นที่สีเข้มในรูปที่ 3.5 ก คือส่วนที่เลือกเป็นพื้นที่สีขาวในรูปที่ 3.5 ข และส่วนพื้นที่สีอ่อนในรูปที่ 3.5 ก คือส่วนพื้นที่ดำในรูปที่ 3.5 ข ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เลือกเป็นภาพเอกซเรย์จริงของเครื่องฟลูออโรสโคป



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างภาพเอกซเรย์เปล่าและผลลัพธ์ที่ได้จากการแบ่งส่วนภาพโดยใช้ค่าขีดแบ่ง

3) การกำหนดบริเวณวงกลม

จากพื้นที่สีดำที่เลือกได้โดยค่าขีดแบ่งในรูปที่ 3.5 ข จะเห็นว่านอกจากส่วนของวงกลมซึ่งเป็นภาพเอกซเรย์จริงที่เลือกได้แล้วยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ ของภาพปะปนอยู่ด้วย ในขั้นตอนแรกของการกำหนดบริเวณวงกลมจึงเลือกบริเวณสีดำที่ใหญ่ที่สุดก่อนโดยบริเวณที่เลือกได้แสดงดังบริเวณสีเทาอ่อนในรูปที่ 3.6 ก จากนั้นเลือกจุดภาพซึ่งเป็นขอบของบริเวณนี้แสดงดังวงเส้นโค้งสีเทาอ่อนในรูปที่ 3.6 ข และสุดท้ายจัดวงรีให้กับจุดภาพที่เป็นขอบนี้แล้วกำหนดให้พื้นที่ของวงรีที่ได้เป็นบริเวณของภาพเอกซเรย์จริงของเครื่องฟลูออโรสโคปแสดงดังบริเวณสีดำและเส้นสีขาวในภาพเอกซเรย์ในรูปที่ 3.6 ค



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการกำหนดบริเวณวงกลม

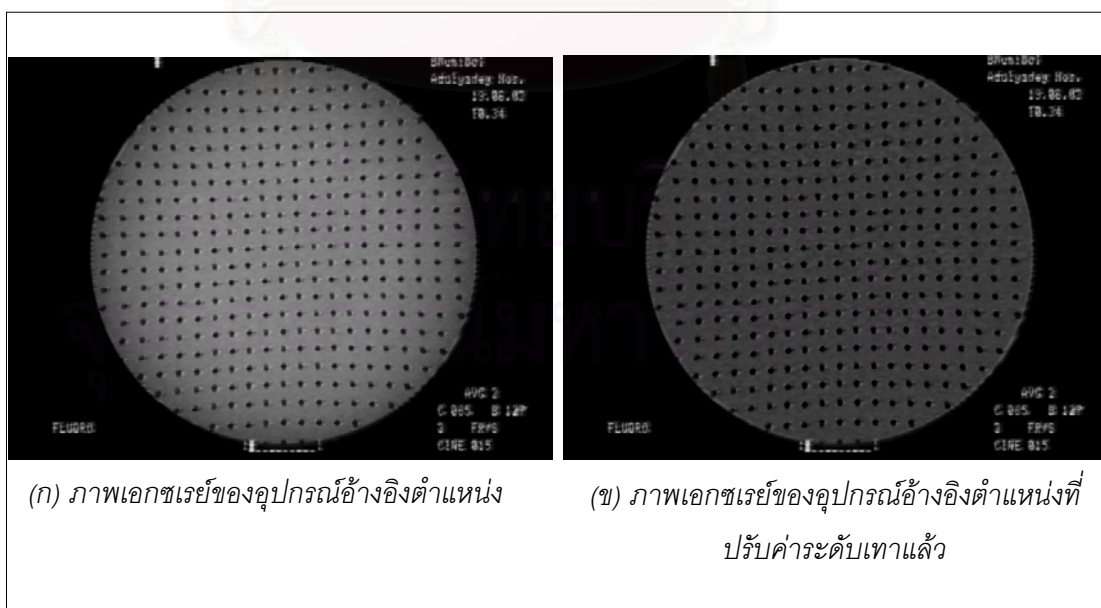
3.2.2 การหาจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กในภาพเอกซเรย์

การวิเคราะห์ภาพเพื่อหาจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กจากภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิง ตำแหน่งในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การประมวลผลก่อนขั้นตอนดำเนินงาน การแบ่งส่วนภาพ และการคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลูกเหล็ก

1) การประมวลผลก่อนขั้นตอนดำเนินงาน

ปัญหาอย่างหนึ่งที่เกิดกับภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปคือความเข้มของภาพสว่างไม่เท่ากันนั้นส่งผลให้ค่าระดับเทาของลูกเหล็กในภาพเอกซเรย์แต่ละลูกมีค่าไม่เท่ากัน โดยลูกเหล็กที่อยู่ไกลจากจุดศูนย์กลางออกไปมีสีมืดกว่าลูกเหล็กที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางมากกว่า อีกทั้งลูกเหล็กนั้นมีขนาดเล็ก มีผลให้ลูกเหล็กที่อยู่บริเวณกลางภาพมีสีมืดใกล้เคียงกับส่วนพื้นหลังบริเวณใกล้เคียง ๆ ขอบของรูปร่างกลมที่เป็นส่วนของภาพเอกซเรย์ ดังนั้นหากแบ่งส่วนภาพออกเป็นส่วนของลูกเหล็กและพื้นหลังโดยใช้ค่าขีดแบ่งที่หาจากภาพ เมื่อตัดบริเวณพื้นหลังในส่วนที่มืด ๆ ออกไปได้ ก็อาจทำให้ตัดบริเวณที่เป็นลูกเหล็กตรงกลางภาพออกไปด้วย

งานวิจัยนี้จึงแก้ปัญหาโดยนำค่าระดับเทาเฉลี่ยของภาพเอกซเรย์เปล่ามาขจัดสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองแบบเกาส์เซียน จากนั้นคำนวณความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกับแต่ละจุดภาพของภาพเอกซเรย์เปล่าเอง แล้วนำค่าความต่างนี้ไปบวกเข้ากับภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิง ผลลัพธ์ที่ได้คือแต่ละบริเวณในภาพเอกซเรย์มีความเข้มเท่า ๆ กัน มีผลให้ค่าระดับเทาของลูกเหล็กและพื้นหลังในบริเวณใกล้เคียงจุดศูนย์กลางกับบริเวณที่ไกลจากจุดศูนย์กลางมีค่าไม่แตกต่างกันมาก รูปที่ 3.7 แสดงภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งและภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งที่ปรับค่าระดับเทาแล้ว



(ก) ภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง

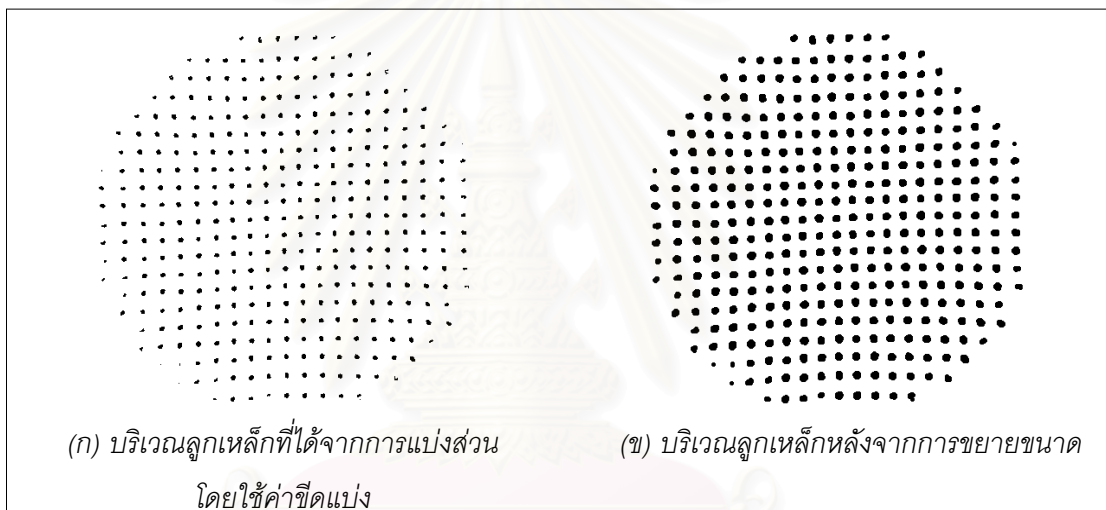
(ข) ภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งที่ปรับค่าระดับเทาแล้ว

รูปที่ 3.7 การปรับค่าระดับเทาของภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง

2) การแบ่งส่วนภาพ

การแบ่งส่วนภาพเพื่อแยกส่วนที่เป็นลูกเหล็กและส่วนที่เป็นพื้นหลังออกจากกัน ทำโดยหาค่าขีดแบ่งจากภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งที่ปรับค่าระดับเทาแล้วในข้อ 1 โดยวิธีการหาค่าขีดแบ่งใช้วิธีการเช่นเดียวกับการหาค่าขีดแบ่งในหัวข้อที่ 3.2.1 รูปที่ 3.8 แสดงผลลัพธ์จากการแบ่งส่วนเป็นภาพลักษณะฐานสองของบริเวณลูกเหล็ก

บริเวณของลูกเหล็กแต่ละลูกในภาพลักษณะฐานสองที่ได้ อาจยังไม่สมบูรณ์และขอบของบริเวณที่เป็นลูกเหล็กอาจจะยังไม่ราบเรียบนัก จึงต้องทำการขยายขนาดของบริเวณลูกเหล็กโดยการขยายขนาดแบบฐานสองด้วยสมาชิกของโครงสร้างแบบวงกลม แสดงภาพลักษณะฐานสองของบริเวณลูกเหล็กที่ขยายขนาดแล้วดังรูปที่ 3.8

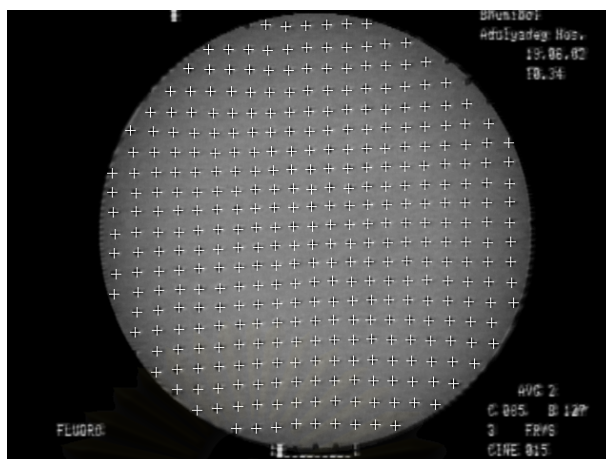


รูปที่ 3.8 ภาพลักษณะฐานสองของบริเวณลูกเหล็ก

3) การคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลูกเหล็ก

การหาจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กแต่ละลูกทำได้โดยการเฉลี่ยค่าตำแหน่งจุดภาพของพื้นที่ (Centroid of area) [17] ที่เป็นลูกเหล็กแต่ละลูกที่ได้จากข้อ 2 โดยเมื่อแทนเซตของจุดภาพซึ่งมีพิกัดเป็น (r, c) ในบริเวณหนึ่งด้วย R คุณสมบัติทางเรขาคณิตอย่างง่ายของบริเวณนี้คือ พื้นที่ A และจุดศูนย์กลาง (\bar{r}, \bar{c}) โดยกำหนดได้ดังสมการที่ 3.1 และแสดงรูปภาพบาทสีขาวแทนจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กที่หาได้ดังรูปที่ 3.9

$$\begin{aligned}
 A &= \sum_{(r,c) \in R} 1 \\
 \bar{r} &= \frac{1}{A} \sum_{(r,c) \in R} r \\
 \bar{c} &= \frac{1}{A} \sum_{(r,c) \in R} c
 \end{aligned}
 \quad \dots (3.1)$$



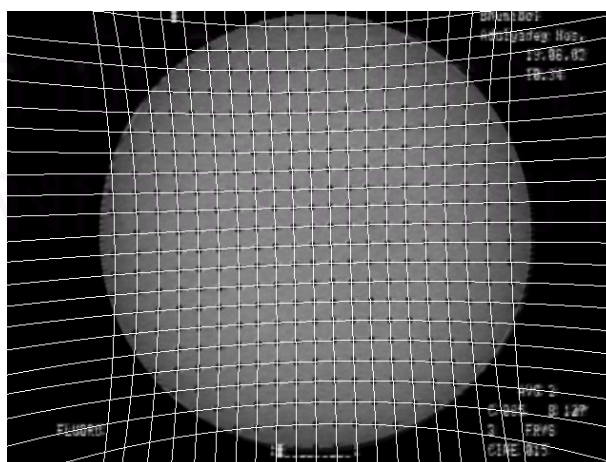
รูปที่ 3.9 จุดศูนย์กลางของลูกเหล็กที่หาได้

3.2.3 การคำนวณเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพ

การคำนวณเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพนี้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ การประมาณหาจุดศูนย์กลางใหม่ และการคำนวณตำแหน่งและค่าระดับเทา ดังนี้

1) การประมาณหาจุดศูนย์กลางใหม่

จุดศูนย์กลางที่คำนวณได้จากหัวข้อที่ 3.2.2 อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่เนื่องมาจากอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งและภาพเอกซเรย์มีความเบี่ยงต่างตำรวมทั้งมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยนำจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กในแต่ละแถว ทั้งแนวตั้งและแนวนอนมาคำนวณหาฟังก์ชันการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression) อันดับที่ 2 ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square error method) [18] จากนั้นจึงหาจุดตัดของเส้นในแนวตั้งและแนวนอนเพื่อเป็นตัวแทนของจุดศูนย์กลางผลลัพธ์ที่ได้คือจุดตัดของเส้นโค้งสีขาวแสดงดังรูปที่ 3.10

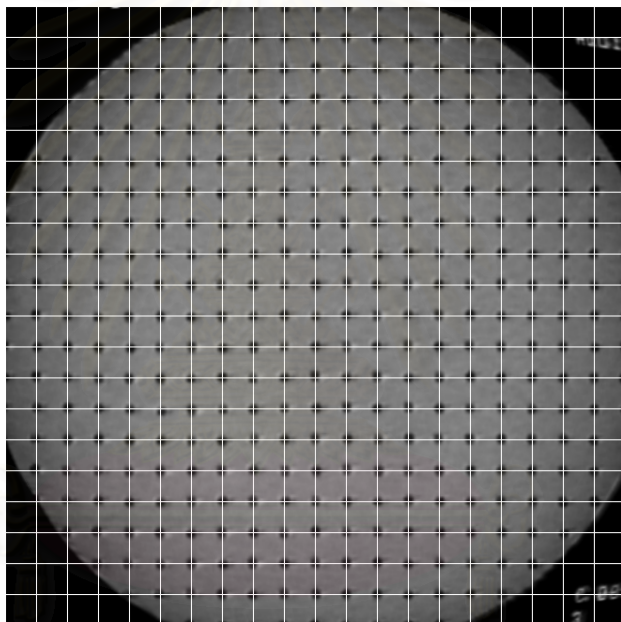


รูปที่ 3.10 เส้นแนวตั้งและเส้นแนวนอนที่ได้จากฟังก์ชันการถดถอยแบบพหุนามของจุดศูนย์กลางลูกเหล็กที่หาไว้แล้ว จุดตัดของเส้นแนวตั้งและเส้นแนวนอนเป็นจุดศูนย์กลางใหม่ของลูกเหล็ก

2) การคำนวณตำแหน่งและค่าระดับเทา

จากจุดตัดของฟังก์ชันพหุนามที่คำนวณได้ในข้อ 1 จึงนำมาหาความสัมพันธ์ของตำแหน่งกับจุดอ้างอิงที่ทราบ ซึ่งจุดตัดเหล่านี้แท้จริงแล้วเรียงตัวกันอยู่ในแนวตั้งและแนวนอนเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้การแปลงแบบเชิงเส้นคู่ดังวิธีในหัวข้อที่ 2.2.1 และการคำนวณนั้นจะทำจากตำแหน่งที่ใช้อ้างอิงย้อนกลับไปว่าตรงกับตำแหน่งใดในภาพที่เพี้ยนไป ซึ่งมักจะได้ผลลัพธ์คือตำแหน่งของจุดเป็นค่าจำนวนจริงและอยู่ระหว่างจุดของภาพที่เพี้ยนไป จึงต้องมีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้นคู่เพื่อหาค่าระดับเทาซึ่งเป็นตัวแทนจากภาพดังวิธีในหัวข้อที่ 2.2.2 ในบทที่ 2

ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีแก้ไขการเพี้ยนทางเรขาคณิตนี้แสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นภาพของอุปกรณ์อ้างอิงที่ถูกปรับแก้การเพี้ยนแล้ว จะเห็นว่าลูกเหล็กเรียงตัวกันอยู่ในแนวเส้นตรงสีขาว



รูปที่ 3.11 ภาพอุปกรณ์อ้างอิงหลังจากแก้ไขการเพี้ยนแล้ว

สำหรับการทดสอบความถูกต้องของการแก้ไขการเพี้ยนจะกล่าวถึงในบทที่ 6 ซึ่งเป็นเรื่องของการทดลองและผลการทดลองในงานวิจัยนี้

บทที่ 4

การคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป

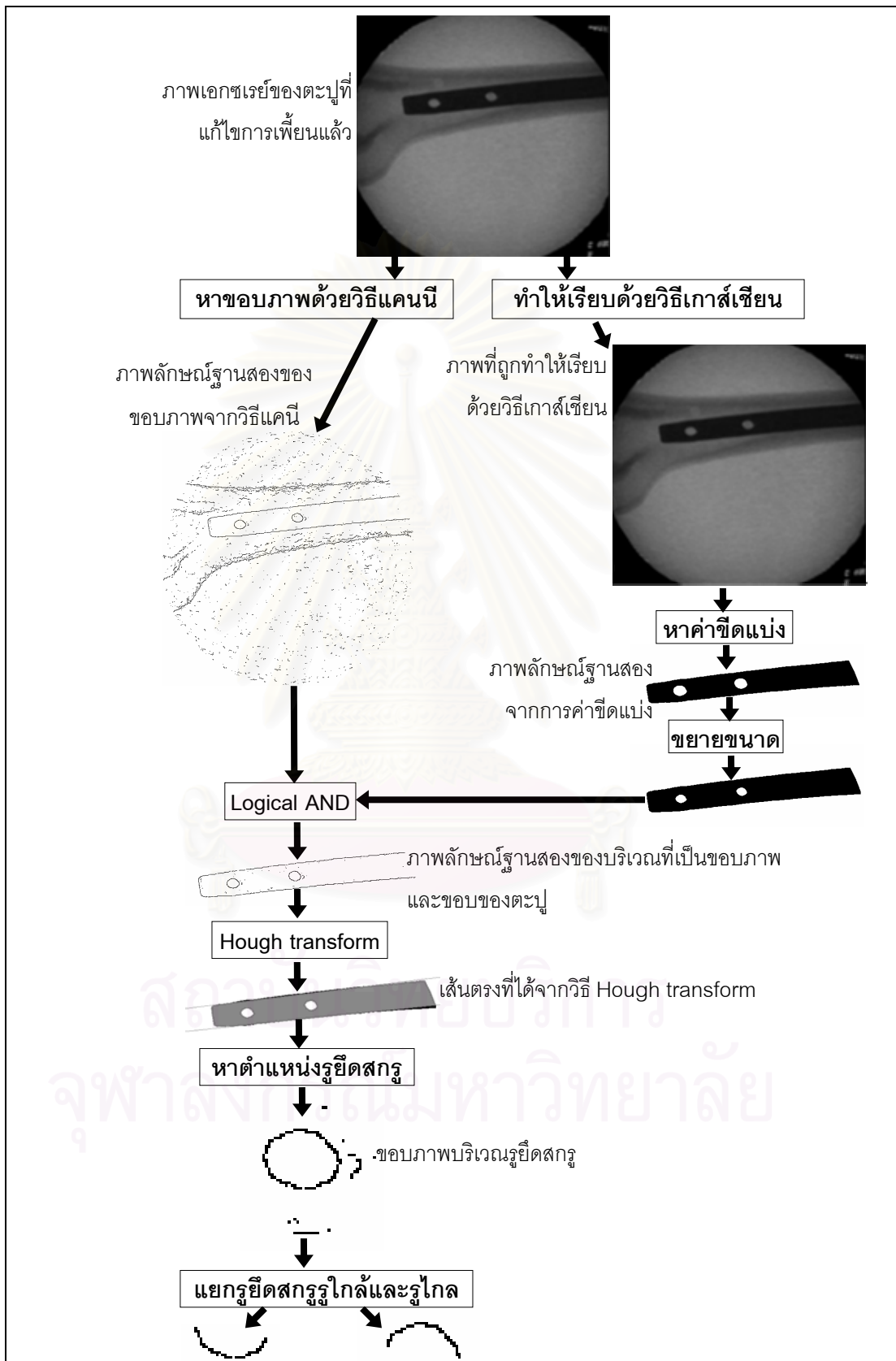
ก่อนที่แพทย์จะทำการเจาะกระดูกเพื่อใส่สกรูยึดกระดูกเข้ากับตะปูโดยใช้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายนั้น แพทย์จำเป็นต้องปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปไปจนกระทั่งมองเห็นภาพเอกซเรย์ของรูยึดสกรู รูใกล้และรูไกลซ้อนทับกันเป็นวงกลมที่สมบูรณ์ก่อน จึงจะสามารถใช้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายถึงจนกระทั่งให้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายตรงกับรูยึดสกรูแล้วจึงจะเจาะยึดสกรูได้ การคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยแนะแนวทางการปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปให้แก่แพทย์ โดยจะคำนวณหาทิศทางและระยะการปรับหมุนเป็นองศาของแกนรูปตัว C รอบแกน x และแกน z

วิธีการคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะคำนวณจากภาพเอกซเรย์ของตะปูที่มองเห็นส่วนโค้งคล้ายวงรีซึ่งเกิดจากการเหลื่อมกันของรูยึดสกรูรูใกล้แหล่งกำเนิดและรูไกลแหล่งกำเนิด (ขอเรียกว่ารูใกล้และรูไกล) เต็มทั้งส่วนและชัดเจน และภาพเอกซเรย์นี้จะต้องผ่านกระบวนการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยขั้นตอนหลักของวิธีการคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปประกอบด้วย การแบ่งส่วนภาพเพื่อกำหนดบริเวณรูยึดสกรูจากภาพเอกซเรย์ การคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของรูยึดสกรูใน 3 มิติ และการแนะแนวทางการปรับหมุนแกนรูปตัว C ของเครื่องฟลูออโรสโคป ดังนี้

4.1 การแบ่งส่วนภาพเพื่อกำหนดบริเวณรูยึดสกรูจากภาพเอกซเรย์

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแบ่งแยกเอาจุดภาพจากภาพเอกซเรย์ของตะปูที่เป็นบริเวณขอบภาพของรูยึดสกรูรูใกล้และรูไกล แล้วใช้จุดภาพเหล่านี้ไปคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของรูยึดสกรูใน 3 มิติในหัวข้อที่ 4.2 ต่อไป

ขั้นตอนหลักในการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.1 ขั้นตอนแรกจะนำภาพเอกซเรย์ของตะปูที่แก้ไขการเพี้ยนแล้วมาหาขอบภาพด้วยวิธีแคนนี่ และสร้างภาพลักษณะฐานสองจากภาพที่ถูกทำให้เรียบด้วยวิธีเกาส์เซียนโดยใช้ค่าขีดแบ่ง และทำการขยายขนาด จากนั้นนำภาพที่ขยายขนาดแล้วไปแอนด์กับภาพลักษณะฐานสองของขอบภาพจากวิธีแคนนี่แล้วหาบริเวณที่เป็นขอบของตะปูโดยใช้เส้นตรงที่ได้จากวิธี Hough transform ต่อมาหาตำแหน่งรูยึดสกรูและเลือกรูยึดสกรูที่อยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางภาพมากกว่ามา 1 รู จากนั้นแยกรูยึดสกรูรูใกล้และรูไกลโดยจัดวงรีให้กับขอบภาพเพื่อใช้แกนหลักแยกขอบภาพของรูยึดสกรูรูใกล้และรูไกลออกจากกัน รายละเอียดการคำนวณในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนในการแบ่งส่วนภาพเพื่อกำหนดบริเวณรูยี่ดิสก์ในภาพเอกซเรย์

1) หาขอบภาพด้วยวิธีแคนนี่

ในขั้นตอนนี้จะนำภาพเอกซเรย์ของตะปูที่แก้ไขการเพี้ยนแล้วมาหาขอบภาพด้วยวิธีแคนนี่ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.3.5 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือภาพลักษณะฐานสองของขอบภาพที่ได้จากวิธีแคนนี่ ตัวอย่างผลลัพธ์แสดงดังภาพลักษณะฐานสองของขอบภาพจากวิธีแคนนี่แสดงในรูปที่ 4.1

2) หาค่าขีดแบ่งและขยายขนาด

ในขั้นตอนนี้จะนำภาพเอกซเรย์ของตะปูที่แก้ไขการเพี้ยนแล้วมาทำให้เรียบด้วยวิธีเกาส์เซียนแล้วสร้างภาพลักษณะฐานสองโดยการแบ่งส่วนภาพด้วยค่าขีดแบ่งเพื่อเลือกเอาเฉพาะบริเวณที่เป็นตะปู โดยใช้วิธีหาค่าขีดแบ่งดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.1 ค่าขีดแบ่งที่ได้อาจมีค่าว่างมากเกินไปทำให้ส่วนที่เป็นขอบภาพและเป็นขอบของตะปูถูกตัดทิ้งออกไปด้วย แสดงว่าบริเวณภาพลักษณะฐานสองที่ได้จากการแบ่งส่วนโดยใช้ค่าขีดแบ่งอาจยังไม่ครอบคลุมจุดภาพที่เป็นขอบภาพและเป็นขอบของตะปู ในขั้นตอนนี้จะทำการขยายขนาดภาพลักษณะฐานสองเพื่อเพิ่มพื้นที่ของบริเวณที่ได้จากการหาค่าขีดแบ่งและเพิ่มความมั่นใจว่าภาพลักษณะฐานสองที่ได้นี้ครอบคลุมบริเวณที่เป็นขอบภาพและขอบของตะปูอยู่ด้วย จากนั้นจึงนำมาแอนด์กับภาพลักษณะฐานสองซึ่งเป็นขอบภาพที่ได้จากวิธีแคนนี่เพื่อตัดส่วนที่เป็นขอบภาพที่ไม่อยู่ในบริเวณของตะปูออกไป ตัวอย่างผลลัพธ์แสดงดังภาพลักษณะฐานสองของบริเวณที่เป็นขอบภาพและขอบของตะปูแสดงในรูปที่ 4.1

3) หาบริเวณที่เป็นขอบของตะปูโดยใช้วิธี Hough transform

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาขอบเขตบริเวณที่เป็นตะปูในภาพเอกซเรย์ โดยการหาแนวเส้นที่เป็นขอบของแท่งตะปูตามแนวยาวของตะปูโดยใช้วิธี Hough transform กับภาพภาพลักษณะฐานสองของบริเวณที่เป็นขอบภาพและขอบของตะปูซึ่งเป็นภาพผลลัพธ์ที่ได้จากข้อ 2 ในขั้นตอนนี้ประกอบด้วยอีก 2 ขั้นตอนคือหาเส้นตรงแทนขอบของตะปูโดยใช้วิธี Hough transform และปรับแก้เส้นตรงที่ได้จากวิธี Hough transform ให้ใกล้เคียงกันแนวของตะปูมากขึ้น ดังนี้

ก) หาเส้นตรงแทนขอบของตะปูโดยใช้วิธี Hough transform

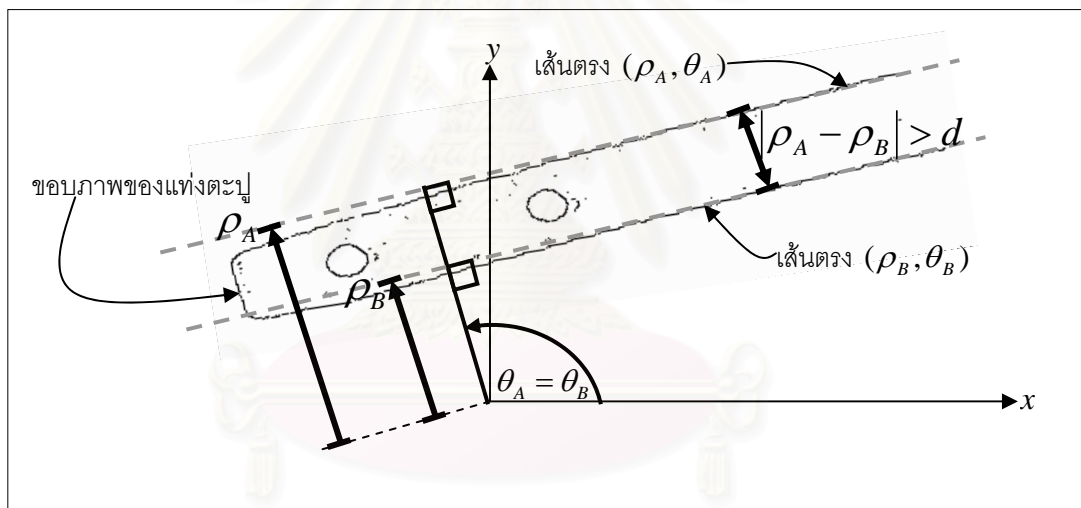
จากภาพภาพลักษณะฐานสองของบริเวณที่เป็นขอบภาพและขอบของตะปู (แสดงในรูปที่ 4.1) จะเห็นว่าจุดภาพเรียงตัวกันในแนวเส้นตรง 2 เส้นที่ยาวกว่าเส้นอื่น ๆ อย่างชัดเจน เส้นตรง 2 เส้นนี้คือขอบของแท่งตะปูตามแนวยาวทั้ง 2 ด้าน ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะคำนวณหาเส้นตรงทั้ง 2 เส้นโดยใช้วิธี Hough transform ดังนี้

- คำนวณหาเส้นตรง (ρ_A, θ_A) ซึ่งเป็นตัวแทนขอบด้านหนึ่งของตะปู โดยเลือกจากเส้นตรงที่มีจำนวนสมาชิกในปริภูมิของพารามิเตอร์มากที่สุด หรือกล่าวอีกอย่างได้ว่าเส้นตรง (ρ_A, θ_A) เป็นเส้นตรงที่มีจำนวนจุดภาพอยู่มากที่สุดนั่นเอง
- คำนวณหาเส้นตรง (ρ_B, θ_B) ซึ่งเป็นตัวแทนขอบด้านที่ 2 ของตะปู โดยเลือกจากเส้นตรงที่มีจำนวนสมาชิกมากที่สุดเป็นลำดับถัดไปและจะต้องไม่มีจุดตัดกับเส้นตรง (ρ_A, θ_A) ของด้านแรกใน

ภาพ โดยมีค่า $|\rho_A - \rho_B| > d$ เมื่อ d คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจริงของตะปู ขนาด d นี้จะเท่ากับขนาดของตะปูที่เกิดขึ้นในภาพฉายหรือภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปเมื่อตะปูอยู่ที่ตำแหน่งฉาก (ตัวอย่างดังรูปที่ 4.2) หรือ d คือขนาดที่เล็กที่สุดของตะปูที่สามารถเกิดขึ้นได้ในภาพเอกซเรย์ ตัวอย่างเส้นตรง (ρ_A, θ_A) และ (ρ_B, θ_B) แสดงดังเส้นประหนาสี่เทาในรูปที่ 4.3



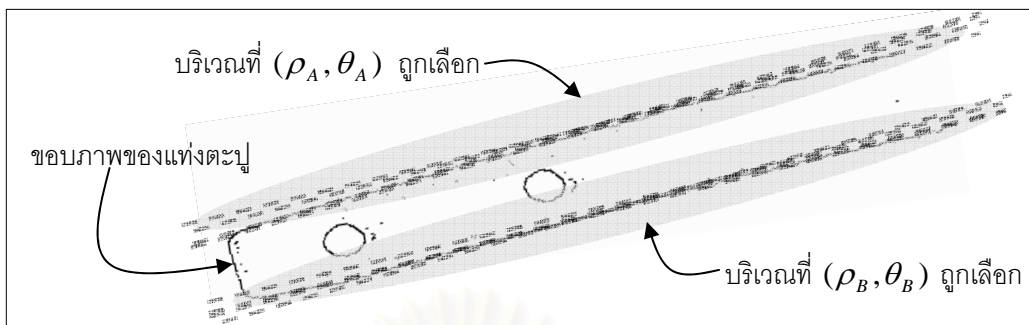
รูปที่ 4.2 ตะปูอยู่ที่ตำแหน่งฉาก



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างเส้นตรง (ρ_A, θ_A) และ (ρ_B, θ_B) ที่ถูกเลือกให้เป็นขอบของตะปูตามแนวยาว

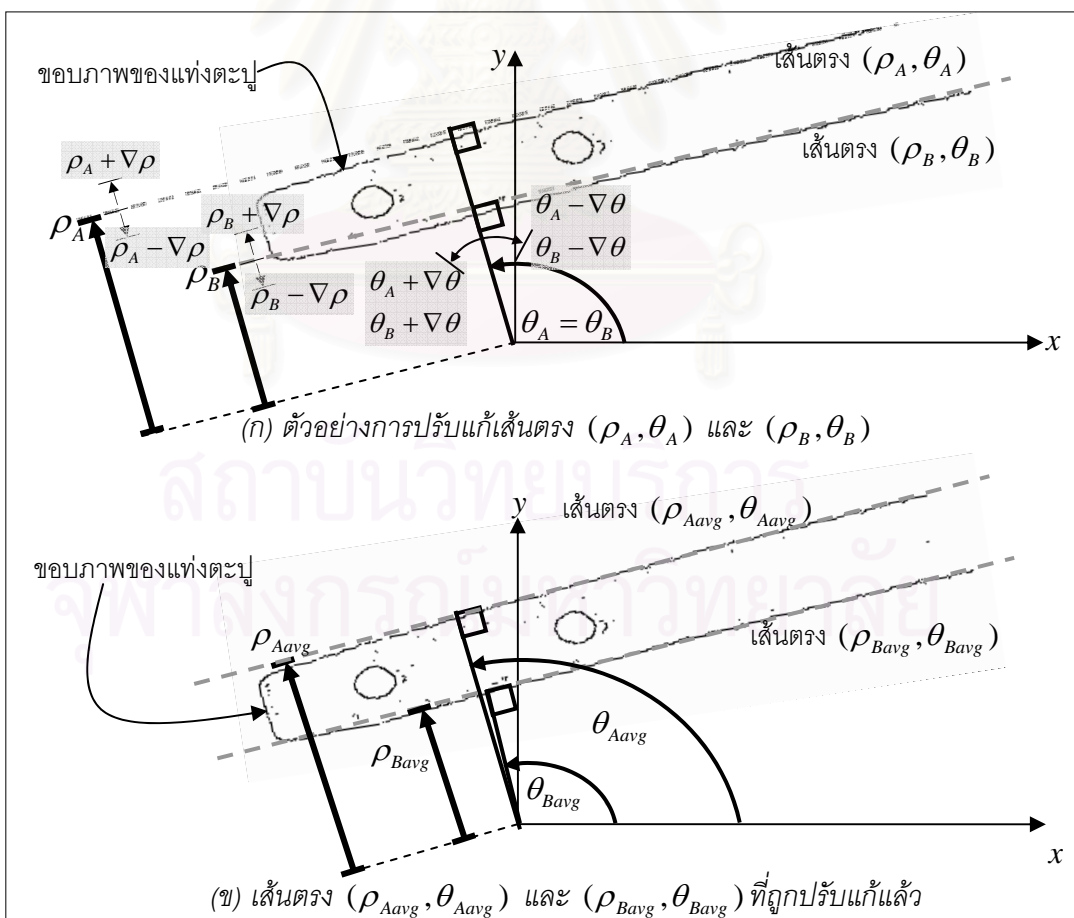
ข) ปรับแก้เส้นตรงที่ได้จากวิธี Hough transform ให้ใกล้เคียงกันแนวของตะปูมากขึ้น

เนื่องจากตะปูอาจบิดตัวได้ในขั้นตอนการผ่าตัดใส่ตะปูและตะปูเองมีลักษณะโค้งงอเล็กน้อย ขอบภาพบริเวณขอบของแท่งตะปูจึงโค้งออกจากแนวเส้นตรงได้อยู่บ้าง มีผลให้แนวเส้นตรง (ρ_A, θ_A) และ (ρ_B, θ_B) ที่ได้จากวิธี Hough transform อาจเพี้ยนออกไปจากแนวของแท่งตะปูได้ ดังเช่นเส้นประสี่เทาในรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าเส้นตรง (ρ_A, θ_A) และ (ρ_B, θ_B) เพี้ยนไปจากแนวจริงของตะปูอยู่เล็กน้อย ลักษณะเส้นที่โค้งเล็กน้อยนี้ทำให้เกิดเส้นตรง (ρ, θ) ที่มีจำนวนสมาชิกมาก ๆ ใกล้เคียงกันหลายเส้น แสดงตัวอย่างเส้นประสี่เทาในรูปที่ 4.4 ซึ่งเส้นตรง (ρ_A, θ_A) และ (ρ_B, θ_B) นั้นคือเส้นตรงที่ถูกเลือกจาก 2 บริเวณ (แสดงดังบริเวณสี่เทาในรูปที่ 4.4) ในระนาบ $\rho - \theta$ โดยเลือกเอาเส้นที่มีจำนวนสมาชิกมากที่สุดเฉพาะที่ (Local maximum) จากแต่ละบริเวณขึ้นมานั่นเอง



รูปที่ 4.4 เส้นตรงที่มีจำนวนสมาชิกมากใกล้เคียงกัน

การปรับแก้ให้แนวเส้นตรง (ρ_A, θ_A) และ (ρ_B, θ_B) ใกล้เคียงกับแนวของแท่งตะปูมากขึ้นทำ โดยในแต่ละเส้นจะคำนวณหา $(\rho_{avg}, \theta_{avg})$ จากการเฉลี่ยค่า (ρ, θ) ในช่วงที่กำหนดขึ้น โดยช่วงของ ρ คือ $\rho \pm \nabla\rho$ และช่วงของ θ คือ $\theta \pm \nabla\theta$ ในแต่ละค่าของ (ρ, θ) ในช่วงที่กำหนดจะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าจำนวนสมาชิกด้วย แสดงวิธีการปรับแก้ดังสมการที่ 4.1 และตัวอย่างการปรับแก้เส้นตรง (ρ_A, θ_A) และ (ρ_B, θ_B) ในรูปที่ 4.5 ก ส่วนในรูปที่ 4.5 ข แสดงเส้นตรง $(\rho_{Aavg}, \theta_{Aavg})$ และ $(\rho_{Bavg}, \theta_{Bavg})$ ที่ถูกปรับแก้แล้ว



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการปรับแก้เส้นตรงและเส้นตรงที่ถูกปรับแก้แล้ว

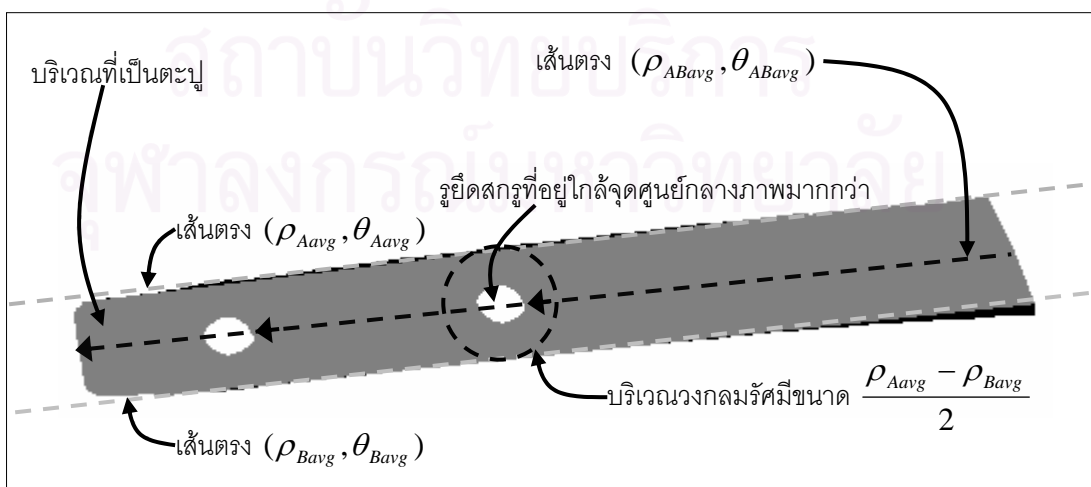
$$\rho_{avg} = \frac{\sum_{i=\rho-\nabla\rho}^{\rho+\nabla\rho} \sum_{j=\theta-\nabla\theta}^{\theta+\nabla\theta} in(\rho_i, \theta_j)}{\sum_{i=\rho-\nabla\rho}^{\rho+\nabla\rho} \sum_{j=\theta-\nabla\theta}^{\theta+\nabla\theta} n(\rho_i, \theta_j)}, \theta_{avg} = \frac{\sum_{i=\rho-\nabla\rho}^{\rho+\nabla\rho} \sum_{j=\theta-\nabla\theta}^{\theta+\nabla\theta} jn(\rho_i, \theta_j)}{\sum_{i=\rho-\nabla\rho}^{\rho+\nabla\rho} \sum_{j=\theta-\nabla\theta}^{\theta+\nabla\theta} n(\rho_i, \theta_j)} \dots (4.1)$$

เมื่อ ρ_i คือระยะที่ $\rho = i$
 θ_j คือมุมที่ $\theta = j$
 $n(\rho_i, \theta_j)$ คือจำนวนสมาชิกที่ $\rho = i$ และ $\theta = j$

4) **หาตำแหน่งรูยึดสกรู**

การหาตำแหน่งรูยึดสกรูในภาพเอกซเรย์ทำโดยการกราดภาพ (Scan) เป็นแนวเส้นตรงในบริเวณที่เป็นตะปูซึ่งบริเวณนี้กำหนดได้จากภาพลักษณะพื้นฐานสองจากการหาค่าขีดแบ่งและถูกขยายขนาดแล้วจากข้อ 2 และต้องเป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นตรง $(\rho_{Aavg}, \theta_{Aavg})$ และ $(\rho_{Bavg}, \theta_{Bavg})$ แสดงตัวอย่างดังบริเวณที่เป็นตะปูสีเทาในรูปที่ 4.6

ส่วนเส้นตรงที่ใช้เป็นแนวในการกราดภาพนั้นใช้เส้นตรง $(\rho_{ABavg}, \theta_{ABavg})$ คำนวณได้จาก $\left(\frac{\rho_{Aavg} + \rho_{Bavg}}{2}, \frac{\theta_{Aavg} + \theta_{Bavg}}{2}\right)$ ซึ่งเป็นเส้นตรงที่ได้จากการเฉลี่ยค่าระหว่างเส้นตรง $(\rho_{Aavg}, \theta_{Aavg})$ กับ $(\rho_{Bavg}, \theta_{Bavg})$ การกราดภาพนั้นจะกราดตามแนวเส้นตรงจากขวาไปซ้ายหรือซ้ายไปขวาก็ได้ ตัวอย่างในเส้นประสีดำนรูปที่ 4.6 เป็นการกราดภาพจากขวาไปซ้าย เมื่อกราดภาพตั้งแต่เริ่มบริเวณที่เป็นตะปูจนสุดบริเวณแล้ว ทำให้พบบริเวณสีขาวรูปร่างเป็นวงรีคล้ายเมล็ดข้าวที่ถูกแนวเส้นตรงตัด 2 บริเวณ ซึ่งเป็นบริเวณของรูยึดสกรูนั่นเอง ในกรณีนี้เป็นกรณีที่รูยึดสกรูส่วนปลายปรากฏในภาพเอกซเรย์ทั้งสองรู ในการคำนวณต่อไปนั้นจะเลือกรูยึดสกรูรูใดก็ได้เพียงรูเดียวเท่านั้น ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 4.6 เลือกรูยึดสกรูที่อยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางภาพมากกว่า

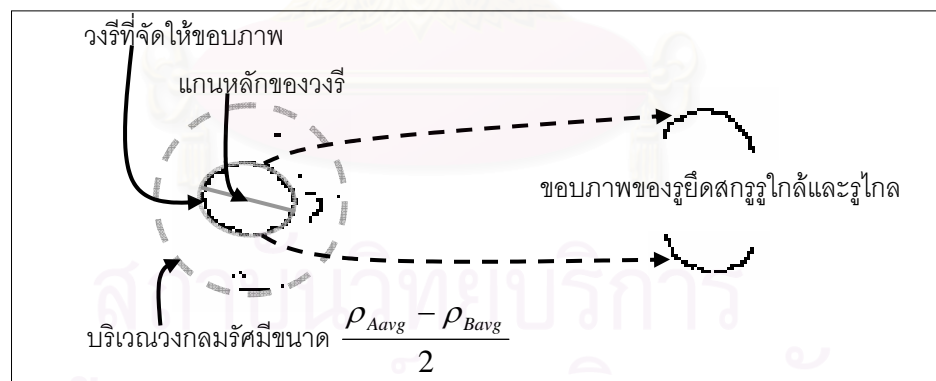


รูปที่ 4.6 การหาตำแหน่งรูยึดสกรูในภาพเอกซเรย์

จากรูปที่ 4.6 เมื่อเลือกรูยี่ดสกรูแล้วจะกำหนดพื้นที่วงกลมให้ครอบคลุมบริเวณรูยี่ดตะปู โดยจุดศูนย์กลางของวงกลมหาได้จากการเฉลี่ยค่าตำแหน่งจุดภาพของพื้นที่ (Centroid of area) [17] ในบริเวณสี่ขาวรูปว่างเป็นวงรีคล้ายเมล็ดข้าว ส่วนรัศมีมีขนาด $\frac{\rho_{Aavg} - \rho_{Bavg}}{2}$ จากนั้นจึงนำภาพลักษณะฐานสองภายในบริเวณวงกลมนี้ไปแอนดกับภาพลักษณะฐานสองของขอบภาพจากวิธีแคนนี่ในรูปที่ 4.1 ได้ผลลัพธ์เป็นขอบภาพบริเวณรูยี่ดสกรู

5) แยกรูยี่ดสกรูรูใกล้และรูไกล

ส่วนการแยกรูยี่ดสกรูรูใกล้และรูไกลนั้นทำโดยจัดวงรีให้กับขอบภาพของบริเวณรูยี่ดสกรูที่หาได้ แต่เนื่องจากภาพเอกซเรย์นั้นมีความเบี่ยงต่างต่ำและมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก มีผลให้ขอบภาพอาจมีส่วนที่ขาดหายไม่ต่อเนื่องกันนักและขอบภาพที่ได้อาจมีสัญญาณรบกวนปะปนมาด้วย จึงไม่สามารถจัดวงรีให้กับขอบภาพโดยตรงได้ การจัดวงรีให้กับขอบภาพนั้นจะเริ่มจัดให้กับส่วนขอบภาพที่จำนวนจุดภาพมากที่สุดก่อนแล้วคำนวณจำนวนจุดภาพที่วงรีที่จัดได้ลากผ่านเปรียบเทียบกับความยาวเส้นรอบวงของวงรีที่จัดได้ ถ้ามีจำนวนจุดภาพมากกว่า 80% ถือว่าวงรีที่จัดได้เป็นคำตอบ แต่ถ้ายังน้อยกว่า 80% ให้นำส่วนขอบภาพที่ปริมาณจุดภาพรองลงมาพร้อมกับส่วนขอบภาพที่มีปริมาณมากกว่ามาจัดวงรีอีกครั้ง ทำเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าจะได้จุดภาพรวมกันมากกว่า 80% แล้วจึงใช้แกนหลักของวงรีที่จัดได้แยกจุดภาพที่ใช้จัดวงรีออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนของรูยี่ดสกรูรูใกล้และรูไกล แสดงตัวอย่างดังวงรีสี่เท่าที่จัดได้ในรูปที่ 4.7



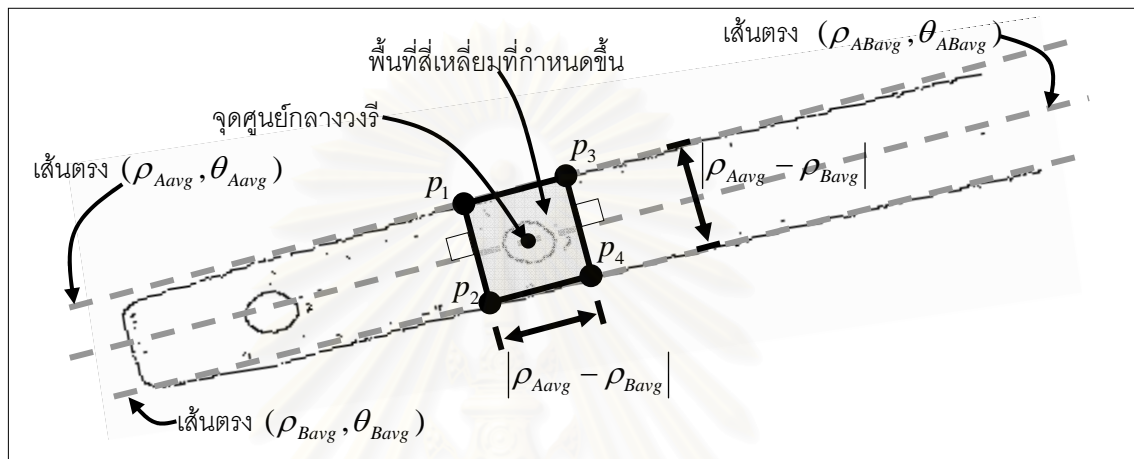
รูปที่ 4.7 การแยกรูยี่ดสกรูรูใกล้และรูไกล

4.2 การคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของรูยี่ดสกรูใน 3 มิติ

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนย้อนกลับจากภาพเอกซเรย์ 2 มิติของรูยี่ดสกรูเพื่อหาตำแหน่งและทิศทางของรูยี่ดสกรูที่เกิดขึ้นใน 3 มิติโดยเป็นตำแหน่งและทิศทางเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องฟลูออโรสโคป การคำนวณแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการกำหนดพื้นที่ในการคำนวณและขั้นตอนการคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของรูยี่ดสกรู ดังนี้

1) กำหนดพื้นที่ในการคำนวณ

การกำหนดพื้นที่ในการคำนวณจากภาพเอกซเรย์ของตะปูเป็นการประมาณเพื่อกำหนดขอบเขตที่ครอบคลุมการฉายของรูยี่ดสกรูใกล้และรูไกล หรือกำหนดขอบเขตที่ครอบคลุมรูยี่ดสกรูที่เกิดขึ้นในภาพเอกซเรย์และส่วนของรูยี่ดสกรูที่ถูกบังจนทำให้ไม่สามารถมองเห็นได้ในภาพเอกซเรย์เนื่องจากการบิดตัวของตะปู



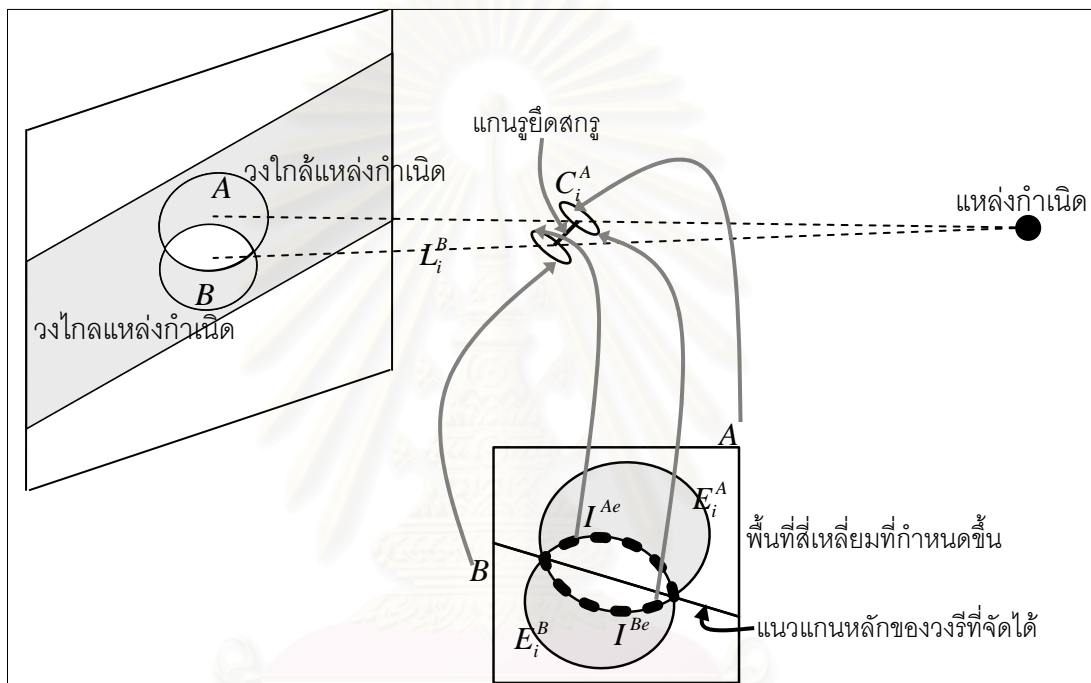
รูปที่ 4.8 การกำหนดพื้นที่ในการคำนวณ

เนื่องจากรูยี่ดสกรูนั้นเป็นรูที่อยู่บนแท่งตะปูและมีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของตะปู ดังนั้นไม่ว่าตะปูจะบิดตัวไปอย่างไร ขนาดของรูยี่ดสกรูที่เกิดขึ้นในภาพฉายก็ต้องเล็กกว่าขนาดของตะปูที่เกิดขึ้นในภาพฉายเสมอ การกำหนดพื้นที่ในการคำนวณจึงกำหนดเป็นรูปสี่เหลี่ยมความกว้างแต่ละด้านจะใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตะปูที่ประมาณได้จากภาพเอกซเรย์ จากรูปที่ 4.8 พื้นที่สี่เหลี่ยมสี่ด้านคือพื้นที่ที่กำหนดขึ้น มีจุดมุมคือ p_1 , p_2 , p_3 และ p_4 เส้นตรง p_1p_2 ตั้งฉากกับเส้นตรง $(\rho_{ABavg}, \theta_{ABavg})$ และอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของวงรีที่คำนวณได้จากหัวข้อที่ 4.1 เป็นระยะ $\frac{|\rho_{Aavg} - \rho_{Bavg}|}{2}$ ส่วนเส้นตรง p_3p_4 ตั้งฉากกับเส้นตรง $(\rho_{ABavg}, \theta_{ABavg})$ และอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของวงรีที่คำนวณได้จากหัวข้อที่ 4.1 เป็นระยะ $\frac{|\rho_{Aavg} - \rho_{Bavg}|}{2}$ โดยจุด p_3 คือจุดตัดกับเส้นตรง $(\rho_{Aavg}, \theta_{Aavg})$ และ p_4 คือจุดตัดกับเส้นตรง $(\rho_{Bavg}, \theta_{Bavg})$ เช่นกัน

2) คำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของรูยี่ดสกรู

ขั้นตอนนี้จะคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของรูยี่ดสกรูโดยใช้ขอบภาพที่แบ่งส่วนได้จากการแยกรูยี่ดสกรูใกล้และรูไกลจากหัวข้อที่ 4.1 แต่เนื่องจากการบิดตัวของตะปูทำให้ส่วนที่เป็นรูยี่ดสกรูทั้งรูใกล้และรูไกลถูกบังด้วยตัวตะปูเองอยู่ จุดขอบภาพของรูยี่ดสกรูที่ปรากฏในภาพเอกซเรย์จึงเป็นส่วนน้อยเท่านั้น เพราะถ้าหาปริมาณจุดภาพรูยี่ดสกรูใกล้หรือรูไกลปรากฏให้เห็นในภาพเอกซเรย์ถึงครึ่งหนึ่งหรือมากกว่าแสดงว่ารูยี่ดสกรูได้ซ้อนทับกันเป็นวงกลมที่สมบูรณ์แล้ว ขอบภาพที่แบ่งส่วนได้นี้จึงเป็นเพียง

ส่วนน้อยของรูยี่ดสกรูเท่านั้น ถ้าหากคำนวณหาค่าตอบโดยตรงจากขอบภาพที่แบ่งส่วนได้อาจทำให้มีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้สูงมาก ด้วยสาเหตุนี้ในการคำนวณจะกระทำโดยอ้อม กล่าวคือการคำนวณจะเป็นการประมาณหาค่าตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่รูยี่ดสกรูสามารถปรากฏขึ้นในภาพเอกซเรย์ได้ เมื่อตะปูอยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ ใน 3 มิติแล้วเกิดภาพฉายอยู่ในขอบเขตของพื้นที่ที่กำหนดไว้ในข้อ 1 โดยวิธีการคำนวณในขั้นตอนนี้จะประกอบด้วยขั้นตอนย่อยอีก 3 ขั้นตอนคือคำนวณหาวงรีที่เป็นไปได้ในภาพเอกซเรย์ คำนวณหาวงกลมที่เป็นไปได้ใน 3 มิติ และคำนวณหาค่าตอบ ดังนี้



รูปที่ 4.9 การคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของรูยี่ดสกรู

ก) คำนวณหาวงรีที่เป็นไปได้ในภาพเอกซเรย์

ขั้นตอนนี้จะคำนวณหาวงรีที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่สามารถจัดให้กับขอบภาพของรูยี่ดสกรูรูโกล์และรูโกล์ได้ โดยวงรีจะต้องอยู่ในขอบเขตพื้นที่สี่เหลี่ยมที่กำหนดขึ้น (วิธีการจัดวงรีนั้นจะปรับปรุงวิธีการจัดวงรีจากหัวข้อที่ 2.3.4 โดยจากสมการที่ 2.17 ตัดพจน์ที่มีสัมประสิทธิ์ d และ e ออกและกำหนดเงื่อนไขในการจัดวงรีเช่นเดิมทุกประการ) ขั้นตอนในการคำนวณมีดังนี้

- แบ่งพื้นที่สี่เหลี่ยมที่กำหนดขึ้นออกเป็น 2 ส่วนโดยใช้แนวแกนหลักของวงรีที่จัดได้ในหัวข้อที่ 4.1 จากรูปที่ 4.9 พื้นที่สี่เหลี่ยมจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วน A (พื้นที่ลายตารางแนวตั้ง) และส่วน B (พื้นที่ลายตารางแนวเฉียง) โดยจะเรียกขอบภาพของรูยี่ดสกรูที่อยู่ในส่วน A ว่า I^{Ae} และขอบภาพของรูยี่ดสกรูที่อยู่ในส่วน B เรียกว่า I^{Be}

- จัดวงรี E_i^A ให้กับขอบภาพ I^{Ae} โดยใช้จุดภาพทุกจุดภาพที่อยู่ในบริเวณ B เป็นจุดศูนย์กลางในการจัดวงรี

- จัดวงรี E_i^B ให้กับขอบภาพ I^{Be} โดยใช้จุดภาพทุกจุดภาพที่อยู่ในบริเวณ A เป็นจุดศูนย์กลางในการจัดวงรี

- เลือกเอาเฉพาะวงรี E_i^A และ E_i^B ที่สามารถวาดกราฟแล้วอยู่ในพื้นที่สี่เหลี่ยมที่กำหนดเท่านั้นไปคำนวณต่อ

ข) คำนวณหาวงกลมที่เป็นไปได้ใน 3 มิติ

จากวงรี E_i^A และ E_i^B ที่คำนวณได้จากข้อ ก นั้นในขั้นตอนนี้จะนำไปคำนวณหาวงกลมซึ่งเป็นตัวแทนของรูยี่ดสกรูที่เป็นไปได้ทั้งหมดใน 3 มิติของรูยี่ดสกรู ขั้นตอนในการคำนวณมีดังนี้

- เนื่องจากวงรี 1 วงจะคำนวณได้ผลลัพธ์เป็นวงกลมใน 3 มิติ 2 วง (ดังหัวข้อที่ 2.4.4) แต่เนื่องจากวงรี E_i^A และ E_i^B เป็นวงรีที่เกิดจากรูยี่ดสกรูที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพื้นที่การฉายภาพของเครื่องฟลูออโรสโคปจึงทำให้วงกลมใน 3 มิติ 2 วงที่คำนวณได้จากวงรีแต่ละวงมีจุดศูนย์กลางใกล้เคียงกันมากในงานวิจัยนี้จึงนำจุดศูนย์กลางทั้งสองมาเฉลี่ยกันและกำหนดให้เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมที่หาได้ใน 3 มิติเพียงวงเดียว โดยกำหนดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมที่หาได้จาก E_i^A คือ C_i^A และจุดศูนย์กลางของวงกลมที่หาได้จาก E_i^B คือ C_i^B

- กำหนดให้ C_i^A เป็นจุดศูนย์กลางของรูยี่ดสกรูรูโกลั่มแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ และกำหนดให้เส้นตรง L_i^B เป็นเส้นตรงที่ลากจากแหล่งกำเนิดไปจนถึงจุดภาพทั้งหมดที่อยู่ในส่วน B และเป็นเส้นตรงที่ผ่านจุดศูนย์กลางรูยี่ดสกรูรูโกลั่มใน 3 มิติ จากนั้นคำนวณหารูยี่ดสกรูรูโกลั่มใน 3 มิติโดยคำนวณหาแกนรูยี่ดสกรูจากเส้นตรงที่ลากจาก C_i^A ไปตัดกับเส้นตรง L_i^B เป็นระยะเท่ากับขนาดของแกนรูยี่ดสกรู

- กำหนดให้ C_i^B เป็นจุดศูนย์กลางของรูยี่ดสกรูรูโกลั่มแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ และกำหนดให้เส้นตรง L_i^A เป็นเส้นตรงที่ลากจากแหล่งกำเนิดไปจนถึงจุดภาพทั้งหมดที่อยู่ในส่วน A และเป็นเส้นตรงที่ผ่านจุดศูนย์กลางรูยี่ดสกรูรูโกลั่มใน 3 มิติ จากนั้นคำนวณหารูยี่ดสกรูรูโกลั่มใน 3 มิติโดยคำนวณหาแกนรูยี่ดสกรูจากเส้นตรงที่ลากจาก C_i^B ไปตัดกับเส้นตรง L_i^A เป็นระยะเท่ากับขนาดของแกนรูยี่ดสกรู

ค) คำนวณหาค่าตอบ

การคำนวณหาค่าตอบของรูยี่ดสกรูใน 3 มิติทำโดยคำนวณหาภาพฉายวงรีของรูยี่ดสกรูรูโกลั่มและรูโกลั่มใน 3 มิติที่คำนวณได้จากข้อ ข ทุกคู่ ถ้าหากมีคู่วาดกราฟแล้ววงเกินกว่าพื้นที่สี่เหลี่ยมที่กำหนดให้ตัดคู่นั้นทิ้ง แล้วนำคู่ที่เหลือไปคำนวณหาผลรวมระยะทางพีชคณิตเฉลี่ย D_{avg} ของภาพฉายของรูยี่ดสกรูรูโกลั่มและรูโกลั่มกับขอบภาพของรูยี่ดสกรูดังสมการที่ 4.2 ค่าตอบคือรูยี่ดสกรูรูโกลั่มและรูโกลั่มที่มีค่า D_{avg} น้อยที่สุด

$$D_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{N_n} [D(p_i, A_n)]^2}{N_n} + \frac{\sum_{f=1}^{N_f} [D(p_j, A_f)]^2}{N_f} \quad \dots (4.2)$$

- เมื่อ ρ_i คือจุดภาพของรูยี่ดสกรูใกล้ในภาพเอกซเรย์
 A_n คือพารามิเตอร์ของวงรีวงใกล้
 N_n คือจำนวนจุดภาพของรูยี่ดสกรูใกล้ในภาพเอกซเรย์
 p_j คือจุดภาพของรูยี่ดสกรูไกลในภาพเอกซเรย์
 A_f คือพารามิเตอร์ของวงรีวงไกล
 N_f คือจำนวนจุดภาพของรูยี่ดสกรูไกลในภาพเอกซเรย์

4.3 การแนะนำแนวทางการปรับหมุนแขนรูปตัว C ของเครื่องฟลูออโรสโคป

จากรูยี่ดสกรูใน 3 มิติที่คำนวณได้ในหัวข้อที่ 4.2 แกนของรูยี่ดสกรูหรือเส้นตรงที่ลากจากจุดศูนย์กลางของรูยี่ดสกรูใกล้ไปจนถึงรูยี่ดสกรูไกลใน 3 มิติ คือทิศทางที่จะใช้ปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปนั่นเอง กรอบอ้างอิง $x - y - z$ ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อแนะนำแนวทางการปรับหมุนแขนรูปตัว C ของเครื่องฟลูออโรสโคปแสดงดังรูปที่ 4.10 โดยมีจุด $(0,0,0)$ อยู่ ณ จุดศูนย์กลางของแขนรูปตัว C และมีจุดหมุนที่ใช้ในการคำนวณ 2 จุดคือ จุด $(0,0,0)$ และ จุด $(0,0,\frac{f_0}{2})$ เมื่อ f_0 คือระยะโฟกัส

เนื่องจากเครื่องฟลูออโรสโคปที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการปรับหมุนเป็นองศาของแขนรูปตัว C อยู่ 2 ตำแหน่งคือหมุนรอบแกน x และแกน z แต่ไม่สามารถควบคุมองศาในการหมุนรอบแกน y รวมทั้งไม่สามารถควบคุมระยะของการเคลื่อนได้ ดังนั้นในการคำนวณเพื่อแนะนำแนวทางการปรับหมุนแขนรูปตัว C ของเครื่องฟลูออโรสโคปจะนำไปใช้ได้เฉพาะที่จุดปรับหมุน 2 จุดที่มีขั้นตอนการปรับหมุน 4.10 เท่านั้น โดยขั้นตอนในการคำนวณประกอบด้วยการคำนวณเปลี่ยนกรอบอ้างอิง การคำนวณหาระยะปรับหมุนรอบแกน x รอบแกน z รอบแกน y และการเคลื่อน ดังนี้

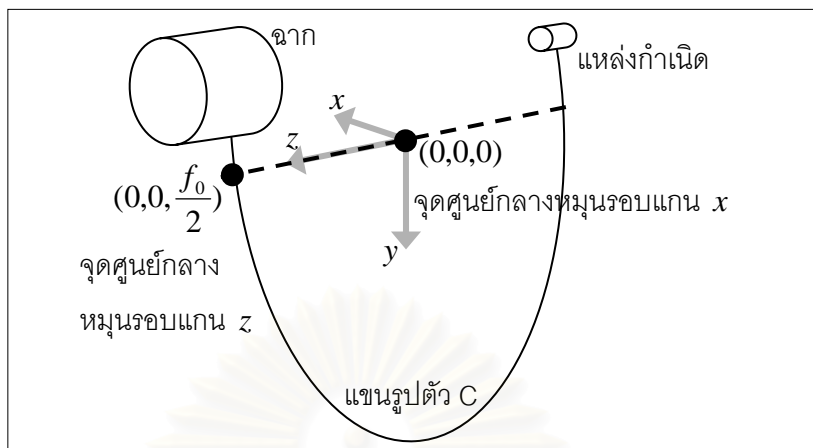
ก) การคำนวณเปลี่ยนกรอบอ้างอิง

ก่อนที่จะคำนวณหาระยะปรับหมุนนั้นจำเป็นต้องทราบระยะเป็นองศาของแขนรูปตัว C ที่ทำกับแกน z ก่อนโดยอ่านค่าจากขั้นตอนการปรับหมุนรอบแกน x เพื่อใช้คำนวณเปลี่ยนกรอบอ้างอิงจากเดิมที่มีจุดกำเนิดอยู่ที่แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และมีทิศในแกน z ซี่ไปหาฉากซึ่งใช้คำนวณในหัวข้อที่ 4.2 ไปเป็นกรอบอ้างอิงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งทิศในแกน x และ y ยังคงใช้ทิศเดิม

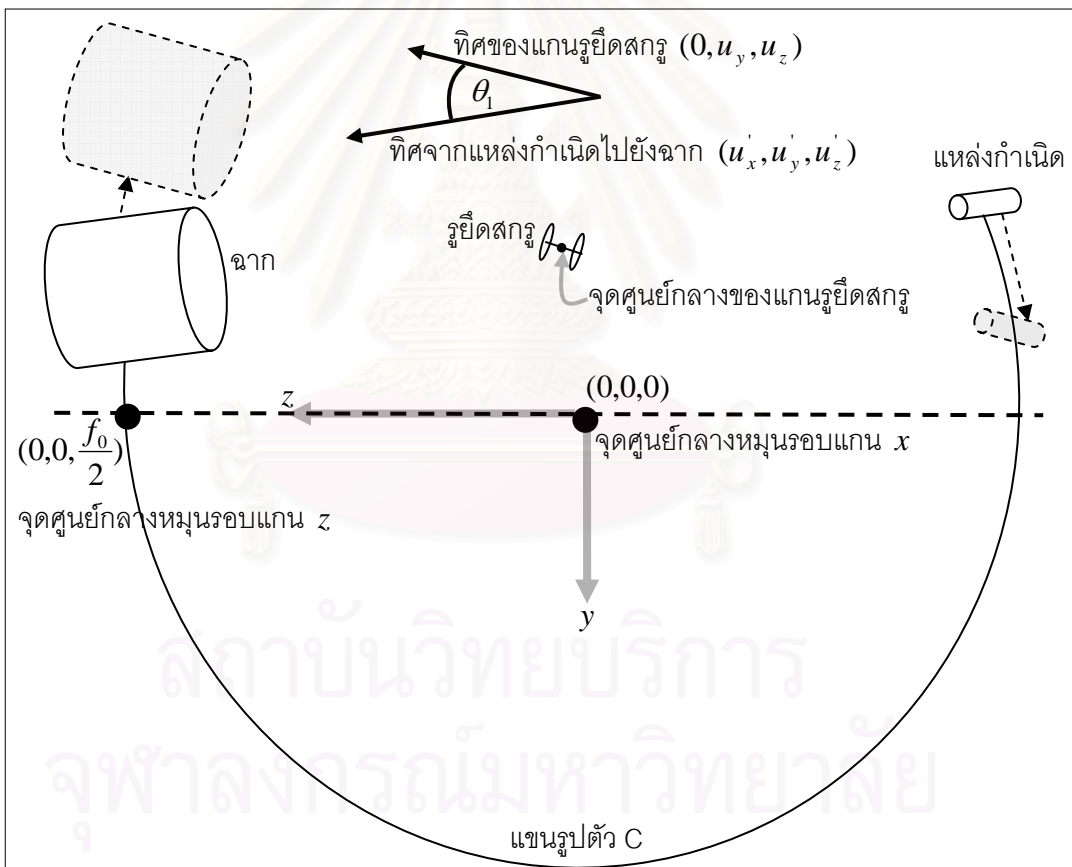
ข) การคำนวณหาระยะปรับหมุนรอบแกน x

การคำนวณหาระยะปรับหมุนรอบแกน x นั้นคือการคำนวณหามุม θ_1 ที่ทิศของแกนรูยี่ดสกรูทำกับทิศจากแหล่งกำเนิดไปยังฉากในระนาบ $y - z$ ดังรูปที่ 4.11 โดยเมื่อกำหนดให้ (u_x, u_y, u_z) คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยมีทิศจากจุดศูนย์กลางรูยี่ดสกรูใกล้ไปจุดศูนย์กลางรูยี่ดสกรูไกล และ (u'_x, u'_y, u'_z) คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของทิศจากแหล่งกำเนิดไปยังฉาก ดังนั้นมุม θ_1 สามารถคำนวณได้

$$\text{จาก } \tan^{-1}\left(\frac{u'_y}{u'_z}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{u_y}{u_z}\right)$$



รูปที่ 4.10 กรอบอ้างอิงที่ใช้คำนวณการปรับหมุนแขนรูปตัว C

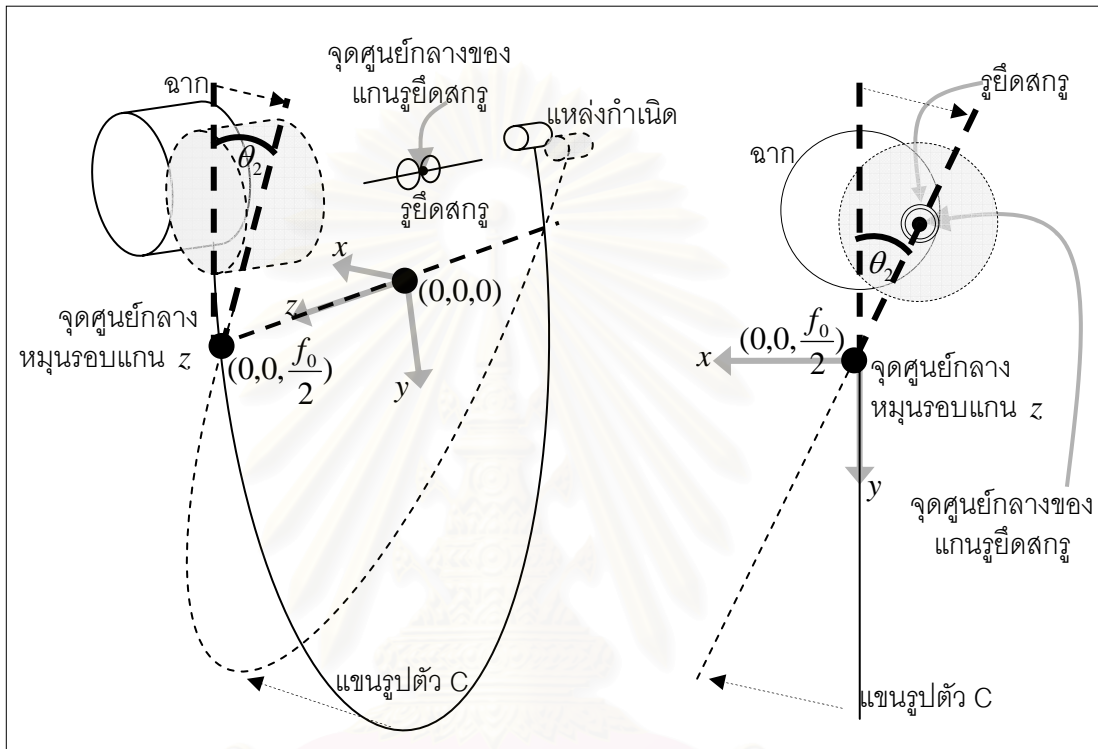


รูปที่ 4.11 การปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปรอบแกน x

ค) การคำนวณหาระยะปรับหมุนรอบแกน z

ก่อนที่จะคำนวณหาระยะปรับหมุนรอบแกน z นั้นจะคำนวณตำแหน่งของฉากเมื่อถูกปรับไปเป็นมุม θ_1 ก่อน จากนั้นจึงคำนวณหามุมที่จะใช้ปรับหมุน θ_2 ในระนาบ $x-y$ ที่มีค่า $z = \frac{f_0}{2}$ ดังรูป

ที่ 4.12 โดยจะคำนวณหามุมที่ทำกันระหว่างเวกเตอร์ที่มีทิศจากจุดศูนย์กลางหมุนรอบแกน z ไปยังจุดศูนย์กลางฉากในระนาบ $x-y$ และเวกเตอร์ที่มีทิศจากจุดศูนย์กลางหมุนรอบแกน z ไปยังจุดศูนย์กลางของแกนรูยัดสกรูในระนาบ $x-y$ โดยการปรับมุมเป็นมุม θ_2 นี้เป็นการพยายามปรับให้จุดศูนย์กลางของฉากอยู่ใกล้กับจุดศูนย์กลางของแกนรูยัดสกรูมากที่สุด



รูปที่ 4.12 การปรับมุมเครื่องฟลูออโรสโคปรอบแกน z จาก 2 มุมมอง

ง) การคำนวณหาระยะปรับหมุนรอบแกน y

การคำนวณหาระยะปรับหมุนรอบแกน y นี้เป็นการคำนวณเพื่อปรับให้ทิศของแกน z ขนานกับทิศของแกนรูยัดสกรูในระนาบ $x-z$ โดยมีจุด $(0,0,0)$ ในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 เป็นจุดศูนย์กลางการหมุน ดังนั้นในการคำนวณจึงคำนวณหามุม θ_3 ซึ่งเป็นมุมที่แกนรูยัดสกรูทำกับแกน z ในระนาบ $x-z$ โดยสามารถคำนวณได้จาก $\theta_3 = \tan^{-1}(\frac{u_x}{u_z})$

จ) การคำนวณหาระยะการเลื่อน

การคำนวณหาระยะการเลื่อนนี้คือการคำนวณระยะการเลื่อนตามแกน x และตามแกน y ในระนาบ $x-y$ โดยหลังจากคำนวณปรับตำแหน่งแกนรูปตัว C ด้วยมุม θ_2 แล้ว ระยะเลื่อนสามารถคำนวณได้จากระยะห่างตามแกน x และตามแกน y ในระนาบ $x-y$ ระหว่างจุดศูนย์กลางของฉากกับจุดศูนย์กลางของแกนรูยัดสกรู

บทที่ 5

การคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย

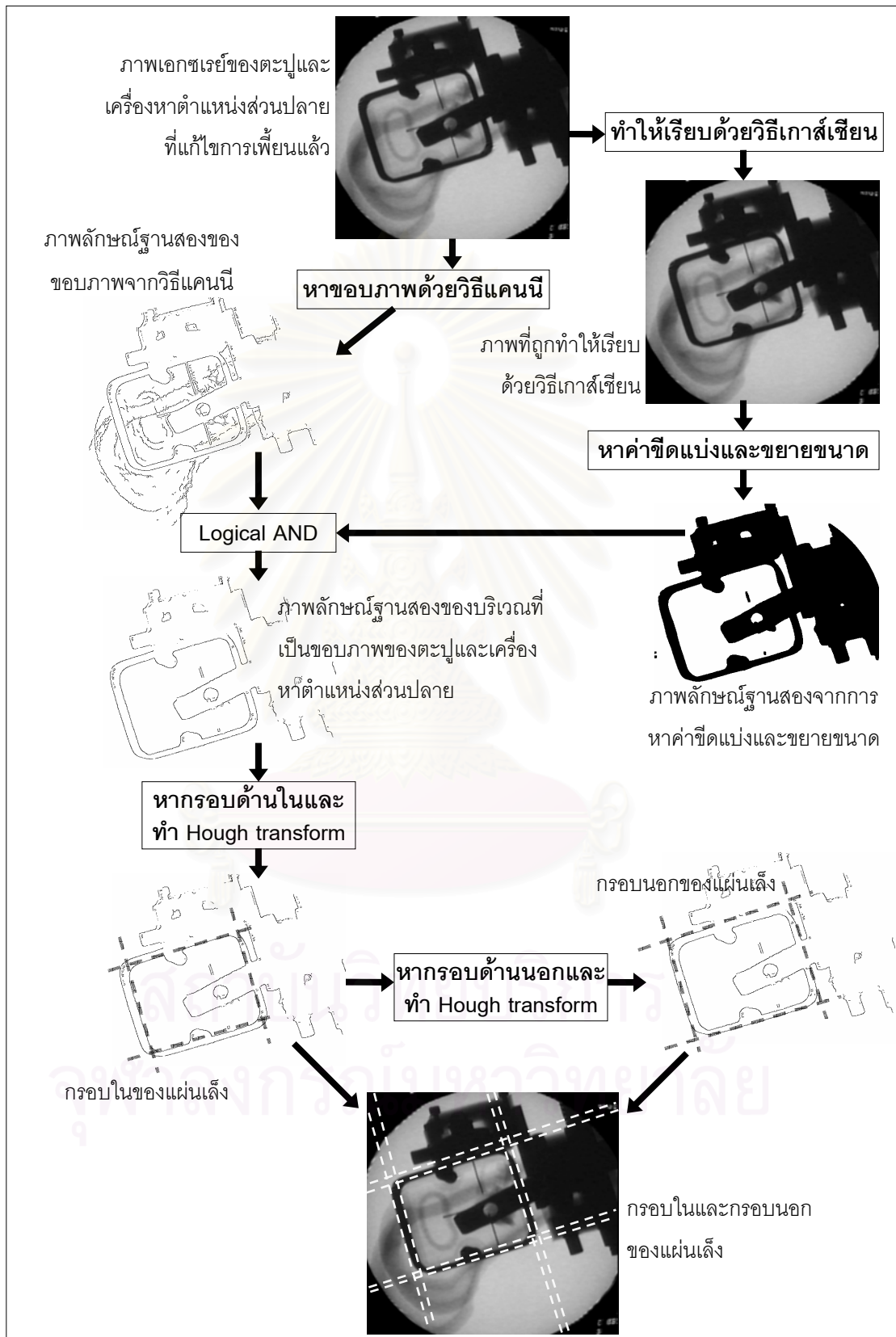
หลังจากที่เครื่องฟลูออโรสโคปถูกปรับจนมองเห็นรูยี่ดสกรูใกล้และรูไกลซ้อนทับกันเป็นวงกลมที่สมบูรณ์แล้ว แพทย์จะใช้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายเพื่อเลือกรูยี่ดสกรูนี้โดยดูจากภาพเอกซเรย์ โดยในการเลี้ยงแพทย์จะปรับหมุนจุดปรับหมุนทั้ง 4 จุดไปจนกระทั่งรูนำร่องรูปทรงกระบอกที่อยู่บนแผ่นเลี้ยงตรงกับรูยี่ดสกรูซึ่งนับว่าเป็นขั้นตอนที่ย่างยากใช้เวลาและต้องอาศัยความชำนาญของแพทย์ จึงเป็นขั้นตอนที่ทำให้แพทย์และผู้ช่วยต้องรับรังสีเอกซ์มากอีกขั้นตอนหนึ่ง การคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยแพทย์ในการปรับหมุนให้แก่แพทย์ โดยจะคำนวณหาว่าควรปรับหมุนที่แต่ละจุดปรับหมุนใดบ้าง ในทิศทางใด และปรับหมุนไปเป็นระยะเท่าใด

การคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะคำนวณจากภาพเอกซเรย์ที่มีทั้งเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายและตะปูอยู่ในภาพเดียวกันและเป็นภาพที่ผ่านกระบวนการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปดังวิธีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยที่รูยี่ดสกรูในภาพต้องซ้อนทับกันเป็นวงกลมที่สมบูรณ์แล้วและต้องสามารถมองเห็นแผ่นเลี้ยงของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายได้เต็มทั้งแผ่นและชัดเจน ขั้นตอนหลักในการคำนวณประกอบด้วย การแบ่งส่วนภาพเพื่อกำหนดบริเวณที่เป็นแผ่นเลี้ยงในภาพเอกซเรย์ การคำนวณหาตำแหน่งของแผ่นเลี้ยงใน 3 มิติ และการคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายให้ตรงกับรูยี่ดสกรู ดังนี้

5.1 การแบ่งส่วนภาพเพื่อกำหนดบริเวณแผ่นเลี้ยงในภาพเอกซเรย์

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาเส้นตรงที่เป็นตัวแทนแต่ละด้านของกรอบสี่เหลี่ยมทั้งกรอบในและกรอบนอกของแผ่นเลี้ยงในภาพเอกซเรย์ แล้วใช้จุดตัดของเส้นตรงเหล่านี้ไปคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของแผ่นเลี้ยงในหัวข้อที่ 5.2 ต่อไป

ขั้นตอนหลักในการคำนวณแสดงดังรูปที่ 5.1 ขั้นตอนแรกจะนำภาพเอกซเรย์ของตะปูและเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายที่แก้ไขการเพี้ยนแล้วมาหาขอบภาพด้วยวิธีแคนนี่ และสร้างภาพลักษณะฐานสองจากภาพที่ถูกทำให้เรียบด้วยวิธีเกาส์เขียนโดยใช้ค่าขีดแบ่งแล้วทำการขยายขนาด จากนั้นนำภาพที่ขยายขนาดแล้วไปแอนด์กับภาพลักษณะฐานสองของขอบภาพจากวิธีแคนนี่ แล้วหาบริเวณที่เป็นกรอบในของแผ่นเลี้ยงและใช้เส้นตรงที่ได้จากวิธี Hough transform เป็นตัวแทนแต่ละด้านของกรอบใน ต่อมาหาบริเวณที่เป็นกรอบนอกของแผ่นเลี้ยงและใช้เส้นตรงที่ได้จากวิธี Hough transform เป็นตัวแทนแต่ละด้านของกรอบนอก รายละเอียดการคำนวณในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้



รูปที่ 5.1 การแบ่งส่วนภาพเพื่อกำหนดบริเวณแผ่นเล็งในภาพเอกซเรย์

1) หาขอบภาพด้วยวิธี Canny

ในขั้นตอนนี้จะนำภาพเอกซเรย์ของตะปูและเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายที่แก้ไขการเพี้ยนแล้ว มาหาขอบภาพด้วยวิธีแคนนี่ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.3.5 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือภาพลักษณะฐานสองของขอบภาพที่ได้จากวิธีแคนนี่ ตัวอย่างผลลัพธ์แสดงดังภาพลักษณะฐานสองของขอบภาพจากวิธีแคนนี่ แสดงในรูปที่ 5.1

2) หาค่าขีดแบ่งและขยายขนาด

ในขั้นตอนนี้จะนำภาพที่ถูกทำให้เรียบด้วยวิธีเกาส์เซียนที่ได้จากข้อ 1 มาหาค่าขีดแบ่งเพื่อเลือกเอาเฉพาะบริเวณที่เป็นตะปูและเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายโดยใช้วิธีหาค่าขีดแบ่งดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.1 ค่าขีดแบ่งที่ได้อาจมีค่าสูงมากเกินไปทำให้ส่วนที่เป็นขอบภาพถูกตัดทิ้งออกไปด้วย แสดงว่าบริเวณภาพลักษณะฐานสองที่ได้จากการหาค่าขีดแบ่งอาจยังไม่ครอบคลุมจุดภาพที่เป็นขอบภาพทั้งหมดในขั้นตอนนี้จึงทำการขยายขนาดภาพลักษณะฐานสองเพื่อเพิ่มพื้นที่ของบริเวณที่ได้จากการหาค่าขีดแบ่งและเพิ่มความมั่นใจว่าภาพลักษณะฐานสองที่ได้นี้ครอบคลุมบริเวณที่เป็นขอบภาพอยู่ด้วย จากนั้นจึงนำมาแอนด์กับภาพลักษณะฐานสองซึ่งเป็นขอบภาพที่ได้จากวิธีแคนนี่เพื่อตัดส่วนที่เป็นขอบภาพที่ไม่อยู่ในบริเวณตะปูและเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายออกไป ตัวอย่างผลลัพธ์แสดงดังภาพลักษณะฐานสองของบริเวณที่เป็นขอบภาพของตะปูและเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายในรูปที่ 5.1

3) หากรอบด้านในของแผ่นเล็ง

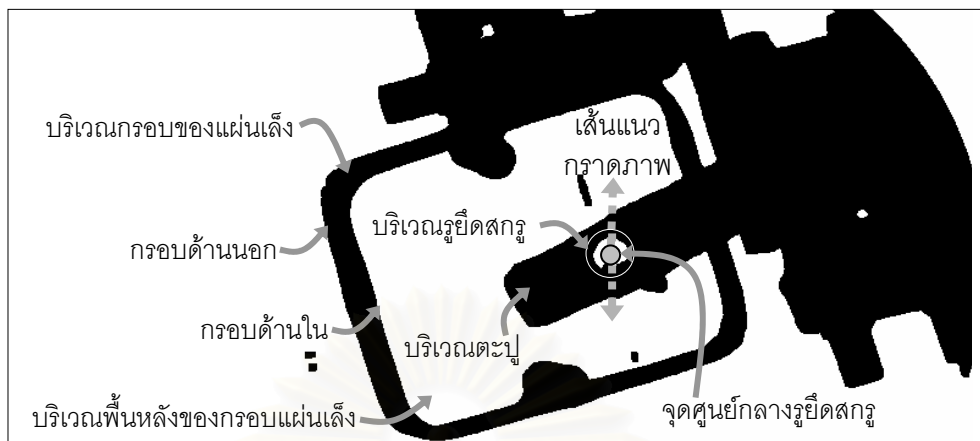
ขั้นตอนนี้จะทำการคำนวณหาเส้นตรงซึ่งเป็นตัวแทนแต่ละด้านของกรอบในของแผ่นเล็ง โดยประกอบด้วยขั้นตอนย่อยอีก 2 ขั้นตอนคือการแบ่งส่วนภาพหากรอบในของแผ่นเล็งและการคำนวณหาเส้นตรงที่แทนกรอบในของแผ่นเล็ง ดังนี้

ก) การแบ่งส่วนภาพหากรอบในของแผ่นเล็ง

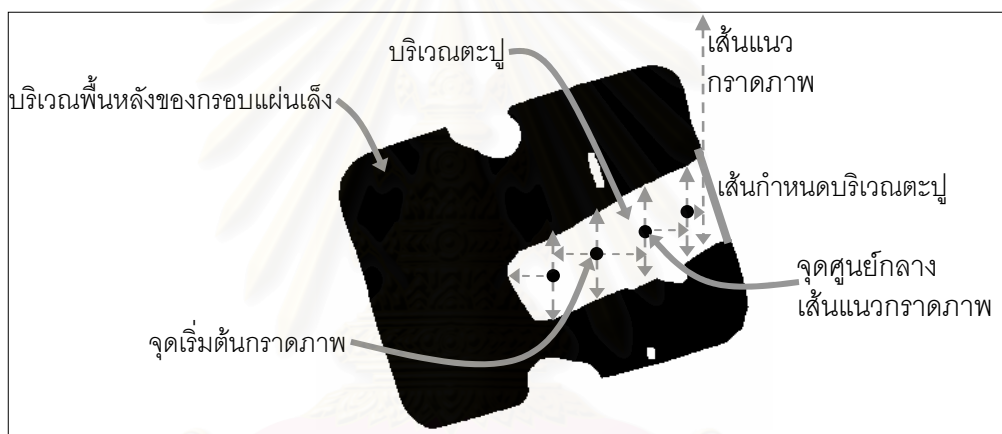
ขั้นตอนนี้จะทำการแบ่งส่วนภาพเพื่อหาจุดภาพที่เป็นขอบภาพของกรอบในของแผ่นเล็งโดยขั้นตอนในการแบ่งส่วนภาพมีดังนี้

- หาบริเวณพื้นหลังของกรอบแผ่นเล็ง (ตัวอย่างดังบริเวณสี่ขาวด้านในของแผ่นเล็งในรูปที่ 5.2) โดยการกราดภาพเป็นแนวเส้นตรงตามแนวตั้งทั้งขึ้นและลงจากจุดศูนย์กลางของบริเวณรูยึดสกรูที่หาได้จากบทที่ 4 จนพ้นจากบริเวณตะปูไปพบบริเวณสี่ขาวที่เป็นบริเวณพื้นหลังของกรอบแผ่นเล็ง

- กราดภาพเพื่อหาบริเวณที่เป็นตะปูในแผ่นเล็ง การกราดภาพจะเริ่มจากจุดศูนย์กลางของรูยึดสกรูโดยการกราดภาพเป็นแนวเส้นตรงในแนวตั้งทั้งขึ้นและลง ตัวอย่างดังรูปที่ 5.3 บริเวณตะปูมีสี่ขาวเมื่อกราดภาพจากจุดเริ่มต้นกราดภาพไปจนพบบริเวณพื้นหลังของกรอบแผ่นเล็งสีดำ แล้วจึงใช้จุดศูนย์กลางของเส้นตรงที่ใช้เริ่มต้นกราดภาพเลื่อนไปทั้งทางด้านซ้ายและขวาเพื่อเป็นจุดเริ่มต้นในการกราดภาพในแนวตั้งใหม่ ทำไปจนกระทั่งสุดบริเวณตะปูหรือเส้นแนวกราดภาพเลยไปชนกรอบบริเวณภาพเอกซเรย์ จึงสามารถกำหนดขอบเขตของบริเวณตะปูได้ ดังเส้นกำหนดบริเวณตะปูสี่เทาในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 การกราดภาพหาบริเวณพื้นหลังของกรอบแผ่นเล็ง



รูปที่ 5.3 การกราดภาพหาเส้นกำหนดบริเวณตะปู

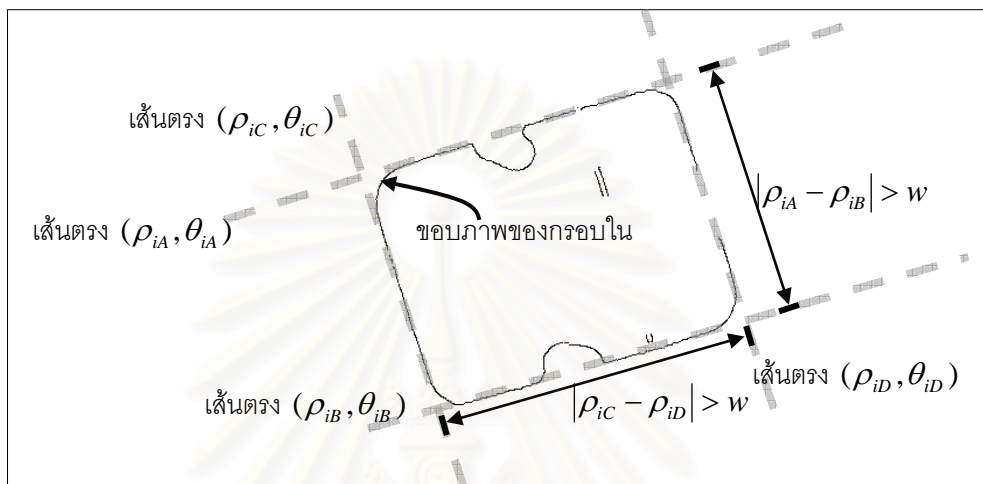
• แบ่งส่วนเอาจุดภาพที่เป็นของภาพของกรอบในของแผ่นเล็งโดยนำบริเวณพื้นหลังของกรอบแผ่นเล็งและบริเวณตะปูในรูปที่ 5.3 ไปลบออกจากภาพลักษณะฐานสองของบริเวณที่เป็นขอบภาพของตะปูและเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายรูปที่ 5.1 เพื่อจัดขอบภาพของตะปูได้เป็นภาพลักษณะฐานสองของขอบภาพที่ไม่มีตะปู จากนั้นขยายขนาดบริเวณพื้นหลังของกรอบแผ่นเล็งและนำไปแอนด์กับภาพลักษณะฐานสองของขอบภาพที่ไม่มีตะปูได้เป็นขอบภาพของกรอบในของแผ่นเล็งดังรูปที่ 5.4

ข) การคำนวณหาเส้นตรงที่แทนกรอบในของแผ่นเล็ง

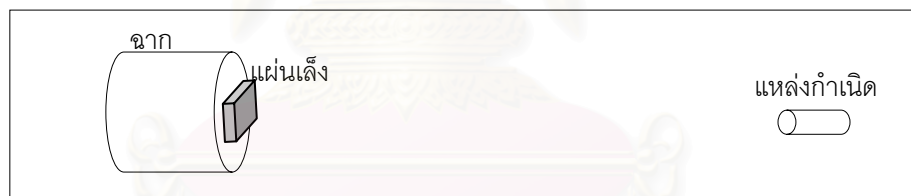
จากภาพภาพลักษณะฐานสองของบริเวณขอบภาพของกรอบในดังรูปที่ 5.4 จะเห็นว่าจุดภาพเรียงตัวกันในแนวเส้นตรง 4 เส้นที่ยาวกว่าเส้นอื่น ๆ อย่างชัดเจน ดังนั้นเมื่อใช้วิธี Hough transform จึงสามารถคำนวณหาเส้นตรงทั้ง 4 เส้นที่เป็นตัวแทนของกรอบในของแผ่นเล็งได้ ดังนี้

• กำหนดให้เส้นตรง (ρ_{iA}, θ_{iA}) ในปริภูมิของพารามิเตอร์ที่มีจำนวนสมาชิกมากที่สุดหรือเส้นตรง (ρ_{iA}, θ_{iA}) ที่มีจำนวนจุดภาพอยู่มากที่สุดเป็นเส้นกรอบด้านแรกของกรอบในแผ่นเล็ง

- หาด้านที่ 2 ของกรอบในโดยเลือกเส้นตรง (ρ_{iB}, θ_{iB}) ที่มีจำนวนสมาชิกมากที่สุด รองลงมาและจะต้องไม่มีจุดตัดกับเส้นตรง (ρ_{iA}, θ_{iA}) ของด้านแรกในภาพ โดยมีค่า $|\rho_{iA} - \rho_{iB}| > w$ เมื่อ w คือขนาดความกว้างของแผ่นเล็งจริง หรือ w คือขนาดของความกว้างของแผ่นเล็งที่เล็กที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นในภาพเอกซเรย์ได้เมื่อแผ่นเล็งอยู่ที่ตำแหน่งฉากดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.4 การหาเส้นตรงที่ใช้แทนกรอบใน



รูปที่ 5.5 แผ่นเล็งอยู่ที่ตำแหน่งฉาก

- หาด้านที่ 3 ของกรอบในโดยเลือกเส้นตรง (ρ_{iC}, θ_{iC}) ที่มีจำนวนสมาชิกมากที่สุด รองลงมาและจะต้องตัดกับเส้นตรง (ρ_{iA}, θ_{iA}) และ (ρ_{iB}, θ_{iB}) ในภาพ
- หาด้านที่ 4 ของกรอบในโดยเลือกเส้นตรง (ρ_{iD}, θ_{iD}) ที่มีจำนวนสมาชิกมากที่สุดและจะต้องไม่มีจุดตัดกับเส้นตรง (ρ_{iC}, θ_{iC}) ในภาพและมีค่า $|\rho_{iC} - \rho_{iD}| > w$
- นำเส้นตรงแต่ละเส้นไปปรับแก้เส้นตรงที่ได้จากวิธี Hough transform ให้ใกล้เคียงกับแนวกรอบในของแผ่นเล็งมากขึ้นโดยการเฉลี่ยค่า (ρ, θ) ในช่วงที่กำหนดขึ้นดังเช่นในหัวข้อที่ 4.1

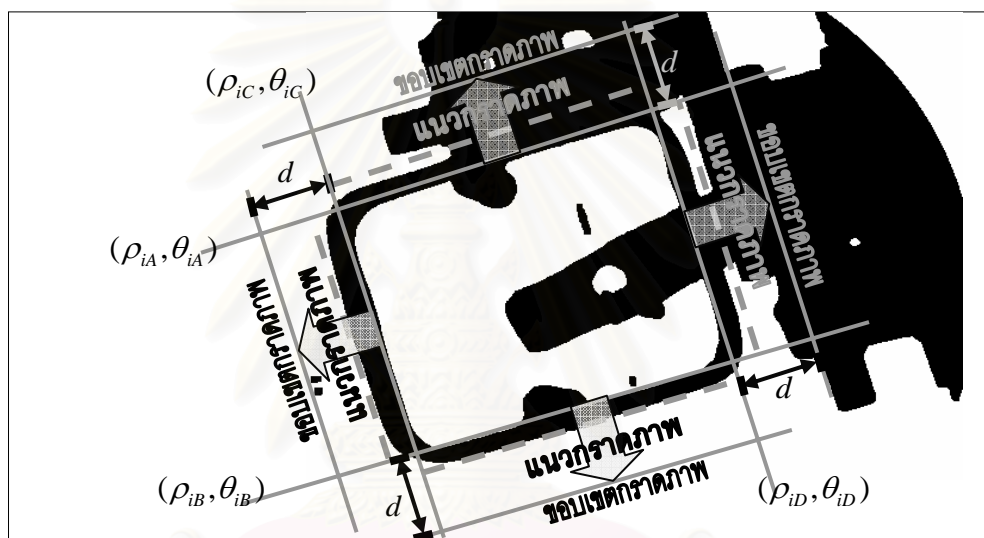
4) หากกรอบด้านนอกของแผ่นเล็ง

ขั้นตอนนี้จะทำการคำนวณหาเส้นตรงซึ่งเป็นตัวแทนแต่ละด้านของกรอบนอกของแผ่นเล็ง โดยประกอบด้วยขั้นตอนย่อยอีก 2 ขั้นตอนคือการแบ่งส่วนภาพหากกรอบนอกของแผ่นเล็งและการคำนวณหาเส้นตรงที่แทนกรอบนอกของแผ่นเล็ง ดังนี้

ก) การแบ่งส่วนภาพหากรอบนอกของแผ่นเล็ง

ขั้นตอนจะทำการแบ่งส่วนภาพเพื่อหาจุดภาพที่เป็นขอบภาพของกรอบนอกของแผ่นเล็งโดยขั้นตอนในการแบ่งส่วนภาพมีดังนี้

- ใช้เส้นตรงที่ขนานและมีความยาวเท่ากับเส้นตรงของแต่ละด้านของกรอบในที่ได้จากข้อ 3 กราดภาพในแนวเส้นตรงออกไปในทิศจากกรอบในไปกรอบนอกไปจนถึงเส้นตรงซึ่งเป็นขอบเขตกราดภาพเป็นระยะ d โดยกำหนดให้ d มีค่า $1/3$ ของความกว้างกรอบใน แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 5.6 ในแต่ละด้านนั้น เส้นตรงที่ใช้ในการกราดภาพเส้นใดลากผ่านจุดสีขาวมากที่สุด กำหนดให้เส้นตรงเส้นนั้นเป็นขอบเขตของกรอบนอก ดังเส้นประสีเทาในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 การหาขอบเขตของกรอบนอก

- จากรูปที่ 5.6 กรอบในที่ได้และเส้นตรงประสีเทาที่เป็นขอบเขตของกรอบนอกนั้น เมื่อนำมารวมกันจะได้กรอบสี่เหลี่ยมซ้อนกัน 2 รูป ขอบภาพที่อยู่ในขอบเขตกรอบนอกและอยู่นอกกรอบในจะเป็นจุดภาพที่นำไปใช้คำนวณหากรอบนอกต่อไป

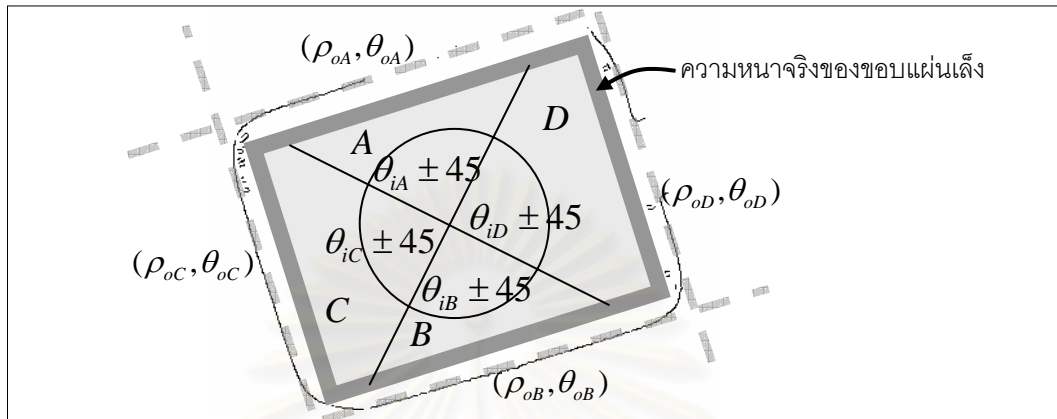
ข) การคำนวณหาเส้นตรงที่แทนกรอบนอกของแผ่นเล็ง

ขั้นตอนในการคำนวณหาเส้นตรงที่แทนกรอบนอกของแผ่นเล็งมีดังนี้

- กำหนดช่วงของมุมจากกรอบในที่ได้ โดยจากรูปที่ 5.6 แบ่งช่วงของมุมตามกรอบในออกเป็น 4 ช่วงคือ A B C และ D โดยแต่ละช่วงมีค่าเท่ากับมุมของแต่ละด้านของกรอบในบวกและลบ 45 องศา

- เลือกเอาเส้นตรงจากวิธี Hough transform ที่มีจำนวนสมาชิกมากที่สุดที่มีมุมอยู่ในช่วงแต่ละด้านของกรอบในนั้น ๆ เป็นแต่ละด้านของกรอบนอก โดยต้องมีระยะห่างจากด้านของกรอบในมากกว่าความหนาจริงของขอบแผ่นเล็ง รูปที่ 5.7 แสดงตัวอย่างเส้นตรง (ρ_{oA}, θ_{oA}) (ρ_{oB}, θ_{oB}) (ρ_{oC}, θ_{oC}) และ (ρ_{oD}, θ_{oD}) ซึ่งเป็นเส้นตรงของด้านของกรอบนอกทั้ง 4 ด้าน

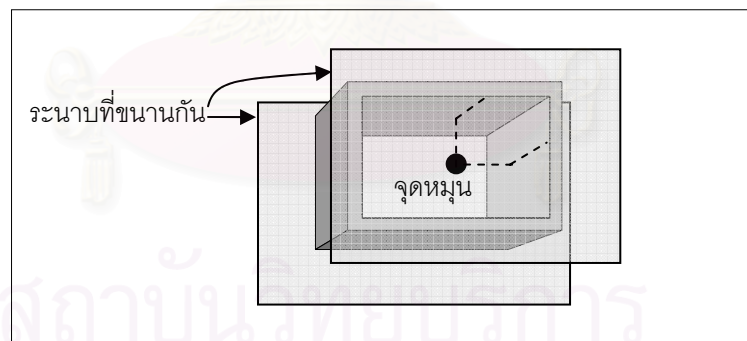
- นำเส้นตรงแต่ละเส้นไปปรับแก้เส้นตรงที่ได้จากวิธี Hough transform ให้ใกล้เคียงกับแนวกรอบนอกของแผ่นเล็งมากขึ้นโดยการเฉลี่ยค่า (ρ, θ) ในช่วงที่กำหนดขึ้นดังเช่นในหัวข้อที่ 4.1



รูปที่ 5.7 การหากรอบนอก

5.2 การคำนวณหาตำแหน่งของแผ่นเล็งใน 3 มิติ

ในงานวิจัยนี้จะแทนโครงของแผ่นเล็งเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งถูกตัดด้วยระนาบที่ขนานกัน 2 ระนาบและระนาบนี้ตั้งฉากกับด้านข้างของแท่งสี่เหลี่ยม โดยมีจุดหมุน (จุดศูนย์กลางของรูนำร่องรูปทรงกระบอกบนแผ่นเล็ง) อยู่ภายในแท่งสี่เหลี่ยม แสดงดังรูปที่ 5.8

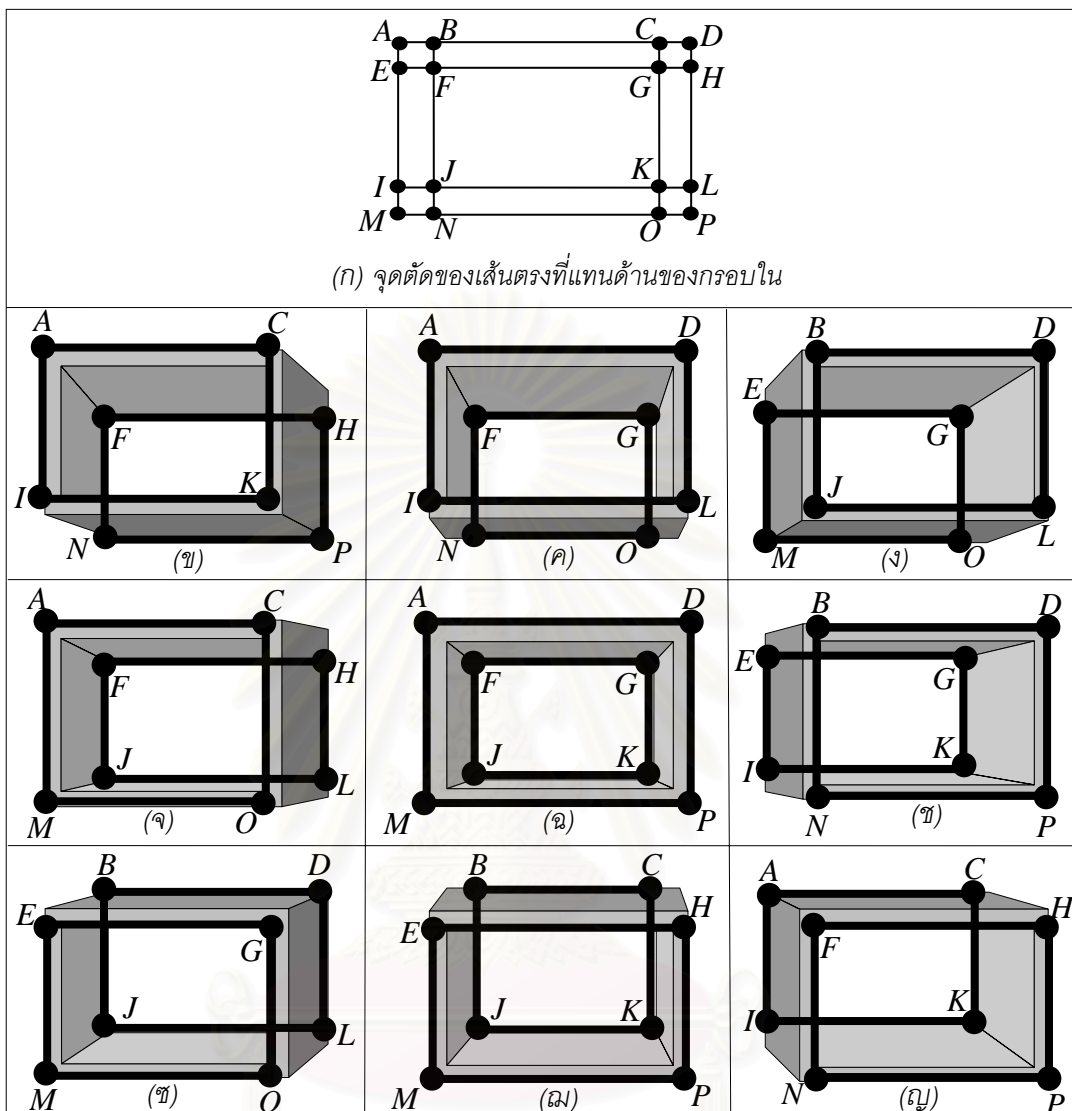


รูปที่ 5.8 โครงสร้างของแผ่นเล็ง

ขั้นตอนในการคำนวณหาตำแหน่งของแผ่นเล็งใน 3 มิติประกอบด้วย การคำนวณหาตำแหน่งที่เป็นไปได้ใน 3 มิติ และการคำนวณหาค่าตอบ ดังนี้

ก) การคำนวณหาตำแหน่งที่เป็นไปได้ใน 3 มิติ

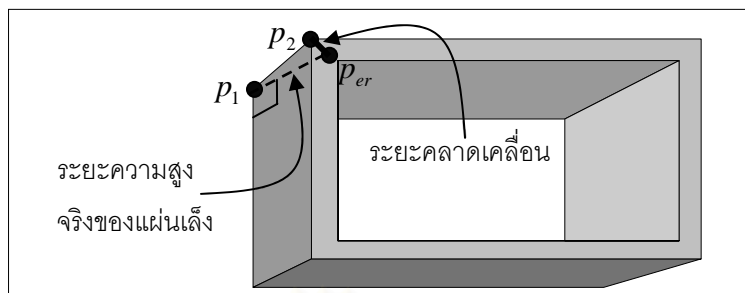
จากจุดตัดในรูปที่ 5.9 ก นั้น จะแทนจุดตัดลงในแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.9 ข ถึง ฉ ในแต่ละแบบจะได้สี่เหลี่ยม 2 รูป ซึ่งสี่เหลี่ยมทั้ง 2 รูปนี้จะตรงกับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าใน 3 มิติ ดังนั้นเมื่อใช้เทคนิคในหัวข้อที่ 2.4.4 จึงสามารถคำนวณหาตำแหน่งของสี่เหลี่ยมใน 3 มิติของภาพฉายทั้ง 9 แบบได้



รูปที่ 5.9 จุดตัดของเส้นตรงที่แทนด้านของกรอบในและกรอบนอกและภาพฉายแบบต่าง ๆ ของแผ่นเล็ง

ข) การคำนวณหาคำตอบ

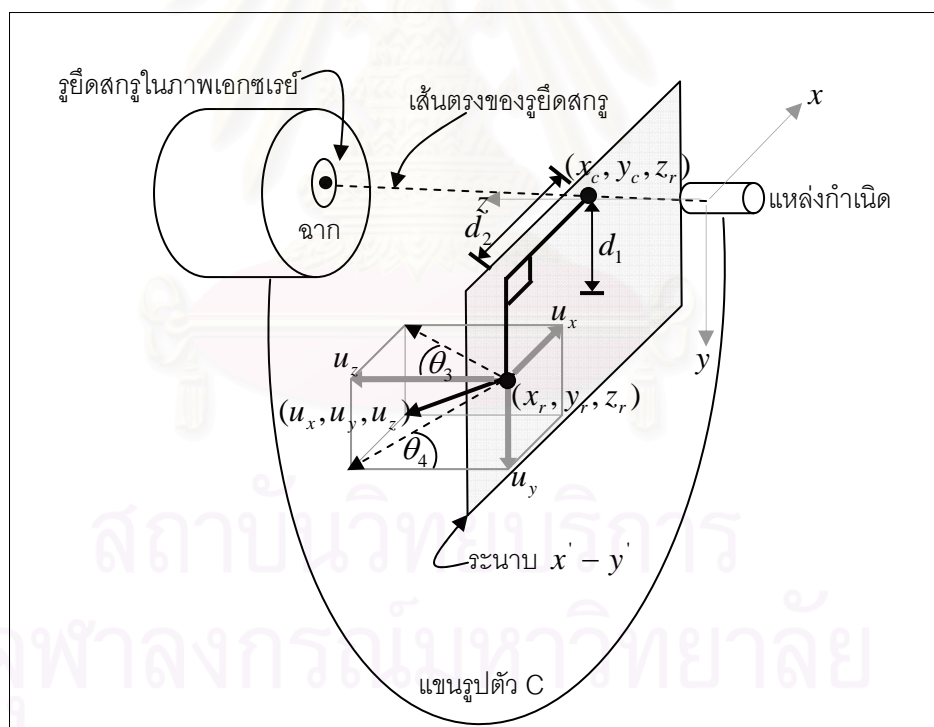
การคำนวณหาคำตอบว่าแผ่นเล็งเอียงอยู่ในลักษณะใดใน 9 แบบนี้ ทำโดยคำนวณหาว่าระนาบของภาพฉายในแบบใดขนานกันมากที่สุด โดยคำนวณหาระยะคลาดเคลื่อนรวมจากการฉายกลับของมุมสี่เหลี่ยมในระนาบหนึ่งกลับไปหามุมที่ตรงกันในอีกระนาบหนึ่ง รูปที่ 5.10 แสดงตัวอย่างการคำนวณหาระยะคลาดเคลื่อนที่จุด p_1 โดยคำนวณหาจุด p_{er} ที่ห่างจากจุด p_1 โดยมีระยะตั้งฉากกับระนาบของจุด p_1 เท่ากับความสูงจริงของแผ่นเล็ง ซึ่งถ้าหากการฉายในแบบใดให้โครงสร้างของแผ่นเล็งใน 3 มิติใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดจุด p_2 และ p_{er} ควรจะอยู่ใกล้กันมากที่สุดหรือเป็นจุดเดียวกันโดยมีระยะคลาดเคลื่อนคือระยะ $p_2 p_{er}$ น้อยที่สุดด้วย ทำเช่นนี้ทั้ง 4 มุมของสี่เหลี่ยมในระนาบและทำทั้ง 2 ระนาบ จากนั้นหาผลรวมของระยะคลาดเคลื่อนทั้งหมด ภาพฉายของแผ่นเล็งแบบใดใน 9 แบบที่มีค่าระยะคลาดเคลื่อนรวมน้อยที่สุดให้ถือว่าเป็นคำตอบของแผ่นเล็งใน 3 มิติที่คำนวณได้



รูปที่ 5.10 การคำนวณหาระยะคลาดเคลื่อน

5.3 การคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายให้ตรงกับรูยึดสกรู

จากสี่เหลี่ยมในระนาบทั้ง 2 ใน 3 มิติที่คำนวณได้จากข้อที่ 5.2 จะนำมาคำนวณหาตำแหน่งของจุดหมุนในแผ่นเล็ง โดยคำนวณจากสี่เหลี่ยมแต่ละรูปและนำจุดหมุนที่ได้จากสี่เหลี่ยมทั้งสองมาเฉลี่ยกัน ส่วนระนาบของแผ่นเล็งนั้นคำนวณได้จากการเฉลี่ยกันของระนาบของสี่เหลี่ยมทั้ง 2 รูป การคำนวณหาระยะปรับหมุนของจุดปรับหมุนทั้ง 4 จุดมีดังนี้



รูปที่ 5.11 การคำนวณหาระยะการปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย

ก) จุดปรับหมุนที่ 1 และ 2

การคำนวณหาระยะปรับหมุนเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายในจุดปรับหมุนที่ 1 และจุดปรับหมุนที่ 2 ทำโดยคำนวณหาระยะปรับหมุนในระนาบ $x' - y'$ ของจุดหมุนที่ขนานกับระนาบ $x - y$ โดยระนาบ $x' - y'$ นี้มีจุดหมุนของแผ่นเล็งอยู่บนระนาบและตัดกับเส้นตรงของรูยึดสกรูซึ่งเป็นเส้นตรงที่ลากจาก

จุดกำเนิดไปยังจุดศูนย์กลางรูยี่ดสกรูในภาพเอกซเรย์ดั่งเส้นประสีดำในรูปที่ 5.11 กำหนดให้จุดหมุนของแผ่นลิ้งใน 3 มิติอยู่ที่พิกัด (x_r, y_r, z_r) และจุดตัดของเส้นตรงของรูยี่ดสกรูอยู่ที่ (x_c, y_c, z_r) ระยะ d_1 คือระยะในการปรับหมุนจุดหมุนที่ 1 ที่ขนานกับแกน y และตั้งฉากกับเส้นตรงที่ลากจากจุด (x_c, y_c, z_r) โดยลากขนานกับแกน x คำนวณได้จาก $d_1 = y_c - y_r$ ส่วนระยะ d_2 คือระยะขนานกับแกน x ในการปรับหมุนจุดหมุนที่ 2 คำนวณได้จาก $d_1 = x_c - x_r$

ข) จุดปรับหมุนที่ 3 และ 4

จากรูปที่ 5.11 กำหนดให้ (u_x, u_y, u_z) คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่เป็นทิศของระนาบแผ่นลิ้ง เมื่อ u_z คือทิศของเส้นตรงรูยี่ดสกรู มุม θ_3 คือระยะในการปรับหมุนจุดปรับหมุนที่ 3 คำนวณได้จาก $\tan^{-1}\left(\frac{u_x}{u_z}\right)$ และ มุม θ_4 คือระยะในการปรับหมุนจุดปรับหมุนที่ 4 คำนวณได้จาก $\tan^{-1}\left(\frac{u_y}{u_z}\right)$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

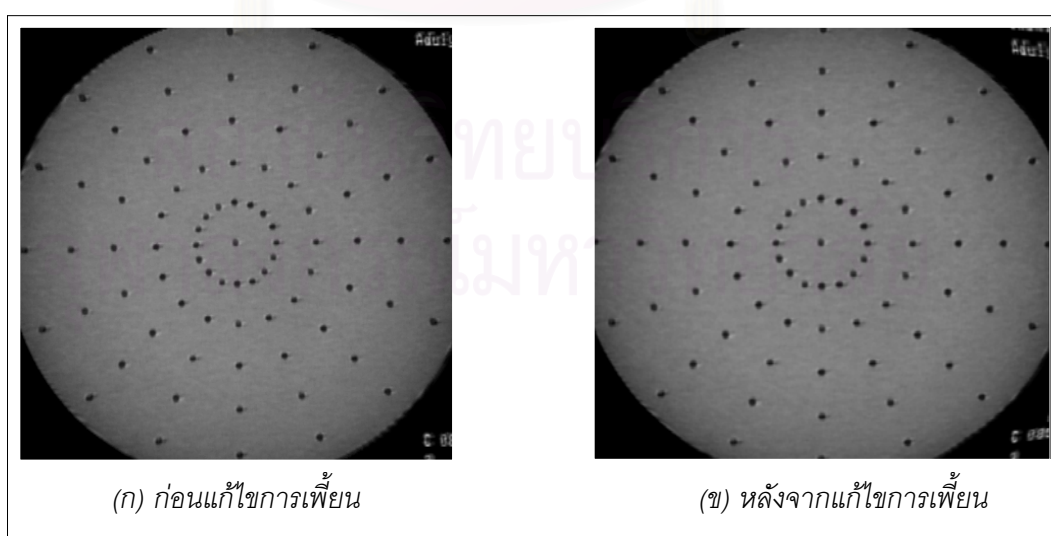
เนื่องจากงานวิจัยนี้แบ่งงานออกได้เป็น 3 ส่วนคือ การแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป การคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป และการคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย จึงได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

6.1 การแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป

ในหัวข้อนี้แบ่งการทดลองการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปออกเป็น 3 ส่วนคือวิธีการทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์และสรุปผลดังนี้

6.1.1 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ประดิษฐ์ “อุปกรณ์ที่ใช้อ้างอิงตำแหน่ง” และ “อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความถูกต้อง” ขึ้น ในการทดสอบทำโดยแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความถูกต้อง โดยรูปที่ 6.1 แสดงภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์ทดสอบความถูกต้องก่อนแก้ไขการเพี้ยนและหลังจากแก้ไขการเพี้ยนแล้ว จากนั้นวัดระยะของลูกเหล็กแต่ละลูกในภาพเอกซเรย์ที่แก้ไขการเพี้ยนแล้วเทียบกับลูกที่อยู่ ณ จุดศูนย์กลางภาพ



รูปที่ 6.1 ภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์ทดสอบความถูกต้องก่อนแก้ไขการเพี้ยนและหลังจากแก้ไขการเพี้ยน

6.1.2 ผลการทดลอง

วิธีการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนในงานวิจัยนี้มี 2 วิธีคือ วิธีแรกคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนตามแนวเส้นรัศมี 16 เส้น โดยเส้นที่ 1 อยู่ที่ 0 องศา เส้นที่ 2 อยู่ที่ 22.5 องศาเรื่อยไปจนครบ 360 องศา ในแต่ละเส้นจะคำนวณค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของแต่ละลูกคลาดเคลื่อนไป โดยคิดหน่วยเป็นมิลลิเมตร แสดงดังตารางที่ 6.1 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของทั้ง 16 เส้นเป็น 0.30 มิลลิเมตรและมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.12 มิลลิเมตร

ตารางที่ 6.1 ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวเส้นรัศมี 16 เส้น 360 องศา (เส้นที่ 1 อยู่ที่องศาที่ 0)

| เส้นองศาที่ | ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (มม.) |
|--|-----------------------------|
| 1 | 0.40 |
| 2 | 0.27 |
| 3 | 0.47 |
| 4 | 0.47 |
| 5 | 0.47 |
| 6 | 0.27 |
| 7 | 0.20 |
| 8 | 0.13 |
| 9 | 0.13 |
| 10 | 0.33 |
| 11 | 0.40 |
| 12 | 0.27 |
| 13 | 0.13 |
| 14 | 0.33 |
| 15 | 0.27 |
| 16 | 0.30 |
| คลาดเคลื่อนเฉลี่ยรวม ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มม.) | 0.30 ± 0.12 |

วิธีที่ 2 คำนวณตามแนวของเส้นรอบวงของวงกลมเทียบจากจุดศูนย์กลางทั้ง 5 วง ในแต่ละวงจะคำนวณค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ที่ถูกเหล็กแต่ละลูกคลาดเคลื่อนไป โดยคิดหน่วยเป็นมิลลิเมตร แสดงดังตารางที่ 6.2 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของทั้ง 5 วงเป็น 0.30 มิลลิเมตรและมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.07 มิลลิเมตร

ตารางที่ 6.2 ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวเส้นรอบวงวัดจากจุดศูนย์กลาง 5 วง (แต่ละวงมีลูกเหล็ก 16 ลูก)

| วงกลมที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | คลาดเคลื่อนเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (มม.) |
|-------------------|------|------|------|------|------|---|
| รัศมี (มม.) | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | |
| คลาดเคลื่อน (มม.) | 0.33 | 0.23 | 0.40 | 0.27 | 0.27 | 0.30 ± 0.07 |

6.1.3 การวิเคราะห์และสรุปผล

จากผลการทดลองดังตารางที่ 6.2 และตารางที่ 6.1 พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นและวิธีการปรับแก้การเพี้ยนที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือ ทุกจุดภาพในภาพเอกซเรย์ที่ปรับแก้การเพี้ยนแล้วในระยะ 100 มิลลิเมตรจากจุดศูนย์กลางมีตำแหน่งคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 0.30 ± 0.12 มิลลิเมตรในแนวรัศมี และคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 0.30 ± 0.07 มิลลิเมตรในแนวเส้นรอบวงของวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางเดียวกันแต่มีรัศมีต่าง ๆ กัน นับว่ามีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย วิธีที่นำเสนอจึงมีความถูกต้องเพียงพอ สามารถนำไปใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพก่อนที่จะคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปและคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายในขั้นตอนต่อไปได้ ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเนื่องจากตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีความคลาดเคลื่อนได้บ้างหรืออาจเป็นเพราะภาพเอกซเรย์มีสัญญาณรบกวนมากและมีความเบี่ยงเบนต่างต่ำ ทำให้ผลจากการวิเคราะห์ภาพมีโอกาสคลาดเคลื่อนได้เช่นกัน

6.2 การคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป

ในหัวข้อนี้แบ่งการทดลองการคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปออกเป็น 3 ส่วนคือ วิธีการทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์และสรุปผลดังนี้

6.2.1 วิธีการทดลอง

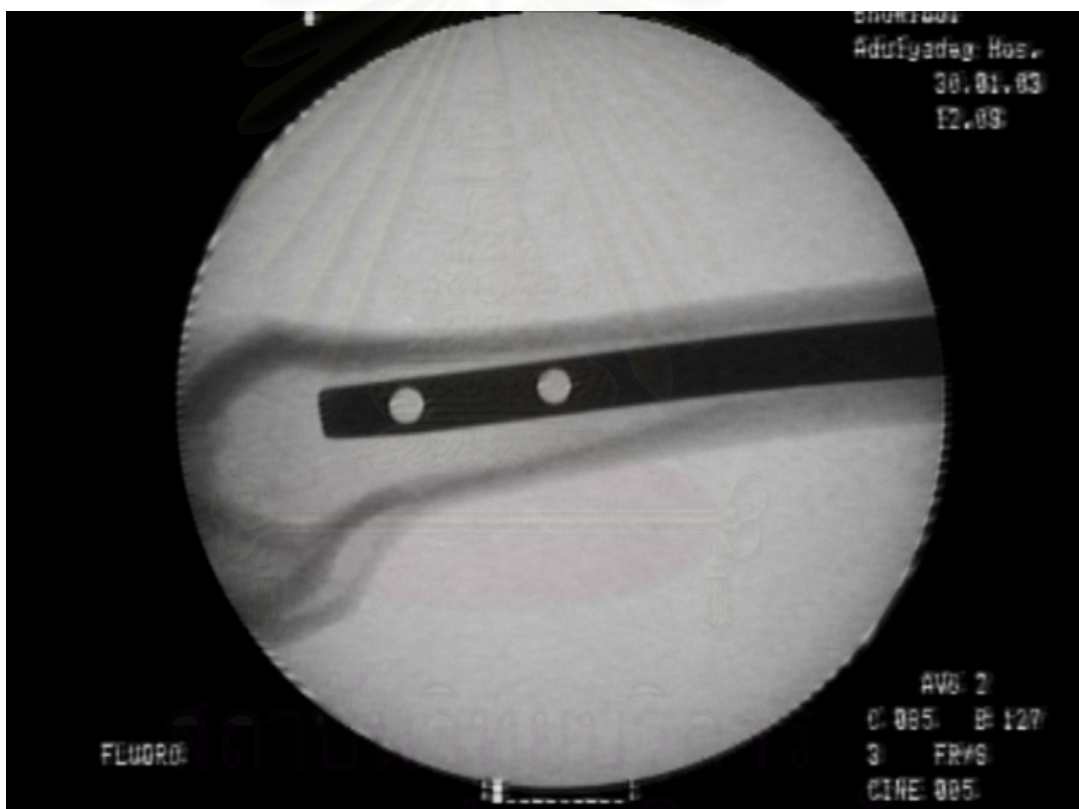
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

- ใช้ตะปูยึดกระดูกภายในต้นขา (Femoral intramedullary nail) ของบริษัท Russell-Taylor ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตรและรูยึดสกรูมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร
- ใช้กระดูกเทียมในการทดลอง
- ใช้เครื่องฟลูออโรสโคปของบริษัท Philips รุ่น BV29 ซึ่งมีระยะโฟกัส 1 เมตรและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฉากขนาด 9 นิ้ว
- ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์รุ่น Pentium III 700 MHz มีหน่วยความจำ (RAM) 300 เมกะไบต์

เนื่องจากเครื่องฟลูออโรสโคปที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีซีตบอกระยะเป็นองศาในการปรับหมุนแนวรูปตัว C เพียง 2 ตำแหน่งเท่านั้นคือที่จุดหมุนรอบแกน x และที่จุดหมุนรอบแกน z ส่วนในการหมุนรอบ

แกน y และการเลื่อนตำแหน่งไม่มีขีดบอกระยะ ดังนั้นในการทดลองในงานวิจัยนี้จึงทดลองกับภาพเอกซเรย์ของตะปูจากการเพี้ยนใน 2 ระนาบซึ่งรูยี่ดสกรูเอียงไปโดยเป็นผลจากการปรับแขนรูปตัว C ของเครื่องฟลูออโรสโคปให้หมุนไปรอบแกน x และแกน z เท่านั้น

การทดลองทำโดยนำตะปูใส่เข้ากับกระดูกเทียมแล้วปรับเครื่องฟลูออโรสโคปจนเห็นรูยี่ดสกรูในภาพเอกซเรย์เป็นวงกลมที่สมบูรณ์ก่อน (ตัวอย่างภาพเอกซเรย์ของตะปูที่เห็นรูยี่ดสกรูเป็นวงกลมที่สมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 6.2) จากนั้นจึงปรับเครื่องฟลูออโรสโคปให้หมุนตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกาการรอบแกน x และรอบแกน z ไปที่มุมต่าง ๆ กันเพื่อให้ตำแหน่งของรูยี่ดสกรูเกิดการเพี้ยนใน 2 ระนาบ แล้วจึงนำภาพเอกซเรย์ที่เพี้ยนจากการหมุนนี้ไปคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปด้วยที่นำเสนอในงานวิจัยนี้



รูปที่ 6.2 ภาพเอกซเรย์ของตะปูที่เห็นรูยี่ดสกรูเป็นวงกลมที่สมบูรณ์

6.2.2 ผลการทดลอง

การวัดความคลาดเคลื่อนในการทดลองมี 3 แบบคือ วัดความคลาดเคลื่อนเป็นองศารอบแกน x รอบแกน y และจำนวนครั้งที่ต้องคำนวณและปรับหมุนจนสามารถมองเห็นรูยี่ดสกรูเป็นวงกลมที่สมบูรณ์เหมือนเดิม โดยในตารางที่ 6.3 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการหมุนรอบแกน x 3.00 องศา ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการหมุนรอบแกน y 1.77 องศา และจำนวนครั้งที่ต้องหมุนจนตรงเห็นรูยี่ดสกรูเป็นวงกลมที่สมบูรณ์เหมือนเดิมเฉลี่ย 1.62 ครั้งหรือมากที่สุด 2 ครั้ง

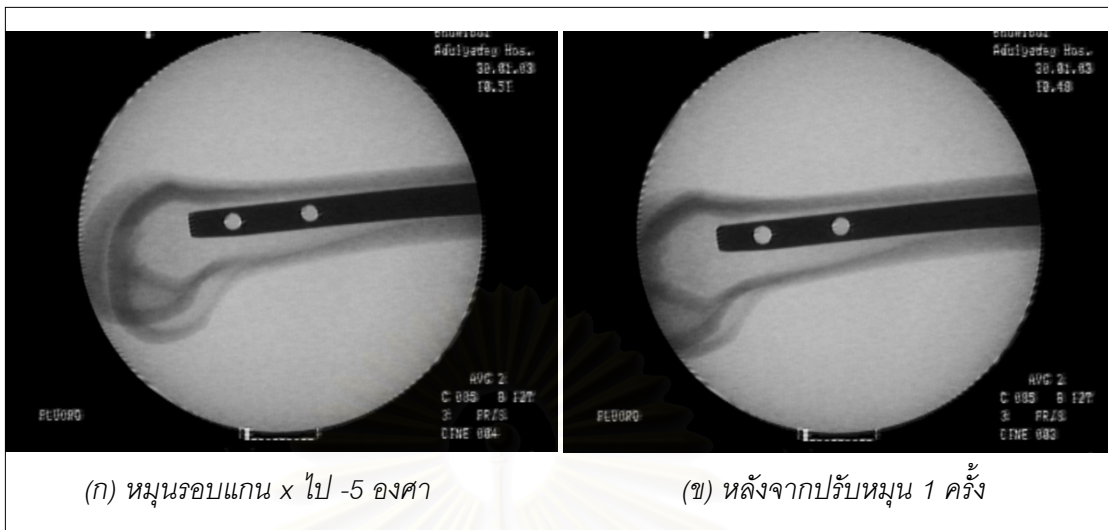
ในการประมวลผลเพื่อหาคำตอบในแต่ละครั้งนั้นใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมากคือประมาณ 30 วินาทีต่อครั้ง ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณแต่ละครั้งจนสามารถปรับเครื่องฟลูออโรสโคปให้ตรงกับรูยี่ดสกรูใช้เวลาโดยเฉลี่ยประมาณ 48.60 วินาทีหรือมากที่สุด 60 วินาที

ตารางที่ 6.3 ความคลาดเคลื่อนเป็นองศาและจำนวนครั้งที่ต้องปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปจนสามารถมองเห็นรูยี่ดสกรูเป็นวงกลมที่สมบูรณ์เหมือนเดิม

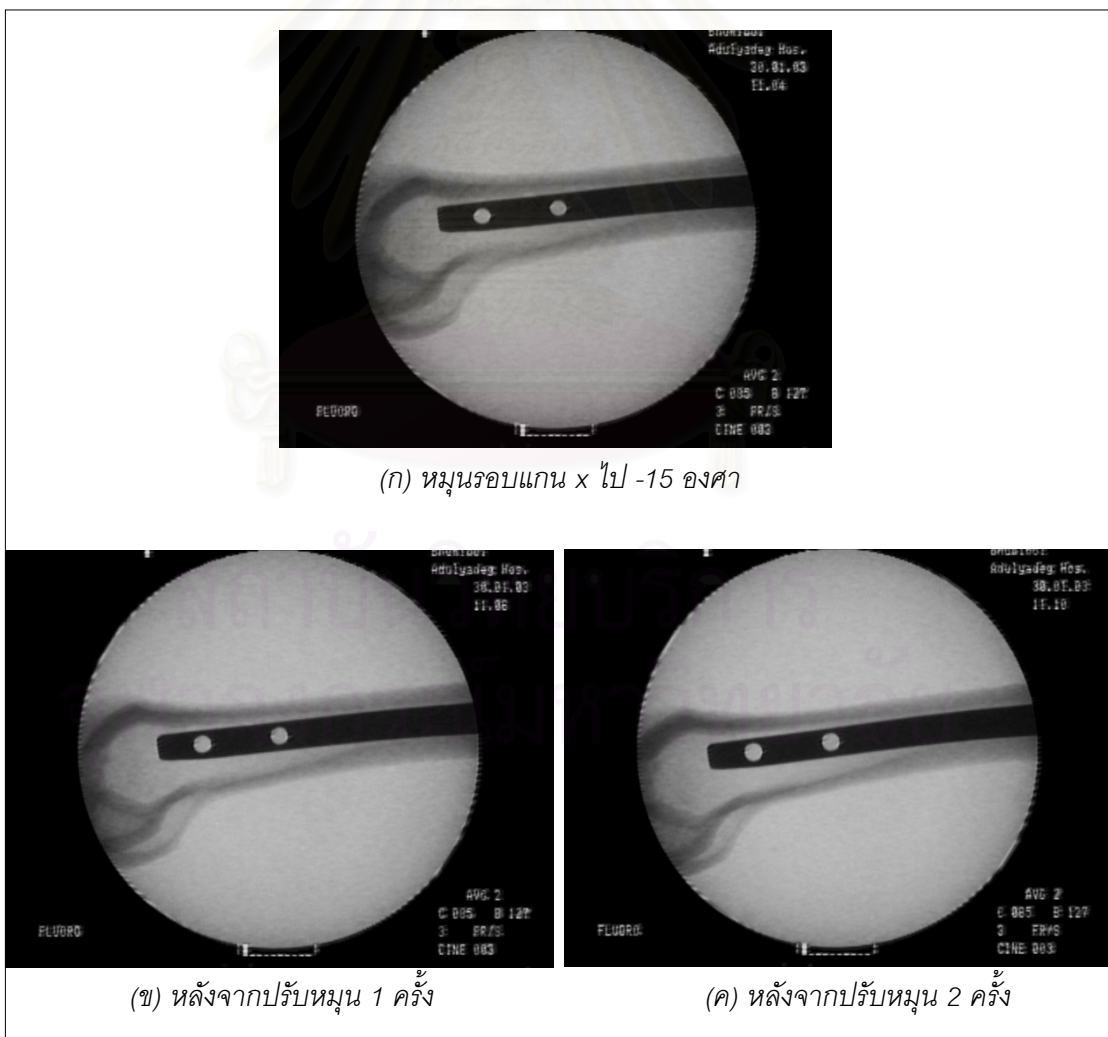
| มุมที่เอียงไปจริง (องศา) | | มุมที่คำนวณได้ (องศา) | | มุมคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (องศา) | | จำนวนครั้งที่ต้อง หมุนจนตรง |
|-----------------------------|-----|--------------------------|-----|---------------------------------|------------|--------------------------------|
| x | z | x | z | x | z | |
| -5 | 0 | -4 | +2 | 1 | 2 | 1 |
| -10 | 0 | -7 | +2 | 3 | 2 | 2 |
| -15 | 0 | -12 | +1 | 3 | 1 | 2 |
| 0 | +7 | -1 | +7 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | +15 | +12 | +15 | 2 | 0 | 1 |
| 0 | -7 | +2 | -8 | 2 | 1 | 1 |
| 0 | -15 | +1 | -14 | 1 | 1 | 1 |
| -5 | +15 | -1 | +14 | 4 | 1 | 2 |
| -5 | -15 | -3 | -12 | 2 | 3 | 2 |
| -10 | +15 | -5 | +13 | 5 | 2 | 2 |
| -10 | -15 | -8 | -13 | 2 | 2 | 2 |
| -15 | +15 | -9 | +12 | 6 | 3 | 2 |
| -15 | -15 | -8 | -10 | 7 | 5 | 2 |
| คลาดเคลื่อนเฉลี่ย | | | | 3 | 1.8 | 1.62 |

หมายเหตุ 1. เครื่องหมาย + หมายถึงหมุนตามเข็มนาฬิกา เครื่องหมาย - หมายถึงหมุนทวนเข็มนาฬิกา
2. มุมที่คำนวณได้คือมุมที่คำนวณได้ในการปรับหมุนครั้งแรก

ตัวอย่างภาพเอกซเรย์จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 โดยรูปที่ 6.3 เป็นตัวอย่างการทดลองที่ปรับหมุนให้เครื่องฟลูออโรสโคปหมุนรอบแกน x ไป -5 องศาแล้วสามารถคำนวณและปรับหมุน 1 ครั้งก็สามารถเห็นวงกลมที่สมบูรณ์เหมือนเดิม ส่วนรูปที่ 6.4 เป็นตัวอย่างการทดลองที่ปรับหมุนให้เครื่องฟลูออโรสโคปหมุนรอบแกน x ไป -15 องศาแล้วต้องคำนวณและปรับหมุน 2 ครั้งจึงจะสามารถเห็นวงกลมที่สมบูรณ์เหมือนเดิมได้



รูปที่ 6.3 ตัวอย่างภาพเอกซเรย์จากการปรับหมุน 1 ครั้งแล้วสามารถเห็นรูยึคสกรูเป็นวงกลมที่สมบูรณ์



รูปที่ 6.4 ตัวอย่างภาพเอกซเรย์จากการปรับหมุน 1 ครั้งแล้วสามารถเห็นรูยึคสกรูเป็นวงกลมที่สมบูรณ์

6.2.3 การวิเคราะห์และสรุปผล

จากผลการทดลองดังตารางที่ 6.3 จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเครื่องฟลูออโรสโคปนั้นถูกปรับหมุนในการทดลองให้มีมุมเอียงมากขึ้น ส่งผลให้จำนวนครั้งและเวลาที่ต้องใช้คำนวณและปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปจนตรงกลับมามองเห็นรูยึดสกรูเป็นวงกลมที่สมบูรณ์ดังเดิมเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยจำนวนครั้งที่มากที่สุดคือ 2 ครั้งและใช้เวลายาวนานที่สุดในการคำนวณประมาณ 60 วินาที ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นสาเหตุมาจากภาพเอกซเรย์ของรูยึดสกรูที่เครื่องฟลูออโรสโคปเอียงมากขึ้นจะมีอัตราจำนวนจุดภาพที่เป็นรูยึดสกรูน้อยลง หรือกล่าวอีกอย่างได้ว่ารูยึดสกรูนั้นจะถูกตัดปะบั้งมากขึ้นเมื่อเครื่องฟลูออโรสโคปเอียงมากขึ้น มีผลให้การคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ซึ่งอาศัยวิธีการจัดวงรีให้กับจุดภาพเพื่อคำนวณย้อนกลับไปหาวงกลมใน 3 มิติของรูยึดสกรูมีความผิดพลาดมากขึ้นเนื่องจากอัตราของจุดภาพที่เป็นขอบของวงรีเมื่อเทียบกับความยาวเส้นรอบวงของวงรีนั้นน้อยลงไปเรื่อย ๆ เมื่อเครื่องฟลูออโรสโคปเอียงมากขึ้น และความผิดพลาดอีกส่วนหนึ่งอาจเกิดได้จากภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปมีความเปรียบต่างต่ำและมีสัญญาณรบกวนอยู่มากส่งผลให้การวิเคราะห์ภาพมีความผิดพลาดอยู่บ้าง

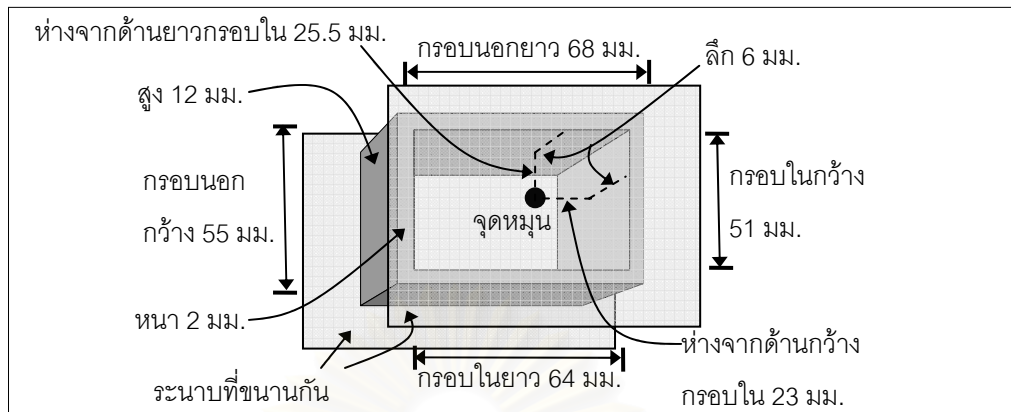
6.3 การคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย

ในหัวข้อนี้แบ่งการทดลองการคำนวณเพื่อปรับเครื่องฟลูออโรสโคปออกเป็น 3 ส่วนคือวิธีการทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์และสรุปผลดังนี้

6.3.1 วิธีการทดลอง

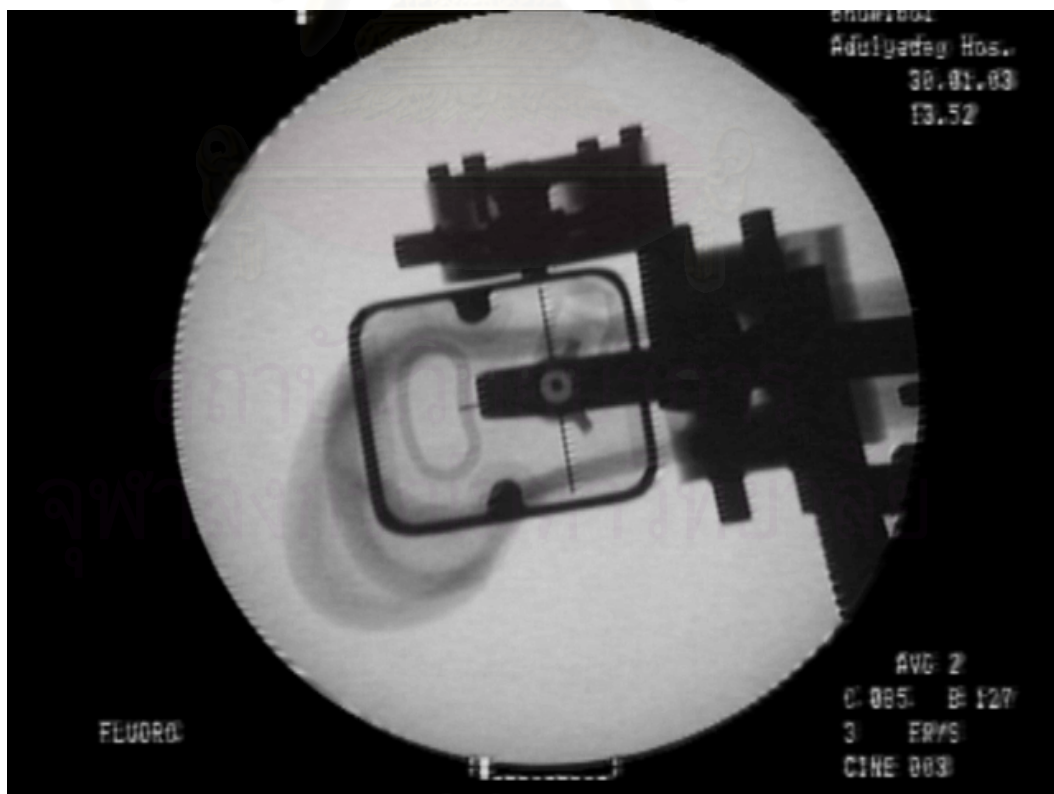
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

- ใช้ตะปูยึดกระดูกภายในต้นขา (Femoral intramedullary nail) ของบริษัท Russell-Taylor ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตรและรูยึดสกรูมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร
- เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายของบริษัท Russell-Taylor โดยโครงสร้างและขนาดของแผ่นเล็งแสดงดังรูปที่ 6.5 และมีระยะการปรับหมุนจุดปรับหมุนทั้ง 4 ดังนี้
 - จุดปรับหมุนที่ 1 เมื่อหมุนไป 0.5 รอบจะเลื่อนไปในแนวแกน y 1.2 มิลลิเมตร
 - จุดปรับหมุนที่ 2 เมื่อหมุนไป 0.5 รอบจะเลื่อนไปในแนวแกน x 0.7 มิลลิเมตร
 - จุดปรับหมุนที่ 3 เมื่อหมุนไป 0.5 รอบจะหมุนรอบแกน y 6.7 องศา
 - จุดปรับหมุนที่ 4 เมื่อหมุนไป 0.5 รอบจะหมุนรอบแกน x 6.3 องศา
- ใช้กระดูกเทียมในการทดลอง
- ใช้เครื่องฟลูออโรสโคปของบริษัท Philips รุ่น BV29 ซึ่งมีระยะโฟกัส 1 เมตรและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฉากขนาด 9 นิ้ว



รูปที่ 6.5 โครงสร้างและขนาดของแผ่นเล็ง

การทดลองทำโดยนำตะปูใส่เข้าไปในกระดุกเทียมแล้วปรับเครื่องฟลูออไรสโคปจนเห็นรูยี่ดสกรูในภาพเอกซเรย์เป็นวงกลมที่สมบูรณ์ก่อน (ตัวอย่างภาพเอกซเรย์ที่เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายตรงกับรูยี่ดสกรูแสดงดังรูปที่ 6.6) จากนั้นจึงนำเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายต่อเข้ากับตะปูและปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายให้ตรงกับรูยี่ดสกรู แล้วจึงปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายให้เอียงไปในระยะที่ทราบโดยปรับหมุนตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกาที่จุดปรับหมุนทั้ง 4 จุด และนำภาพเอกซเรย์ที่ได้จากการปรับหมุนให้เอียงไปคำนวณด้วยวิธีการคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้



รูปที่ 6.6 ภาพเอกซเรย์ที่เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายตรงกับรูยี่ดสกรู

6.3.2 ผลการทดลอง

การวัดความคลาดเคลื่อนทำมีทั้งหมด 4 แบบคือ วัดค่าความคลาดเคลื่อนเป็นรอบที่จุดหมุนปรับทั้ง 4 โดยปรับหมุนไป 0.5 รอบ 1 รอบ 1.5 รอบ และ 2 รอบ ผลการทดลองในตารางที่ 6.4 มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่จุดปรับหมุนที่ 1 0.3 รอบ จุดปรับหมุนที่ 2 0.3 รอบ จุดปรับหมุนที่ 3 0.6 รอบ และจุดปรับหมุนที่ 4 0.7 รอบ

ตารางที่ 6.4 ความคลาดเคลื่อนเป็นรอบที่จุดปรับหมุนทั้ง 4 ของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย

| หมุนไปจริง (รอบ) | | | | คำนวณได้ (รอบ) | | | | คลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (รอบ) | | | |
|------------------|------|------|------|----------------|------|------|------|---------------------------|-----|-----|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| +0.5 | 0 | 0 | 0 | +1 | 0 | -1.5 | +1.5 | 0.5 | 0 | 1.5 | 1.5 |
| 0 | -0.5 | 0 | 0 | 0 | -0.5 | -0.5 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0 |
| 0 | +0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | -0.5 | 0 | 0 | 0 | -0.5 | +0.5 | 0 | 0 | 0 | 0.5 |
| 0 | 0 | +0.5 | 0 | +0.5 | 0 | -1.5 | +1 | 0.5 | 0 | 2 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | -0.5 | 0 | 0 | -0.5 | +0.5 | 0 | 0 | 0.5 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | +0.5 | 0 | 0 | -0.5 | +0.5 | 0 | 0 | 0.5 | 0 |
| -1 | 0 | 0 | 0 | -1 | -0.5 | -0.5 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0 |
| +1 | 0 | 0 | 0 | +1 | 0 | -1.5 | +2 | 0 | 0 | 1.5 | 2 |
| 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | -1 | -0.5 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0 |
| 0 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0.5 | +1 | 0 | 1 | 0.5 | 1 |
| 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | -1 | +0.5 | 0 | 0 | 0 | 0.5 |
| 0 | 0 | +1 | 0 | 0 | 0 | -0.5 | 0 | 0 | 0 | 1.5 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | -1 | +0.5 | 0 | -1.5 | +1.5 | 0.5 | 0 | 1.5 | 2.5 |
| 0 | 0 | 0 | +1 | 0 | 0 | -0.5 | +1.5 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 |
| -1.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | +0.5 | 1.5 | 1 | 1 | 0.5 |
| +1.5 | 0 | 0 | 0 | +1 | 0 | -0.5 | +1.5 | 0.5 | 0 | 0.5 | 1.5 |
| 0 | -1.5 | 0 | 0 | 0 | -1.5 | -0.5 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0 |
| 0 | +1.5 | 0 | 0 | -0.5 | +0.5 | 0 | +0.5 | 0.5 | 1 | 0 | 0.5 |
| 0 | 0 | -1.5 | 0 | 0 | 0 | -1.5 | +0.5 | 0 | 0 | 0 | 0.5 |
| 0 | 0 | +1.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | +0.5 | 0 | 0 | 1.5 | 0.5 |
| 0 | 0 | 0 | -1.5 | 0 | 0 | -1 | -0.5 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | +1.5 | 0 | 0 | -0.5 | +2 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 |
| -2 | 0 | 0 | 0 | -2 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

ตารางที่ 6.4 (ต่อ) ความคลาดเคลื่อนเป็นรอบที่จุดปรับหมุนทั้ง 4 ของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย

| หมุนไปจริง (รอบ) | | | | คำนวณได้ (รอบ) | | | | คลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (รอบ) | | | |
|------------------|------|------|------|----------------|------|------|------|---------------------------|------------|------------|------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| +2 | 0 | 0 | 0 | +1.5 | +0.5 | -0.5 | +1.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.5 |
| 0 | -2 | 0 | 0 | 0 | -1.5 | -1 | +0.5 | 0 | 0.5 | 1 | 0.5 |
| 0 | 0 | -2 | 0 | +0.5 | 0 | -2 | 0 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | -2 | 0 | 0 | -0.5 | -1.5 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 |
| 0 | 0 | 0 | +2 | -0.5 | 0 | 0 | +4 | 0.5 | 0 | 0 | 2 |
| +0.5 | 0 | +0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | +1.5 | 0.5 | 0 | 0.5 | 1.5 |
| -1 | -1 | 0 | 0 | -0.5 | -1.5 | -0.5 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 |
| -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | -0.5 | -1.5 | +0.5 | 1 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| -1 | 0 | 0 | -1 | -1 | -0.5 | -0.5 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 | 1 |
| -0.5 | -0.5 | -0.5 | -0.5 | 0 | -1 | -1 | -0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 |
| +1 | 0 | +1 | 0 | 0 | 0 | 0 | +1.5 | 1 | 0 | 1 | 1.5 |
| +1 | 0 | 0 | +1 | +0.5 | 0 | 0 | +2 | 0.5 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | -1 | +1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | -0.5 | +0.5 | 0 | 0 | 0.5 | 1.5 |
| 0 | +1 | +1 | 0 | -0.5 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | +1 | 0 | +1 | 0 | +0.5 | -0.5 | +0.5 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | -0.5 | 0 | +2 | 0 | -1 | -0.5 | +3.5 | 0 | 0.5 | 0.5 | 1.5 |
| -1 | -1 | -1 | 0 | -0.5 | -1.5 | -1 | +0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0.5 |
| -1 | -1 | 0 | -1 | -1 | -1.5 | -0.5 | -0.5 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| -1 | 0 | -1 | -1 | -0.5 | -0.5 | -1 | +0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 1.5 |
| -1 | 0 | 0 | -2 | -1 | -1 | -1 | -2 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| +1 | +1 | 0 | +1 | 0 | +1 | 0 | +3 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| +1 | 0 | +1 | +1 | +0.5 | 0 | 0 | +1 | 0.5 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | -1 | -1 | -1 | 0 | -0.5 | 0 | -0.5 | 0 | 0.5 | 1 | 0.5 |
| 0 | +1 | +1 | +1 | 0 | 0 | -0.5 | +0.5 | 0 | 1 | 1.5 | 0.5 |
| -0.5 | +1 | -2 | 0 | -0.5 | 0 | -1.5 | 0 | 0 | 1 | 0.5 | 0 |
| +1 | +1 | +1 | +1 | 0 | +1 | 0 | +2 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| -2 | 0 | -1 | -1.5 | -1 | -1 | -1.5 | 0 | 1 | 1 | 0.5 | 1.5 |
| เฉลี่ย | | | | | | | | 0.3 | 0.3 | 0.6 | 0.7 |

หมายเหตุ เครื่องหมาย + หมายถึงหมุนตามเข็มนาฬิกา เครื่องหมาย - หมายถึงหมุนทวนเข็มนาฬิกา

6.3.3 การวิเคราะห์และสรุปผล

จากผลการทดลองดังตารางที่ 6.4 สรุปได้ว่าในการคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย แต่ครั้งนั้นสามารถคำนวณให้ใกล้เคียงกับระยะจริงอยู่ในช่วง 0.3 รอบที่จุดปรับหมุนที่ 1 อยู่ในช่วง 0.3 รอบที่จุดปรับหมุนที่ 2 อยู่ในช่วง 0.6 รอบที่จุดปรับหมุนที่ 3 และอยู่ในช่วง 0.7 รอบที่จุดปรับหมุนที่ 4 โดยในจุดปรับหมุนที่ 1 และ 2 นั้นมีความผิดพลาดอยู่เล็กน้อย ส่วนจุดปรับหมุนที่ 3 และ 4 นั้นยังมีความผิดพลาดอยู่พอสมควร ซึ่งอาจเกิดจากภาพเอกซเรย์นั้นมีสัญญาณรบกวนอยู่มากและมีความเปรียบต่างต่ำ รวมทั้งส่วนหนึ่งของแผ่นเล็งนั้นถูกตะปูบังอยู่และในบางกรณีแผ่นเล็งถูกส่วนอื่น ๆ ของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายบังอยู่บางส่วนซึ่งมีผลกระทบทำให้จุดภาพที่ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ภาพขาดหายไปในส่วนที่ถูกบัง นอกจากนั้นแผ่นเล็งมีระยะห่างระหว่างระนาบของกรอบสี่เหลี่ยมด้านใกล้แหล่งกำเนิดและไกลแหล่งกำเนิดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ขนาดของสี่เหลี่ยมของระนาบทั้ง 2 จึงมีความใกล้เคียงกันมากในภาพเอกซเรย์ การคำนวณหาโครงสร้างของแผ่นเล็งในภาพเอกซเรย์ผิดพลาดเพียงเล็กน้อยจึงสามารถทำให้การคำนวณหาระนาบของแผ่นเล็งใน 3 มิตินั้นผิดพลาดได้มาก

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองและวิเคราะห์ผลที่ผ่านมา สามารถสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคตได้ ดังนี้

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางและสร้างต้นแบบในการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยแนะแนวทางการยืดส่วนปลายของตะปูยึดกระดูกภายในโดยวิเคราะห์จากภาพเอกซเรย์ โดยวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ การแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป การคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป และการคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย ดังนี้

7.1.1 การแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป

การแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปได้นำเสนออุปกรณ์และวิธีแก้ไขการเพี้ยนทางเรขาคณิตของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป โดยได้ประดิษฐ์อุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งซึ่งใช้วัสดุที่สามารถหาได้ทั่วไปและประดิษฐ์ได้ง่าย วิธีแก้ไขการเพี้ยนทำได้โดยหาตำแหน่งจุดอ้างอิงของอุปกรณ์จากภาพเอกซเรย์ แล้วนำไปคำนวณเพื่อหาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการแก้ไขการเพี้ยนของภาพโดยเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงของจุดอ้างอิงในอุปกรณ์ เมื่อทดสอบกับอุปกรณ์ทดสอบความถูกต้องที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นโดยนำพารามิเตอร์ที่คำนวณได้มาใช้แก้ไขการเพี้ยนจากภาพเอกซเรย์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าทั้งอุปกรณ์และวิธีแก้ไขการเพี้ยนที่ได้นำเสนอมีความถูกต้องสูงโดยมีความคลาดเคลื่อนต่ำ กล่าวคือมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในแนวเส้นรอบวง 0.30 ± 0.07 มิลลิเมตร และมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.30 ± 0.12 มิลลิเมตรในแนวรัศมี

7.1.2 การคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป

การคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาตำแหน่งของรูยึดสกรูใน 3 มิติจากภาพเอกซเรย์และวิธีการปรับเครื่องฟลูออโรสโคปเพื่อให้เห็นรูยึดสกรูซ้อนทับกันเป็นวงกลมที่สมบูรณ์ โดยคำนวณหาระยะปรับหมุนรอบแกน x และแกน y เนื่องจากเครื่องฟลูออโรสโคปมีซีตบอกระยะปรับหมุนเป็นองศาได้รอบ 2 แกนนี้เท่านั้น การคำนวณทำโดยหาตำแหน่งที่เป็นไปได้ทั้งหมดใน 3 มิติของรูยึดสกรูโดยกำหนดขอบเขตของการคำนวณในภาพเอกซเรย์จากขนาดของตะปูที่เกิดขึ้นในภาพ

เอกซเรย์ ส่วนคำตอบนั้นคำนวณจากค่าระยะทางพีชคณิตน้อยที่สุดที่ได้จากการการคำนวณย้อนกลับของรูยี่ตสกรูใน 3 มิติกลับมาหารูยี่ตสกรูในภาพเอกซเรย์ที่เกิดขึ้นจริง การทดสอบทำโดยปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปให้รูยี่ตสกรูเอียงไปในระยะที่ทราบแล้วนำภาพเอกซเรย์ไปคำนวณด้วยวิธีที่น่าเสนอ ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการหมุนรอบแกน x 3.00 องศา หมุนรอบแกน y 1.77 องศา และจำนวนครั้งที่ต้องคำนวณและปรับหมุนจนตรงเห็นรูยี่ตสกรูเป็นวงกลมที่สมบูรณ์เหมือนเดิมเฉลี่ยเท่ากับ 1.62 ครั้งหรือมากที่สุดคือ 2 ครั้ง

7.1.3 การคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย

การคำนวณเพื่อปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายได้นำเสนอวิธีการหาตำแหน่งของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายใน 3 มิติจากภาพเอกซเรย์และวิธีการปรับเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายให้ตรงกับรูยี่ตสกรู วิธีการคำนวณทำโดยแทนโครงสร้างของแผ่นเล็งจากภาพเอกซเรย์ลงในภาพฉายแบบต่าง ๆ ของแผ่นเล็งใน 3 มิติที่เป็นไปได้ ส่วนคำตอบคำนวณได้จากภาพฉายแบบที่ทำให้ระนาบใกล้เคียงกับแกนและใกล้เคียงกับแกนของแผ่นเล็งใน 3 มิติขนานกันมากที่สุด โดยคำนวณจากระยะคลาดเคลื่อนของจุดมุมทั้ง 4 ที่ตรงกันในระนาบทั้ง 2 การทดสอบผลทำโดยปรับหมุนเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายให้เอียงไปในระยะที่ทราบแล้วนำภาพเอกซเรย์ไปคำนวณด้วยวิธีที่น่าเสนอ ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่จุดปรับหมุนที่ 1 0.3 รอบ จุดปรับหมุนที่ 2 0.3 รอบ จุดปรับหมุนที่ 3 0.6 รอบ และจุดปรับหมุนที่ 4 0.7 รอบ โดยจุดปรับหมุนที่ 1 และ 2 มีความคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อย ส่วนจุดปรับหมุนที่ 3 และ 4 ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร

7.2 ข้อสังเกตและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยโดยรวมนี้พบว่างานวิจัยนี้ยังมีส่วนต่าง ๆ ที่ควรต้องพัฒนาเพิ่มเติมและปรับปรุงเพื่อให้สามารถนำคอมพิวเตอร์ไปใช้ช่วยในการผ่าตัดยึดส่วนปลายของตะปูยึดกระดูกภายในได้สะดวกและปลอดภัยยิ่งขึ้น ดังนี้

1. ภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นภาพที่ทดลองใส่ตะปูกับกระดูกเทียมเท่านั้น ดังนั้นจึงควรนำภาพที่มีส่วนของผู้ป่วยมาทดลองด้วยเนื่องจากผู้วิจัยคาดว่าน่าจะมีผลต่อขั้นตอนวิธีที่น่าเสนอโดยเฉพาะการหาค่าขีดแบ่ง
2. ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปมีความเปรียบเทียบต่างต่ำและมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก ถ้าหากสามารถใช้อุปกรณ์ที่นำเข้าภาพจากเครื่องฟลูออโรสโคปที่มีคุณภาพสูงและปรับปรุงวิธีการขจัดสัญญาณรบกวนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อาจทำให้ผลจากการวิเคราะห์ภาพซึ่งเป็นหัวใจหลักในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นและจะส่งผลให้ผลการทดลองมีความถูกต้องมากขึ้นด้วย
3. อุปกรณ์ที่ใช้อ้างอิงตำแหน่งซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้ทำจากแผ่นพลาสติกและลูกเหล็ก ซึ่งเป็นเพียงอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองเบื้องต้นเท่านั้น โดยต้องการให้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัสดุที่หาได้ง่าย มีราคาถูกและสามารถประดิษฐ์

ขึ้นใช้ได้เอง ผู้วิจัยเห็นว่าวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริงในห้องผ่าตัด ควรมีการปรับปรุงวัสดุที่ใช้ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้นเพราะแผ่นพลาสติกเมื่อใช้งานไปเป็นระยะเวลาอันยาวนานแล้ว อาจเปลี่ยนรูปร่างได้มีผลทำให้ตำแหน่งที่ใช้อ้างอิงคลาดเคลื่อน รวมทั้งแผ่นพลาสติกนั้นทำความสะอาดได้เช่นเครื่องมือแพทย์ทั่วไปได้ยาก วัสดุที่นำมาใช้ทดแทนอาจใช้แผ่นโลหะผสมอลูมิเนียม (Aluminum alloy) ดังเช่นงานวิจัยของ Joskowicz และคณะ [1]

4. วิธีการคำนวณเพื่อปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังคงสามารถใช้ได้กับภาพเอกซเรย์ที่เครื่องฟลูออโรสโคปเอียงไปเฉพาะรอบแกน x และแกน z เท่านั้น เนื่องจากเครื่องฟลูออโรสโคปที่ใช้ในงานวิจัยมีซีตบอกระยะปรับหมุนรอบ 2 แกนนี้เท่านั้น แต่ผลลัพธ์จากการคำนวณนั้นสามารถบอกระยะการปรับหมุนรอบแกน y และการเลื่อนตำแหน่งเครื่องฟลูออโรสโคปได้ ถ้าหากสามารถใช้เครื่องฟลูออโรสโคปที่มีซีตบอกระยะการปรับหมุนและการเลื่อนที่ละเอียดและสมบูรณ์ทุกจุด จะทำให้สามารถวัดผลการทดลองได้สมบูรณ์ครบถ้วนยิ่งขึ้น เนื่องจากความเป็นจริงในขณะผ่าตัดนั้น การปรับหมุนรอบแกน y และการเลื่อนตำแหน่งเครื่องฟลูออโรสโคปก็มีความสำคัญจำเป็นต้องใช้เพื่อปรับเครื่องฟลูออโรสโคปให้สามารถมองเห็นรอยขีดสกรูซ้อนทับกันเป็นวงกลมที่สมบูรณ์

5. วิธีการคำนวณเพื่อปรับเครื่องฟลูออโรสโคปที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังคงใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก โดยในการคำนวณแต่ละครั้งนั้นใช้เวลาประมาณ 30 วินาที อาจทำให้แพทย์ต้องรอผลการคำนวณนานเกินไปในการปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปแต่ละครั้ง ถ้าหาสามารถปรับปรุงวิธีการคำนวณให้ใช้เวลาน้อยลงหรือใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงจะทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วทันใจในการใช้งานจริงมากขึ้น

6. การวัดระยะในการปรับหมุนเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายทำได้ละเอียดที่สุดในหน่วย 0.5 รอบเท่านั้น เนื่องจากซีตบอกระยะการปรับหมุนของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายไม่สามารถบอกระยะได้ละเอียดกว่านี้ จึงควรปรับปรุงให้เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายสามารถบอกระยะได้ละเอียดกว่า 0.5 รอบ

7. โครงสร้างของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอุปสรรคต่อทการวิเคราะห์ภาพอยู่ คือ แผ่นเล็งนั้นถูกตะปูและส่วนอื่น ๆ ของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายบังอยู่บางส่วน ซึ่งมีผลกระทบทำให้จุดภาพที่ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ภาพขาดหายไปในส่วนที่ถูกบัง ทำให้มีโอกาสวิเคราะห์ภาพผิดพลาดได้ รวมทั้งโครงสร้างอื่น ๆ ภายในแผ่นเล็งปรากฏไม่ชัดเจนนักในภาพเอกซเรย์ทำให้การแบ่งส่วนภาพเพื่อหาโครงสร้างเหล่านี้ทำได้ยากยังไม่สามารถให้ประโยชน์จากส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายได้อย่างเต็มที่ ถ้าหากสามารถปรับปรุงวิธีการแบ่งส่วนภาพหรือประดิษฐ์เครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมกับการแบ่งส่วนภาพและวิเคราะห์ภาพมากขึ้นอาจทำให้เพิ่มความถูกต้องและความน่าเชื่อถือได้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. L. Joskowicz, C. Milgrom, A. Simkin, L. Tockus, and Z. Yaniv. FRACAS: A System for Computer-Aided Image-Guided Long Bone Fracture Surgery. Journal of Computer Aided Surgery 3(1998): 271-288.
2. L. -P. Nolte, M. A. Slomczykowski, U. Berlemann, M. J. Strauss, R. Hofstetter, D. Schlenzka, T. Laine and T. Lund. A New Approach to Computer-Aided Spine Surgery: Fluoroscopy-Based Surgical Navigation. European Spine Journal (Berlin) (2000): S78-S88.
3. J Yao, R. H. Taylor, R. P. Goldberg, R. Kumar, A. Bzostek, R. V. Vorhis, P. Kazanzides and A. Gueziec. A C-arm Fluoroscopy Guided Progressive Cut Refinement Strategy Using A Surgical Robot. Computer Assisted Surgery (2000): 373-390.
4. Y. Zhu, R. Phillips, J. G. Griffiths, W. Viant, A. Mohsen, and M. Bielby. Recovery of Distal Hole Axis in Intramedullary Nail Trajectory Planning. Proc. Of 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation (May 2001): 1561-1566.
5. J. G. Brown. X-rays and Their Applications. England.: C. Tinling. 1966.
6. D. A. Reimann and M. J. Flynn. Automated Distortion Correction of X-ray Image Intensifier Images. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (Florida) (1992): 1339 -1341.
7. R. C. Gonzalez and R. E. Woods. Digital Image Processing. U.S.A.: Prentice-Hall. 2002.
8. C. A. Glasbey and K. V. Mardia. A Review of Image Warping Methods. Journal of Applied Statistics (1998): 155-171.
9. M. Petrou and P. Bosdogianni. Image Processing. Great Britain : John Wiley & Sons. 1999.
10. E. Trucco and A. Verri. Introductory Techniques for 3-D Computer Vision. U.S.A.: Prentice-Hall. 1998.
11. A. Rosenfeld, and C. Kak. Digital Picture Processing. U.K.: Academic Press (London). 1976.

12. O. Duda, and E. Hart. Pattern Classification and Scene Analysis. U.S.A.: A Wiley-Interscience Publication. 1973.
13. D. Marr and E. Hildreth. Theory of Edge Detection. Proc. R Soc (Lond). B207: 187-217.
14. M. Haralick, and G. Shapiro. Computer and Robot Vision Volume II. U.S.A.: Addison-Wesley Publishing Company. 1993.
15. Y. C. Shiu and S. Ahmad. 3D Location of Circular and Spherical Features by Monocular Model-Based Vision. IEEE Proc. Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics 2 (1989): 576-581.
16. A. F. Siegel and C. J. Morgan. Statistic and Data Analysis: An Introduction. U.S.A.: John Wiley & Sons. 1996.
17. L. G. Shapiro and G. C. Stockman. Computer Vision. U.S.A.: Prentice-Hall. 2001.
18. ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2544.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

โปรแกรมต้นแบบ

ภาคผนวก ก นี้อธิบายโปรแกรมต้นแบบที่ใช้ในการแนะนำแนวทางการยึดส่วนปลายของตะปูยึดกระดูกภายใน ประกอบด้วย คุณสมบัติของโปรแกรม และโครงสร้างหน้าจอของโปรแกรม ดังนี้

ก.1 คุณสมบัติของโปรแกรม

โปรแกรมต้นแบบนี้เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อทำงานบนระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows ตั้งแต่รุ่น 98 ขึ้นไป ภาพที่เป็นส่วนนำเข้าของโปรแกรมนั้นอาจจะเป็นภาพที่มาจาก Frame grabber หรือเป็นแฟ้มข้อมูลภาพที่มีนามสกุล jpg หรือ bmp ก็ได้ โดยเมื่อโปรแกรมถูกเปิดขึ้นมาใช้งานนั้น โปรแกรมจะเริ่มค้นคว้า Frame grabber ที่อาจถูกติดตั้งไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ก่อน ถ้าหากพบว่าถูกติดตั้งไว้โปรแกรมจะอ่านภาพจาก Frame grabber เพื่อเป็นส่วนนำเข้าของโปรแกรมในการทำงานต่าง ๆ แต่ถ้าหากไม่สามารถติดต่อกับ Frame grabber ได้ โปรแกรมจะทำการเปลี่ยนสถานะของส่วนนำเข้าให้แสดงหน้าจอเพื่อให้ผู้ใช้เลือกแฟ้มข้อมูลที่จะทำงานแทนการอ่านภาพจาก Frame grabber

โปรแกรมต้นแบบนี้เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณทั้ง 3 ส่วนของงานวิจัยซึ่งประกอบด้วย 1.การแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป 2.การคำนวณหาวิธีปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป และ 3.การคำนวณหาวิธีปรับหมุนเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย โดยก่อนที่ผู้ใช้จะสามารถทำงานในส่วนที่ 2 และ 3 ได้ นั้น ผู้ใช้จะต้องทำงานในส่วนการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปในส่วนที่ 1 ก่อน คุณสมบัติและการใช้งานโปรแกรมทั้ง 3 ส่วนมีดังนี้

1. การแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป

การทำงานในส่วนนี้ผู้ใช้จะต้องทำเป็นอันดับแรกก่อนที่จะสามารถทำงานในส่วนที่ 2 และ 3 ได้ โดยจะเป็นการกำหนดบริเวณภาพเอกซเรย์เปล่าและการคำนวณเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งที่ได้นำเสนอในงานวิจัย ในส่วนนี้ผู้ใช้สามารถที่จะบันทึกภาพเอกซเรย์เปล่าและภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งในระยะการย่อหรือขยายต่าง ๆ ไว้เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งานแต่ละครั้งโดยทำการแก้ไขการเพี้ยนจากภาพที่บันทึกไว้แทนการฉายภาพเอกซเรย์เพื่อแก้ไขการเพี้ยน

2. การคำนวณหาวิธีปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป

การทำงานในส่วนนี้ผู้ใช้จะต้องใส่ข้อมูลเริ่มต้นก่อนจึงจะสามารถคำนวณได้ คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตะปูและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูยึดกระดูก เลือกการคำนวณว่าจะคำนวณรูยึด

สกรูรูใกล้หรือรูไกล และมุมที่แขนรูปตัว C เอียงอยู่ก่อนการคำนวณ

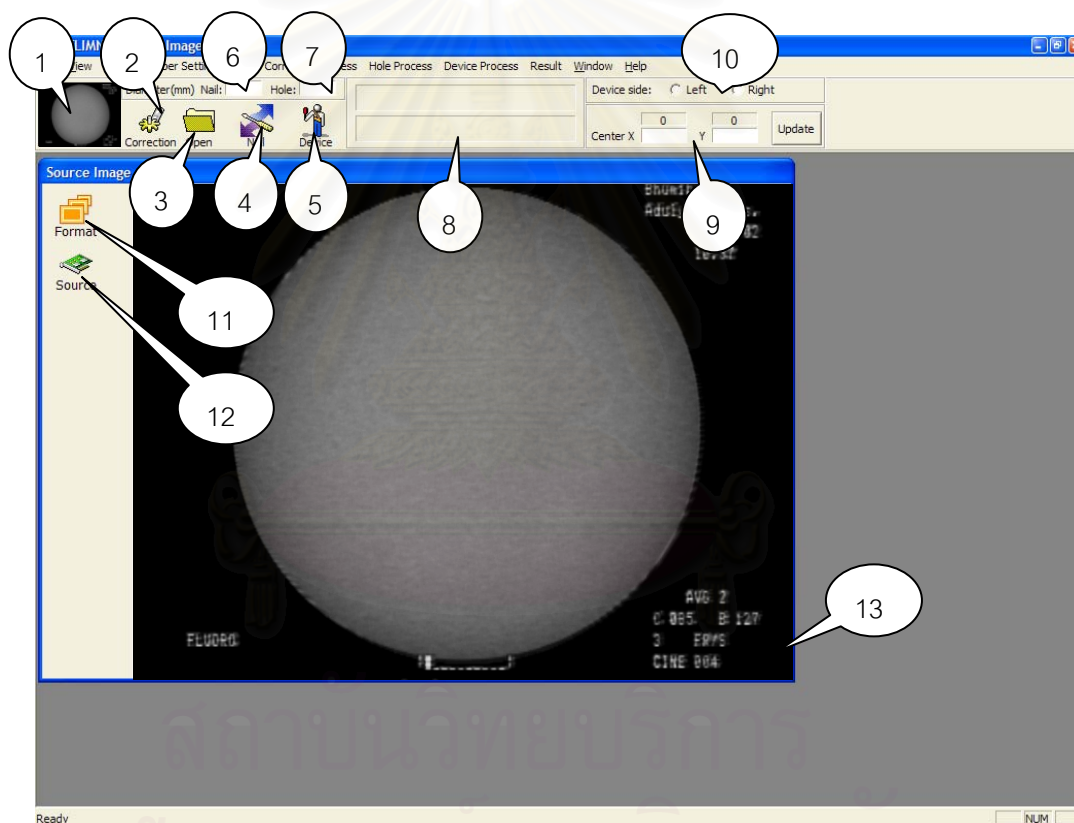
3. การคำนวณหาวิธีปรับหมุนเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย

การทำงานในส่วนนี้ผู้ใช้จะต้องใส่ข้อมูลเริ่มต้นก่อนการคำนวณคือ ตำแหน่งรูยึดสกรูในภาพเอกซเรย์ (ซึ่งคำนวณได้จากข้อ 2 หรือผู้ใช้สามารถแก้ไขเองได้ตามต้องการ) และเลือกว่าเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายอยู่ด้านใดในภาพเอกซเรย์

ก.2 โครงสร้างหน้าจอของโปรแกรม

ในส่วนนี้จะอธิบายโครงสร้างหน้าจอและการใช้งานโปรแกรม ดังนี้

หน้าจอหลัก



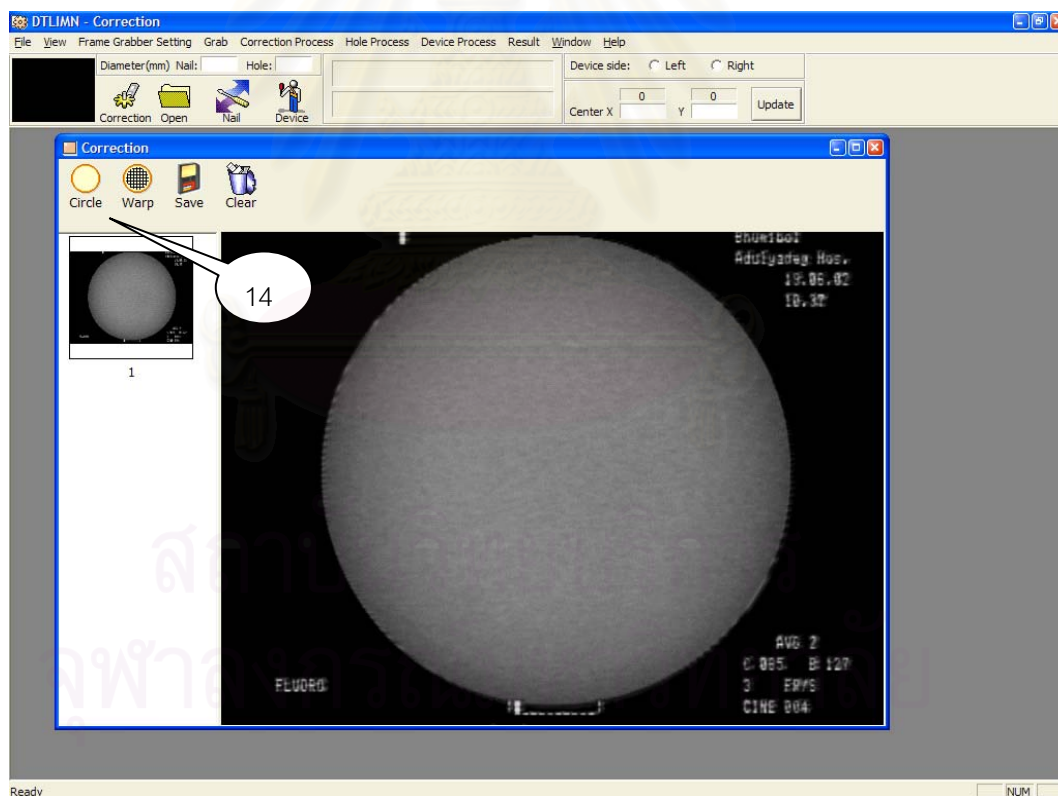
รูปที่ ก.1 หน้าจอหลัก

จากรูปที่ ก.1 ส่วนประกอบของหน้าจอหลักตามหมายเลขมีดังนี้

1. แสดงภาพแบบย่อจาก Frame grabber เพื่อให้สามารถเห็นภาพได้ตลอดเวลา
2. ปุ่มใช้เพื่อเลือกภาพจาก Frame grabber เพื่อใช้ในการคำนวณหาบริเวณภาพเอกซเรย์และแก้ไขการเพี้ยน
3. ปุ่มใช้เพื่อเปิดเลือกภาพจากแฟ้มเพื่อใช้ในการคำนวณหาบริเวณภาพเอกซเรย์และแก้ไขการเพี้ยน
4. ปุ่มใช้เพื่อเลือกภาพจาก Frame grabber เพื่อใช้ในการคำนวณการปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป

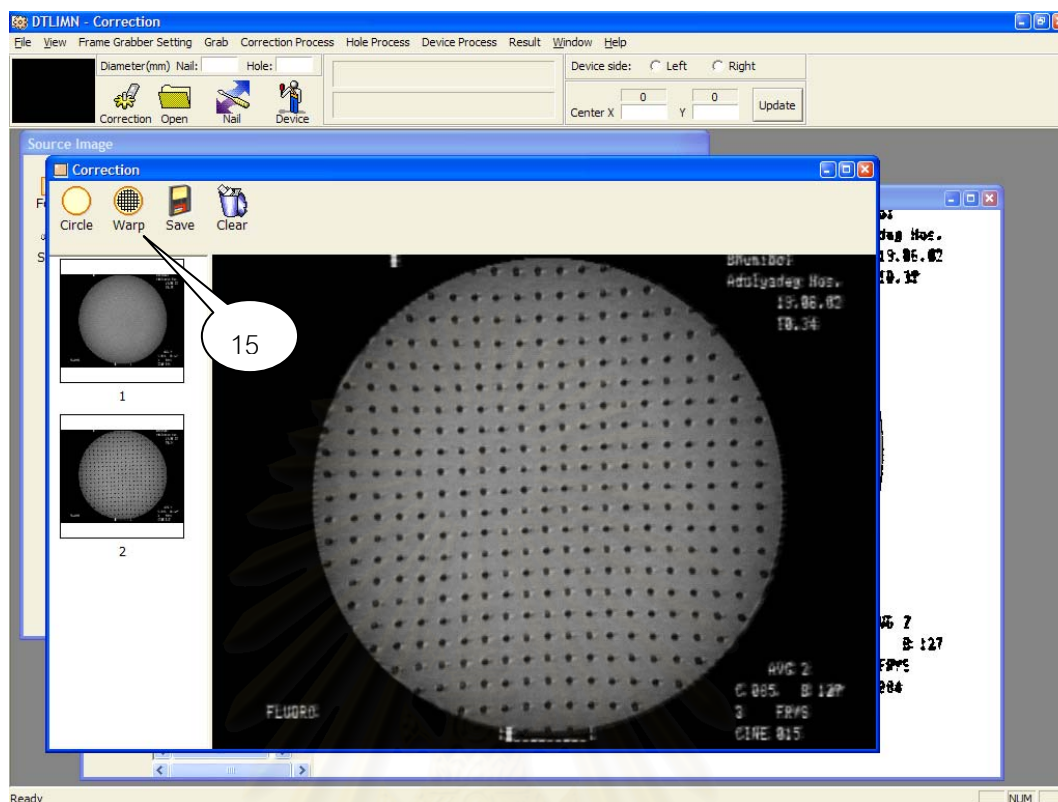
5. ปุ่มใช้เพื่อเลือกภาพจาก Frame grabber เพื่อใช้ในการคำนวณการปรับหมุนเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย
6. กล้องข้อความใช้เพื่อใส่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตะปู
7. กล้องข้อความใช้เพื่อใส่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูยึดสกรู
8. ส่วนแสดงผลพร้อมในการคำนวณการคำนวณการปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปและการปรับหมุนเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย
9. ส่วนแสดงตำแหน่งจุดศูนย์กลางของรูยึดสกรูในภาพเอกซเรย์โดยสามารถแก้ไขได้ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ
10. ส่วนที่ใช้เลือกด้านของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายในภาพเอกซเรย์
11. ปุ่มใช้เพื่อเลือกรูปแบบในการนำเข้าภาพจาก Frame grabber
12. ปุ่มใช้เพื่อเลือกชนิดของสัญญาณภาพที่ต่อเข้ากับ Frame grabber
13. ส่วนแสดงภาพขนาดเท่าภาพจริงจากสัญญาณภาพของ Frame grabber

หน้าจอการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป



รูปที่ ก.2 หน้าจอการกำหนดบริเวณภาพเอกซเรย์จากภาพเอกซเรย์เปล่า

เมื่อเลือกปุ่มที่ 2 หรือ 3 ในหน้าจอหลักเพื่อเลือกเอาภาพเอกซเรย์เปล่ามาคำนวณหน้าจอจะปรากฏดังรูปที่ ก.2 จากนั้นเมื่อเลือกปุ่มที่ 14 โปรแกรมจะทำการคำนวณหาบริเวณของภาพเอกซเรย์รูปวงกลมสีเทาให้โดยอัตโนมัติ



รูปที่ ก.3 หน้าจอการแก้ไขการเพี้ยนจากภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง

เมื่อเลือกปุ่มที่ 2 หรือ 3 ในหน้าจอหลักเพื่อเลือกเอาภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งมาคำนวณหน้าจอจะปรากฏดังรูปที่ ก.3 จากนั้นเมื่อเลือกปุ่มที่ 15 โปรแกรมจะทำการคำนวณปรับแก้การเพี้ยนของภาพให้โดยอัตโนมัติ

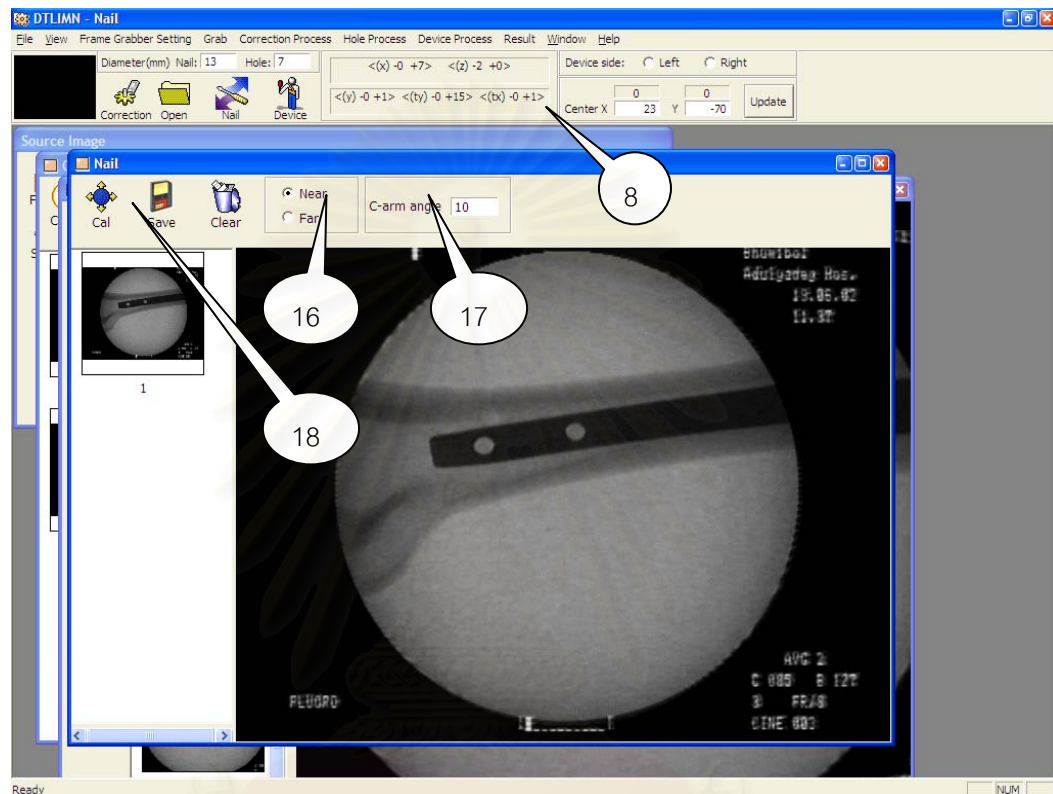
หน้าจอการคำนวณหาวิธีปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป

เมื่อเลือกปุ่มที่ 4 ในหน้าจอหลักเพื่อเลือกเอาภาพเอกซเรย์ของตะปุมาคำนวณหน้าจอจะปรากฏดังรูปที่ ก.4 ก่อนที่จะทำการคำนวณผู้ใช้ต้องใส่ข้อมูลให้ครบถ้วนก่อน คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตะปูที่หมายเลข 6 ในหน้าจอหลัก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูยึดสกรูที่หมายเลข 7 ในหน้าจอหลัก เลือกที่จะคำนวณที่รูยึดสกรูใกล้หรือรูไกลจุดศูนย์กลางภาพเอกซเรย์ที่หมายเลข 16 และใส่มุมที่เครื่องฟลูออโรสโคปเอียงอยู่ในการหมุนรอบแกน z ที่หมายเลข 17

เมื่อใส่ข้อมูลเริ่มต้นก่อนการคำนวณครบแล้วให้ผู้ใช้เลือกปุ่มหมายเลข 18 โปรแกรมจะทำการคำนวณการปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคปให้โดยอัตโนมัติโดยผลลัพธ์จะแสดงที่ส่วนแสดงผลหมายเลข 8 ตัวอย่างในรูปที่ ก.4 โปรแกรมแสดงผลดังนี้

- $\langle x \rangle -0 +7$ คือการปรับหมุนรอบแกน x ตามเข็มนาฬิกา 7 องศา
- $\langle z \rangle -2 +0$ คือการปรับหมุนรอบแกน z ทวนเข็มนาฬิกา 2 องศา

- $\langle z \rangle -0 +1$ คือการปรับหมุนรอบแกน z ตามเข็มนาฬิกา 1 องศา
- $\langle ty \rangle -0 +15$ คือการปรับเลื่อนขึ้นในแนวแกน y 15 มิลลิเมตร
- $\langle tx \rangle -0 +1$ คือการปรับเลื่อนขึ้นในแนวแกน x 1 มิลลิเมตร



รูปที่ ก.4 หน้าจอการคำนวณหาวิธีปรับหมุนเครื่องฟลูออโรสโคป

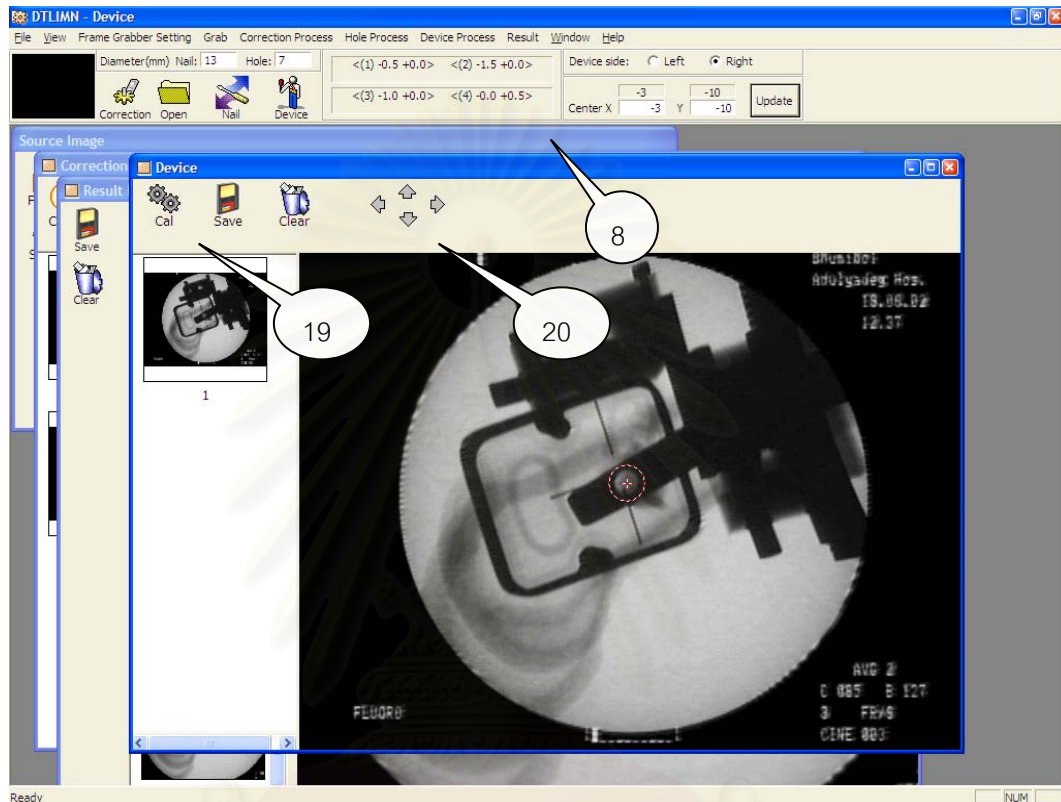
หน้าจอการคำนวณหาวิธีปรับหมุนเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย

เมื่อเลือกปุ่มที่ 5 ในหน้าจอหลักเพื่อเลือกเอาภาพเอกซเรย์ของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายมาคำนวณหน้าจอจะปรากฏดังรูปที่ ก.5 ก่อนที่จะทำการคำนวณผู้ใช้ต้องใส่ข้อมูลให้ครบถ้วนก่อน โดยเลือกด้านของเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายในภาพเอกซเรย์ที่หมายเลข 10 ในหน้าจอหลัก และผู้ใช้สามารถเปลี่ยนตำแหน่งจุดศูนย์กลางของรูยึดสกรูในภาพเอกซเรย์ที่หมายเลข 9 ในหน้าจอหลักหรือใช้ปุ่มรูปลูกศรหมายเลข 20 ได้ตามต้องการ

เมื่อใส่ข้อมูลเริ่มต้นก่อนการคำนวณครบแล้วให้ผู้ใช้เลือกปุ่มหมายเลข 19 โปรแกรมจะทำการคำนวณการปรับหมุนเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลายให้โดยอัตโนมัติโดยผลลัพธ์จะแสดงที่ส่วนแสดงผลหมายเลข 8 ในหน้าจอหลัก ตัวอย่างในรูปที่ ก.5 โปรแกรมแสดงผลลัพธ์ดังนี้

- $\langle (1) -0.5 +0.0 \rangle$ คือการปรับหมุนทวนเข็มนาฬิกาที่จุดปรับหมุนที่ 1 0.5 รอบ

- $\langle(2) -1.5 +0.0\rangle$ คือการปรับหมุนทวนเข็มนาฬิกาที่จุดปรับหมุนที่ 2 1.5 รอบ
- $\langle(3) -1.0 +0.0\rangle$ คือการปรับหมุนทวนเข็มนาฬิกาที่จุดปรับหมุนที่ 3 -0 รอบ
- $\langle(1) -0.0 +0.5\rangle$ คือการปรับหมุนตามเข็มนาฬิกาที่จุดปรับหมุนที่ 4 0.5 รอบ



รูปที่ ก.5 หน้าจอการคำนวณหาวิธีปรับหมุนเครื่องหาตำแหน่งส่วนปลาย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

บทความที่นำเสนอในงานการประชุมวิชาการ

บทความเรื่อง “วิธีการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป” นำเสนอในงานประชุมวิชาการ The 6th National Computer Science and Engineering Conference 2002 จัดที่โรงแรม Jomtien Palm Beach Hotel & Resort พัทยา จังหวัดชลบุรี ระหว่างวันที่ 29-31 ตุลาคม พ.ศ. 2545 บทความนี้ตีพิมพ์ไว้ใน Proceedings of The 6th National Computer Science and Engineering Conference 2002 หน้า 78 – 83



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป

A Distortion Correction Method of Fluoroscopic X-ray Images

กำธร สิมมามี¹ นงลักษณ์ โควาวิสารุช² วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ³ และ วิญญู รัตนชัย⁴

Kamthorn Simmami Nongluk Covavisaruch Wiwat Vatanawood and Winyou Ratanachai

Department of Computer Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand^{1,2,3}

Department of Orthopaedics, Bhumibol Adulyadej Hospital, Bangkok 10220, Thailand⁴

43702235@student.chula.ac.th¹ nongluk.c@chula.ac.th² wiwat@chula.com³ and toywinyou@yahoo.com⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนออุปกรณ์และวิธีแก้ไขการเพี้ยนทางเรขาคณิตของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป โดยได้ประดิษฐ์อุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งซึ่งใช้วัสดุที่สามารถหาได้ทั่วไปและประดิษฐ์ได้ง่าย วิธีแก้ไขการเพี้ยนทำได้โดยหาตำแหน่งจุดอ้างอิงของอุปกรณ์จากภาพเอกซเรย์ แล้วนำไปคำนวณเพื่อหาพารามิเตอร์การแก้ไขการเพี้ยนของภาพ โดยเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงของจุดอ้างอิงในอุปกรณ์ เมื่อทดสอบโดยนำพารามิเตอร์ที่คำนวณได้มาแก้ไขการเพี้ยนจากภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์ทดสอบความถูกต้องที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าทั้งอุปกรณ์และวิธีแก้ไขการเพี้ยนที่ได้นำเสนอมีความถูกต้องสูง โดยมีความคลาดเคลื่อนต่ำ

คำสำคัญ: การแก้ไขการเพี้ยน ภาพเอกซเรย์ เครื่องฟลูออโรสโคป

Abstract

This research proposes a method for correcting the geometric distortion of fluoroscopic x-ray images. A position referencing device is invented in this research with two conditions; the device materials must be widely available and the device should be simple to build. Reference positions are extracted from the x-ray image of the referencing device. By comparing these positions with those exact ones of the real device, distortion correction parameters are calculated. The results from our experiment on applying the proposed device and method reveal that the positions after distortion correction are accurate with minute errors.

Keywords: Distortion Correction, X-ray Images, Fluoroscope,

1. บทนำ

ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปมีความสำคัญอย่างยิ่งในการแพทย์ทางด้านออร์โทพีดิกส์ (Orthopaedics) โดยได้ถูกนำไปใช้เพื่อให้แพทย์สามารถมองเห็นกระดูก

และอุปกรณ์ทางการแพทย์อื่น ๆ ซึ่งอยู่ภายในร่างกายของผู้ป่วย ขณะผ่าตัด แต่ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปนี้เป็นภาพในมุมมองที่แคบและเป็นเพียงภาพ 2 มิติ ซึ่งเกิดจากการฉายของวัตถุจริงใน 3 มิติ ดังนั้นในขณะดำเนินการผ่าตัด แพทย์จึงต้องมองภาพ 2 มิติในมุมมองต่าง ๆ และจินตนาการถึงรูปร่างและตำแหน่งจริงของวัตถุใน 3 มิติ ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ดำเนินการผ่าตัดที่นอกจากจะขึ้นกับความซับซ้อนและความยากในแต่ละกรณีของความเจ็บป่วยแล้ว ยังขึ้นอยู่กับความชำนาญของแพทย์ในการใช้เครื่องมือ ความชำนาญในการมองภาพ 2 มิติและจินตนาการให้เป็น 3 มิติด้วย ยิ่งถ้าการผ่าตัดใช้ระยะเวลามากก็อาจทำให้ทั้งแพทย์และผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีเอกซ์มากตามไปด้วย ทำให้เกิดเป็นอันตรายต่อร่างกายได้

ในปัจจุบันมีงานวิจัยต่าง ๆ ในต่างประเทศหลายงานวิจัยที่สามารถใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับเครื่องฟลูออโรสโคปเป็นเครื่องมือช่วยในการผ่าตัดทางด้านออร์โทพีดิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น ระบบ FRACAS [1] ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ช่วยแนะแนวทางให้กับแพทย์ในกรณีรักษากระดูกหักโดยการผ่าตัดใส่ตะปูยึดกระดูกภายใน (intramedullary nail) โดยใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับเครื่องฟลูออโรสโคปและเครื่อง CT-scan สร้างภาพความเป็นจริงเสมือน (virtual reality) ทำให้แพทย์สามารถมองเห็นโครงสร้างของกระดูกใน 3 มิติได้ และตัวอย่างที่สองเป็นการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการผ่าตัดใส่สกรูยึดกระดูกสันหลัง [2] งานวิจัยนี้จะใช้ภาพเอกซเรย์หลาย ๆ

มุมมองร่วมกับอุปกรณ์นำทางหลายชั้นซึ่งมีทั้งส่วนที่ติดไว้กับเครื่องฟลูออโรสโคปและส่วนที่ใช้อ้างอิงกับตำแหน่งของลำตัวผู้ป่วย จากผลการทดลองของงานวิจัยที่ยกตัวอย่างขึ้นมาสามารถช่วยอำนวยความสะดวก เพิ่มความถูกต้อง ลดเวลาและลดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการผ่าตัดได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นปัญหาต่างๆ และวิธีการแก้ปัญหาซึ่งล้วนต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพง

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในการนำภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปไปใช้ในการคำนวณคือ ภาพเอกซเรย์นั้นมีการเพี้ยนทางเรขาคณิตอันเนื่องมาจากกระบวนการสร้างภาพของเครื่องฟลูออโรสโคปเอง Yao และคณะ [3] แก้ปัญหานี้โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมที่ยอมให้รังสีผ่านได้บางส่วน (semi-radiolucent aluminum plate) ซึ่งถูกคว้านเป็นร่องลึกเป็นแถวหลาย ๆ แถวตัดกันทั้งในแนวตั้งและแนวนอนเป็นรูปตารางสี่เหลี่ยม นำไปติดเข้ากับส่วนรับรังสีเอกซ์ของเครื่องฟลูออโรสโคป แล้วจึงใช้จุดตัดของร่องลึกจากภาพเอกซเรย์ไปคำนวณเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพ Joskowicz และคณะ [1] ใช้แผ่นโลหะผสมอลูมิเนียม (aluminum alloy) เจาะรูรูปร่างกลมหลาย ๆ รูอยู่ในแนวจุดตัดของรูปตารางสี่เหลี่ยม แล้วใช้จุดศูนย์กลางของรูเหล่านี้จากภาพเอกซเรย์ไปคำนวณแก้ไขการเพี้ยนของภาพ

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งและนำเสนอวิธีการเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปด้วยอุปกรณ์นี้ โดยงานวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นส่วนแรกของงานวิจัยที่ทำการใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับเครื่องฟลูออโรสโคปและแนวทางการเจาะยึดสลักเกลียวที่ส่วนปลายของตะปูยึดกระดูกภายในให้แก่แพทย์ในขณะที่ผ่าตัดรักษาผู้ป่วยกระดูกหัก

2. ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป

การเอกซเรย์ด้วยเครื่องฟลูออโรสโคปต่างจากการเอกซเรย์โดยทั่วไป เนื่องจากสามารถเห็นภาพเอกซเรย์ได้แบบทันกาล (real-time) แทนที่การใช้ฟิล์ม ส่วนประกอบหลักของเครื่องฟลูออโรสโคปประกอบด้วย 2 ส่วนแสดงดังรูปที่ 1 คือ ส่วนแสดงภาพเอกซเรย์ซึ่งรับสัญญาณภาพ

และแสดงภาพออกที่จอภาพ และส่วนกำเนิดภาพเอกซเรย์ซึ่งประกอบด้วยแขนรูปตัว C (C-arm) ที่สามารถปรับหมุนให้เห็นภาพในมุมมองต่าง ๆ ได้ โดยมีส่วนกำเนิดรังสีเอกซ์และส่วนรับรังสีเอกซ์ติดอยู่ ณ แต่ละด้านของแขนรูปตัว C นี้ และคร่อมอยู่ระหว่างลำตัวของผู้ป่วย

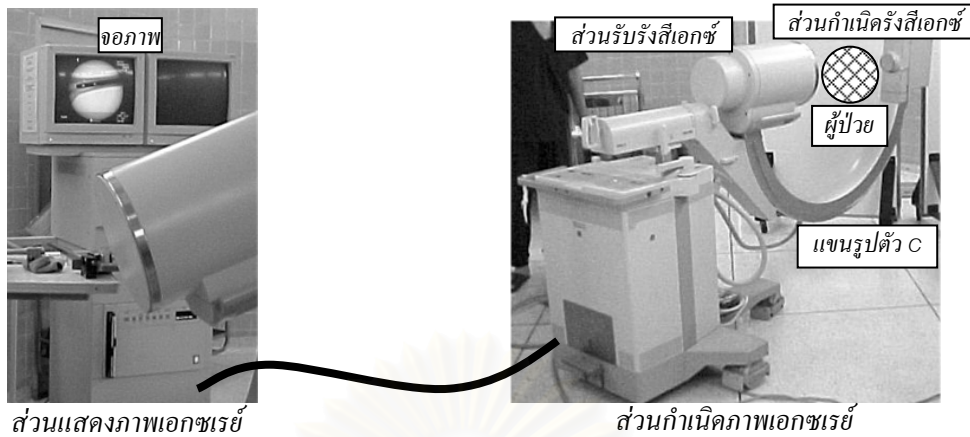
เครื่องฟลูออโรสโคปให้กำเนิดภาพเอกซเรย์จากส่วนรับรังสีเอกซ์ ซึ่งภายในมีตัวสร้างภาพ (image intensifier) บรรจุอยู่ แสดงภาพตัดขวางดังรูปที่ 2 รังสีเอกซ์จะถูกเปลี่ยนเป็นอิเล็กตรอนโดยฉากรับรังสีเอกซ์และสุดท้ายได้ผลลัพธ์เป็นแสงที่สามารถมองเห็นได้ [4]

เนื่องจากฉากรับรังสีเอกซ์ของตัวสร้างภาพเป็นรูปวงกลมที่มีพื้นผิวโค้ง ดังนั้นภาพเอกซเรย์ที่นำไปใช้งานได้คือบริเวณวงกลมขนาดใหญ่ของภาพที่ได้จากเครื่องฟลูออโรสโคปเท่านั้น จะเห็นได้จากบริเวณวงกลมสีอ่อนของภาพเอกซเรย์เปล่าดังแสดงในรูปที่ 3

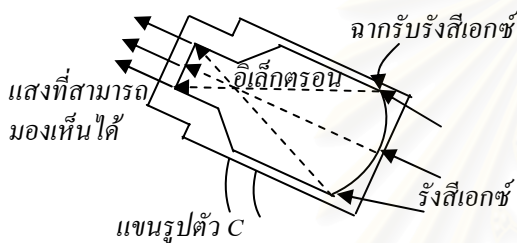
ความโค้งของพื้นผิวของฉากมีผลกับภาพเอกซเรย์ 2 ประการ ประการแรกคือความเข้มของภาพ โดยภาพในบริเวณที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางจะสว่างกว่าบริเวณที่อยู่ไกลจากจุดศูนย์กลาง (จะเห็นได้จากรูปที่ 3) และประการที่ 2 เกิดความเพี้ยนทางเรขาคณิต โดยมีผลทำให้อัตราส่วนของระยะในภาพของแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน กล่าวคืออัตราส่วนจะขยายมากขึ้นเมื่ออยู่ไกลจากจุดศูนย์กลางภาพ ตัวอย่างเช่น ภาพของวัตถุเดียวกันจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออยู่ในตำแหน่งที่ไกลจากจุดศูนย์กลางมากขึ้น

3. เครื่องมือที่ออกแบบเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพ

จากงานวิจัยที่ได้มีการประดิษฐ์และนำเสนออุปกรณ์แก้ไขการเพี้ยนทางเรขาคณิตของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปขึ้นมานั้น [1, 3] ล้วนใช้วัสดุที่มีราคาแพงและประดิษฐ์ขึ้นมาใช้งานเองได้ยาก ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการประดิษฐ์อุปกรณ์โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่าย มีราคาถูกและสามารถประดิษฐ์ขึ้นใช้ได้เองโดยต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือต้องสามารถอ้างอิงตำแหน่งของอุปกรณ์กับตำแหน่งในภาพเอกซเรย์ของตัวอุปกรณ์เองได้ และสามารถคำนวณเพื่อแก้การเพี้ยนจากจุดอ้างอิงเหล่านี้ได้โดยง่าย



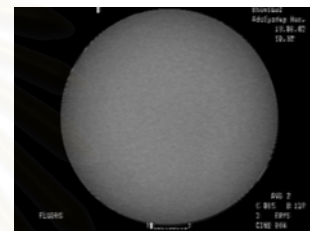
รูปที่ 1. ส่วนประกอบของเครื่องฟลูออโรสโคป



รูปที่ 2. ภาพตัดขวางของส่วนรับรังสีเอกซ์

งานวิจัยนี้จึงได้ประดิษฐ์ “อุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง” และ “อุปกรณ์ทดสอบความถูกต้อง” จากการแก้ไขการเพี้ยน โดยอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งซึ่งเป็นเครื่องมือในการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์มีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกใสเจาะรูและบรรจุลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร เรียงตัวกันในแนวจุดตัดของตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส จุดศูนย์กลางของลูกเหล็กแต่ละลูกห่างกัน 10 มิลลิเมตรในแนวตั้งและแนวนอน ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลของอุปกรณ์อ้างอิงแสดงไว้ดังรูปที่ 4 (ก)

อุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งนี้จะถูกนำไปวางติดกับส่วนรับรังสีเอกซ์ของเครื่องฟลูออโรสโคปเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของจุดภาพที่เพี้ยนในภาพเอกซเรย์กับตำแหน่งที่ถูกต้อง ซึ่งก็คือการนำตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กในภาพเอกซเรย์มาคำนวณหาความสัมพันธ์เพื่อปรับแก้ให้จุดศูนย์กลางเหล่านี้เรียงตัวกันเป็นตารางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเหมือนกับอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง

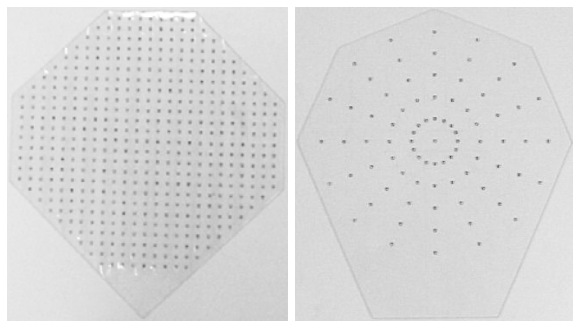


รูปที่ 3. ภาพเอกซเรย์เปล่าของเครื่องฟลูออโรสโคป

ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความถูกต้องนั้นใช้วัสดุเช่นเดียวกันกับอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง แตกต่างกันที่ตำแหน่งการเจาะรูฝังลูกเหล็ก โดยฝังที่จุดศูนย์กลาง 1 ลูก และฝังตามแนวเส้นรอบวงของวงกลมจากจุดศูนย์กลาง 5 วง มีรัศมี 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิเมตรตามลำดับ ในแต่ละวงฝังลูกเหล็ก 16 ลูก แนวรัศมีของลูกเหล็กห่างกัน 22.5 องศา ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความถูกต้องแสดงดังรูปที่ 4(ข) ในการทดสอบความถูกต้องทำได้โดยนำภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์นี้ไปปรับแก้การเพี้ยน แล้ววัดระยะลูกเหล็กแต่ละลูกจากลูกที่อยู่จุดศูนย์กลางเปรียบเทียบกับระยะจริงของอุปกรณ์

4. วิธีแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์

การคำนวณเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพนั้นทำกับภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลักคือ การหาจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กในภาพ และการคำนวณเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพ ดังนี้



(ก) อุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง (ข) อุปกรณ์ทดสอบความถูกต้อง

รูปที่ 4. ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งและอุปกรณ์ทดสอบความถูกต้อง

4.1 การหาจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กในภาพเอกซเรย์

การวิเคราะห์ภาพเพื่อหาจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การประมวลผลก่อนหน้า การแบ่งส่วนภาพ และการคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลูกเหล็ก

4.1.1 การประมวลผลก่อนหน้า

ภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคปมีคุณสมบัติที่เป็นปัญหาต่อการวิเคราะห์ภาพอยู่หลายประการ นอกจากมีการเพี้ยนของความเข้มแสงของภาพและการเพี้ยนทางเรขาคณิตแล้ว ยังมีความเปรียบต่าง (contrast) ต่ำและมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก ก่อนการวิเคราะห์ภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง งานวิจัยนี้จึงจัดสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองแบบเกาส์เซียน [5]

ส่วนปัญหาความเข้มของภาพเอกซเรย์ที่สว่างไม่เท่ากันนั้นส่งผลให้ค่าระดับเทาของลูกเหล็กในภาพเอกซเรย์แต่ละลูกมีค่าไม่เท่ากัน โดยลูกเหล็กที่อยู่ไกลจากจุดศูนย์กลางออกไปมีสีมืดกว่าลูกเหล็กที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางมากกว่า อีกทั้งลูกเหล็กนั้นมีขนาดเล็กมีผลให้ลูกเหล็กที่อยู่บริเวณกลางภาพมีสีมืดใกล้เคียงกับส่วนพื้นหลังบริเวณใกล้เคียง ๆ ขอบของรูปวงกลมที่เป็นส่วนของภาพเอกซเรย์ ดังนั้นหากแบ่งส่วนภาพโดยใช้ค่าขีดแบ่งที่หาจากภาพเมื่อตัดบริเวณพื้นหลังในส่วนที่มีมืด ๆ ออกไปได้ ก็อาจทำให้ตัดบริเวณที่เป็นลูกเหล็กตรงกลางภาพออกไปด้วย

งานวิจัยนี้จึงแก้ปัญหาโดยนำภาพเอกซเรย์เปล่ามาจัดสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองแบบเกาส์เซียนแล้วหา

ค่าเฉลี่ย จากนั้นคำนวณความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกับแต่ละจุดภาพของภาพเอกซเรย์เปล่าเอง แล้วนำค่าความแตกต่างนี้ไปบวกเข้ากับภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งผลลัพธ์จะทำให้ภาพเอกซเรย์ในบริเวณที่ใกล้จุดศูนย์กลางและไกลจากจุดศูนย์กลางมีอัตราความเข้มเท่า ๆ กัน มีผลให้ค่าระดับเทาของลูกเหล็กแต่ละลูกในภาพเอกซเรย์มีค่าระดับเทาไม่แตกต่างกันมาก

4.1.2 การแบ่งส่วนภาพ

การแบ่งส่วนภาพเพื่อแยกส่วนที่เป็นลูกเหล็กและส่วนที่เป็นพื้นหลังออกจากกัน ทำได้โดยใช้ค่าขีดแบ่งที่กำหนดโดยส่วนที่เป็นแอ่งลึก (valley) จากฮิสโทแกรมของภาพ เพื่อสร้างภาพลักษณะฐานสอง (binary image)

บริเวณของลูกเหล็กแต่ละลูกในภาพลักษณะฐานสองที่ได้ อาจยังไม่สมบูรณ์และขอบของบริเวณอาจจะไม่ราบเรียบนัก จึงต้องขยายขนาด (dilation) ของบริเวณลูกเหล็กโดยใช้สมาชิกของโครงสร้างแบบวงกลม [6]

4.1.3 การหาคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลูกเหล็ก

การหาจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กแต่ละลูกทำได้โดยการหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ (centroid of area) [5] ซึ่งสามารถคำนวณได้ง่ายโดยการหาค่าเฉลี่ยของพิกัดของพื้นที่ที่เป็นลูกเหล็กแต่ละลูกนั่นเอง

4.2 การคำนวณเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพ

การคำนวณเพื่อแก้ไขการเพี้ยนของภาพนี้แบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ การประมาณหาจุดศูนย์กลางใหม่ และส่วนการคำนวณตำแหน่งและค่าระดับเทา

4.2.1 การประมาณหาจุดศูนย์กลางใหม่

จุดศูนย์กลางที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 4.1 อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่เนื่องมาจากภาพเอกซเรย์มีความเปรียบต่างต่ำและมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก การแก้ปัญหานี้ทำโดยนำจุดศูนย์กลางของลูกเหล็กในแต่ละแถว ทั้งแนวตั้งและแนวนอนมาคำนวณหาฟังก์ชันการถดถอยแบบพหุนาม (polynomial regression) อันดับที่ 2 [7] จากนั้นจึงหาจุดตัดของเส้นในแนวตั้งและแนวนอนเพื่อเป็นตัวแทนของ

จุดศูนย์กลาง ผลลัพธ์ที่ได้คือจุดตัดของเส้นโค้งสีขาว แสดงดังรูปที่ 5(ก)

4.2.2 การคำนวณตำแหน่งและค่าระดับเทา

จากจุดตัดของฟังก์ชันพหุนามที่คำนวณได้ในข้อ 4.2.1 จึงนำมาหาความสัมพันธ์ของตำแหน่งกับจุดอ้างอิงที่ทราบ ซึ่งจุดตัดเหล่านี้แท้จริงแล้วเรียงตัวกันอยู่ในแนวตั้งและแนวนอนเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้การแปลงแบบเชิงเส้นคู่ (bilinear transformation) [8] ดังสมการที่ 5

$$\begin{aligned} u &= c_1x + c_2y + c_3xy + c_4 & \dots (1) \\ v &= c_5x + c_6y + c_7xy + c_8 \end{aligned}$$

เมื่อ (x,y) คือตำแหน่งอ้างอิง (u,v) คือตำแหน่งที่จุดภาพเขียนไป ส่วน c₁, c₂, ..., c₈ คือพารามิเตอร์

จากสมการที่ 1 ถ้ากำหนดให้ตำแหน่งอ้างอิงของจุดภาพคือ (0,0) (n_x,0) (0,n_y) และ (n_x,n_y) จึงสามารถสร้างความสัมพันธ์กับตำแหน่งที่จุดภาพเขียนไป (u₀₀,v₀₀) (u₁₀,v₁₀) (u₀₁,v₀₁) และ (u₁₁,v₁₁) ได้ดังสมการที่ 2

$$\begin{aligned} u &= u_{00} + (u_{10} - u_{00}) \frac{x}{n_x} + (u_{01} - u_{00}) \frac{y}{n_y} + (u_{11} - u_{10} - u_{01} + u_{00}) \frac{xy}{n_x n_y} & \dots (2) \\ v &= v_{00} + (v_{10} - v_{00}) \frac{x}{n_x} + (v_{01} - v_{00}) \frac{y}{n_y} + (v_{11} - v_{10} - v_{01} + v_{00}) \frac{xy}{n_x n_y} \end{aligned}$$

การคำนวณนั้นจะทำจากตำแหน่งอ้างอิงกลับไปว่าตรงกับตำแหน่งใดที่ภาพที่เขียนไป ซึ่งมักจะได้ผลลัพธ์คือตำแหน่งของจุดเป็นค่าจำนวนจริงและอยู่ระหว่างจุดของภาพที่เขียนไป แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 6 จึงทำให้ต้องมีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้นคู่เพื่อหาค่าระดับเทาซึ่งเป็นตัวแทนจากภาพ [9] ดังสมการที่ 7

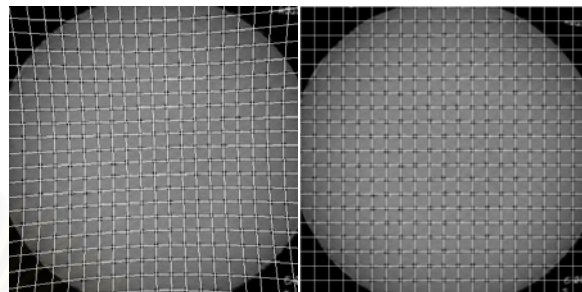
$$f(u,v) = \alpha u + \beta v + \gamma uv + \delta \quad \dots (3)$$

เมื่อ f(u,v) คือค่าระดับเทาของตำแหน่ง (u,v) และ α β γ และ δ คือพารามิเตอร์ของสมการเชิงเส้นคู่

จากสมการที่ 3 และรูปที่ 6 กำหนดให้จุด A' มีค่าระดับเทาคือ f(u,v) โดยตำแหน่งบนซ้าย บนขวา ล่างซ้าย และล่างขวามีค่าระดับเทาคือ g(0,0)=f(L_u,L_v), g(1,0)=f(L_u+1,L_v), g(0,1)=f(L_u,L_v+1) และ g(1,1)=f(L_u+1,L_v+1) ตามลำดับ และกำหนดให้ u'=u - L_u และ

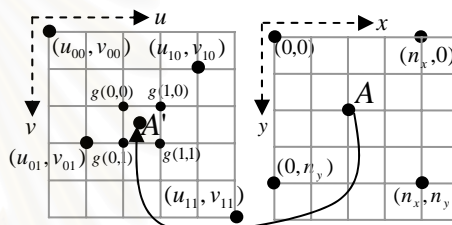
v'=v - L_v ดังนั้นค่าระดับเทาของจุด A' สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4

$$f(u,v) = \frac{[g(1,0) - g(0,0)]u' + [g(0,1) - g(0,0)]v'}{[g(1,1) + g(0,0) - g(0,1) - g(1,0)]u'v' + g(0,0)} \dots (4)$$



(ก) ก่อนแก้ไขการเพี้ยน (ข) หลังจากแก้ไขการเพี้ยน

รูปที่ 5. ภาพเอกซเรย์และฟังก์ชันพหุนามของอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง



รูปที่ 6. การคำนวณหาตำแหน่งในภาพที่เขียน

ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีแก้ไขการเพี้ยนทางเรขาคณิตนี้แสดงดังรูปที่ 5(ข) ซึ่งเป็นภาพของอุปกรณ์อ้างอิงที่ถูกปรับแก้การเพี้ยนแล้ว จะเห็นว่าลูกเหล็กเรียงตัวกันอยู่ในแนวเส้นตรงสีขาว

5. การทดลองและผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบความถูกต้องขึ้น ดังแสดงในหัวข้อที่ 3 การทดสอบทำโดยแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์ทดสอบโดยวิธีที่ได้นำเสนอ ภาพที่แก้ไขการเพี้ยนแล้วแสดงไว้ดังรูปที่ 7 จากนั้นจึงวัดระยะของลูกเหล็กแต่ละลูกในภาพที่ปรับแก้การเพี้ยนแล้วโดยเทียบกับลูกที่อยู่ ณ จุดศูนย์กลาง

ตารางที่ 1. แสดงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวเส้น รอบจากจุดศูนย์กลาง (แต่ละวงมีลูกเหล็ก 16 ลูก)

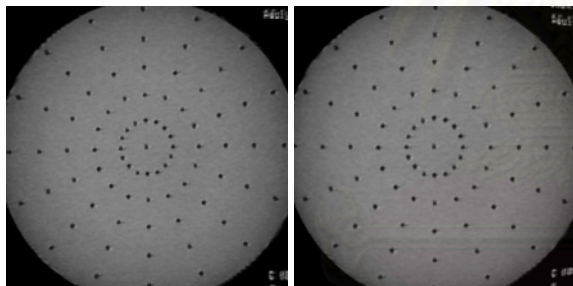
| วงกลมที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | เฉลี่ย (มม.) |
|-------------------|------|------|------|------|------|--------------|
| รัศมี (มม.) | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | |
| คลาดเคลื่อน (มม.) | 0.33 | 0.23 | 0.40 | 0.27 | 0.27 | 0.30 |

ตารางที่ 2. ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวเส้นรัศมี 16 เส้น 360 องศา (เส้นที่ 1 อยู่ที่องศาที่ 0)

| เส้นองศาที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | เฉลี่ย (มม.) |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|
| คลาดเคลื่อน (มม.) | 0.40 | 0.27 | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 0.27 | 0.20 | 0.13 | 0.13 | 0.33 | 0.40 | 0.27 | 0.13 | 0.33 | 0.27 | 0.30 | 0.30 |

วิธีการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนในงานวิจัยนี้มี 2 วิธี คือ วิธีแรกคำนวณตามแนวของเส้นรอบวงกลมจากจุดศูนย์กลางทั้ง 5 วง ในแต่ละวงจะคำนวณค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ที่ทุกเหลี่ยมแต่ละลูกคลาดเคลื่อนไป โดยคิดหน่วยเป็นมิลลิเมตร แสดงดังตารางที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของทั้ง 5 วงเป็น 0.30 มิลลิเมตร โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.07 มิลลิเมตร

วิธีที่ 2 คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนตามแนวเส้นรัศมี 16 เส้น โดยเส้นที่ 1 อยู่ที่ 0 องศา เส้นที่ 2 อยู่ที่ 22.5 องศา เรื่อยไปจนครบ 360 องศา ในแต่ละเส้นจะคำนวณค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ที่แต่ละลูกคลาดเคลื่อนไป โดยคิดหน่วยเป็นมิลลิเมตร แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของทั้ง 16 เส้นเป็น 0.30 มิลลิเมตร โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.12 มิลลิเมตร



(ก) ก่อนแก้ไขการเพี้ยน (ข) หลังจากแก้ไขการเพี้ยน

รูปที่ 7. ภาพเอกซเรย์ของอุปกรณ์ทดสอบความถูกต้อง

6. วิเคราะห์และสรุปผล

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการแก้ไขการเพี้ยนของภาพเอกซเรย์จากเครื่องฟลูออโรสโคป โดยได้ประดิษฐ์อุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งและนำเสนอวิธีคำนวณเพื่อแก้การเพี้ยนจากอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่งนี้ ในการทดสอบความถูกต้อง ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์ทดสอบความถูกต้องซึ่งมีลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์อ้างอิงตำแหน่ง แต่ต่างกันที่ตำแหน่งที่ใช้อ้างอิงในการวัดระยะทดสอบเท่านั้น

จากผลการทดลองดังตารางที่ 1 และ 2 พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นและวิธีการปรับแก้การเพี้ยนที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือ ทุกจุดภาพในภาพเอกซเรย์ที่ปรับแก้การเพี้ยนแล้วในระยะ 100 มิลลิเมตรจากจุดศูนย์กลางมีตำแหน่งคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยประมาณ 0.30 ± 0.07 มิลลิเมตรในแนวเส้นรอบวงของวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางเดียวกันแต่มีรัศมีต่าง ๆ กัน และคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.30 ± 0.12 มิลลิเมตรในแนวรัศมี ซึ่งนับว่าเป็นความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย วิธีที่นำเสนอจึงมีความถูกต้องเพียงพอ สามารถนำไปใช้ในงานวิจัยที่ใช้คอมพิวเตอร์เพื่อช่วยแพทย์ด้านออร์โทพีดิกส์ต่อไปได้ ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเนื่องจากตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีความคลาดเคลื่อนได้บ้าง หรืออาจเป็นเพราะภาพเอกซเรย์มีสัญญาณรบกวนมากและมีความเปรียบต่างต่ำ ทำให้ผลจากการวิเคราะห์ภาพมีโอกาสคลาดเคลื่อนได้เช่นกัน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Joskowicz, C. Milgrom, A. SimKin, L. Tockus and Z. Yaniv, "FRACAS: A System for Computer-Aided Image-Guided Long Bone Fracture Surgery," Computer Aided Surgery, 1998, pp. 271-288.
- [2] L. -P. Nolte, M. A. Slomczykowski, U. Berlemann, M. J. Strauss, R. Hofstetter, D. Schlenzka, T. Laine and T. Lund, "A New Approach to Computer-Aided Spine Surgery: Fluoroscopy-Based Surgical Navigation," European Spine Journal, Berlin, 2000, pp. S78- S88.
- [3] J Yao, R. H. Taylor, R. P. Goldberg, R. Kumar, A. Bzostek, R. V. Vorhis, P. Kazanzides and A. Gueziec, "A C-arm Fluoroscopy Guided Progressive Cut Refinement Strategy Using A Surgical Robot," Computer Assisted Surgery, 2000, pp. 373-390.
- [4] D. A. Reimann and M. J. Flynn, "Automated Distortion Correction of X-ray Image Intensifier Images," Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Florida, 1992, pp. 1339 -1341.
- [5] L. G. Shapiro and G. C. Stockman, Computer Vision, Prentice-Hall, Inc., U.S.A., 2001.
- [6] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing, Prentice-Hall, Inc., U.S.A., 2002.
- [7] ปราโมทย์ เศษอำไพ, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2544.
- [8] C. A. Glasbey and K. V. Mardia, "A Review of Image Warping Methods," Journal of Applied Statistics, 1998, pp. 155-171.
- [9] M. Petrou and P. Bosdogianni, Image Processing, John Wiley & Sons, Ltd., Great Britain, 1999.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกำธร สิมมามี เกิดวันที่ 2 เมษายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง หลังจากนั้นได้เข้ามาศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย