สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ภาพถ่ายสมองจากเครื่องเอ็มอาร์ไอ
Analysis of MR Images of the Brain Using Computer

โดย

ผศ. พิชัย คูศิริวานิชกร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

T034397

RCH
TK
8315
พ6429

เลขหมู่..........
เลขทะเบียน.....34397
วัน, เดือน, ปี 1 พ.ย. 2542

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ด้วยงบประมาณปี 2540

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้จะอธิบายถึงการออกแบบระบบวิเคราะห์ภาพถ่ายสมองจาก MRI ภาพอินพุทของระบบนี้ประกอบด้วยภาพ PD-weighted และ T2-weighted ที่เป็น transaxial plane ชุดละ 18 ภาพ ระบบได้รับการออกแบบให้ทำการวิเคราะห์ภาพทุกภาพทั้งชุดเพื่อชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติถ้าหากมีปรากฏในภาพ ในการวิเคราะห์ ผู้ใช้จะต้องเป็นผู้ชี้บอกภาพสมองที่มีโพรงกลางสมองใหญ่ที่สุดในชุดภาพ หลังจากนั้นการวิเคราะห์ก็จะเป็นไปโดยอัตโนมัติในทุกภาพ ในภาพที่ถูกชี้บอกโดยผู้ใช้ พารามิเตอร์ที่สำคัญบางอย่างก็จะถูกหามา เช่นค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายความเข้มของ CSF และค่าระดับกั้นบางค่า และค่าเหล่านี้ก็จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์กับภาพทุกภาพ

ในการวิเคราะห์ในแต่ละภาพ วัตถุที่ไม่อยู่ในความสนใจจะถูกกำจัดออกจากภาพทีละอย่าง โดยเริ่มจากพื้นหลังของภาพซึ่งเป็นพื้นที่ของภาพที่เป็นอากาศ ตามด้วยวัตถุต่างๆที่อยู่ภายนอกพื้นที่ของสมอง gray matter และ white matter วัตถุที่เหลือในพื้นที่สมองจะประกอบด้วย CSF เนื้อเยื่อบางอย่าง และเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ(ถ้ามี) วัตถุที่เหลือเหล่านี้ก็จะถูกนำเข้ากระบวนการชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติต่อไป มีเทคนิคหลายๆอย่างที่ถูกนำมาใช้ในขั้นตอนต่างๆของการวิเคราะห์ แต่เทคนิคเกือบทั้งหมดที่นำมาใช้เป็นเทคนิคที่อยู่บนพื้นฐานของปฏิบัติการไบนารีเชิงมอร์โฟโลยี

ในการทดลองได้ใช้ภาพสมองจำนวน 6 ชุด และผลที่ได้อยู่ในระดับน่าพอใจ ซึ่งมีเพียงความผิดพลาดเล็กน้อยเกิดขึ้นในการชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติที่มีพื้นที่ขนาดเล็กมาก และในบางภาพ เนื้อเยื่อปกติที่มีขนาดเล็กก็ถูกชี้ว่าเป็นเนื้อเยื่อผิดปกติ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 การคัดเลือกลักษณะเด่น (Features Selection) 1

1.2 การตัดแบ่งวัตถุในภาพออกจากกันเป็นส่วนๆ (Image Segmentation) 3

1.3 การชี้บอกชนิดของวัตถุ (Identification) 5

บทที่ 2 การพัฒนาเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายสมองจาก MRI 8

2.1 ระบบการทำงานพื้นฐาน 8

2.2 การสร้างปฏิบัติการทางลอจิก 9

2.3 การสร้างปฏิบัติการทางมอร์โฟโลยี 11

2.4 การกรองแบบขยายจุดภาพภายในกรอบ 17

2.5 การตัดแบ่งระดับความเข้ม (Thrseholding) 20

2.5.1 การตัดแบ่งระดับสีเทาด้วยค่าระดับกั้นตายตัวสองค่า 20

2.5.2 การตัดแบ่งระดับสีเทาด้วยการขยายพื้นที่จุดภาพภายใต้ระดับกั้น 21

2.6 การทำหน้ากากภาพ 23

2.7 การตรวจสอบสมมาตร 23

บทที่ 3 ระบบการวิเคราะห์ภาพถ่ายสมอง MRI 25

3.1 โครงสร้างของระบบการวิเคราะห์ภาพถ่ายสมอง MRI 25

3.2 เทคนิคการตัดแบ่งภาพ 25

3.3 เทคนิคการแยกประเภทของวัตถุ 29

บทที่ 4 การตัดแบ่งองค์ประกอบของภาพถ่ายสมองจาก MRI 31

4.1 การแยกส่วนพื้นของภาพออกจากวัตถุ 31

4.2 การแยกสมองออกจากวัตถุนอกสมอง 34

4.3 การแยกเนื้อเยื่อสมอง 38

บทที่ 5 การชี้บอกเนื้อเยื่อผิดปกติ 41

5.1 ลักษณะเด่นที่ใช้ในการชี้บอกเนื้อเยื่อผิดปกติ 41

5.2 เทคนิคเชิงภูมิศาสตร์ที่ใช้ในการชี้บอกเนื้อเยื่อผิดปกติ 45

5.3 การชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ 46

บทที่ 6 การทดลอง 49

หน้า
บทที่ 7 สรุป 56
บรรณานุกรม 57

บทที่ 1 บทนำ

ในรายงานฉบับนี้จะอธิบายเทคนิคในการวิเคราะห์ภาพซึ่งจะทำการค้นหาสิ่งผิดปกติภายในสมองจากภาพถ่าย MRI เทคนิคนี้ถูกออกแบบมาเฉพาะเพื่อการวิเคราะห์ชุดของภาพถ่าย MRI ที่ประกอบด้วยภาพจำนวนหลายภาพ(multi sliced)และมีภาพถ่ายสองชนิดคือ PD-weighted และ T2-weighted โดยใช้เทคนิคนี้ผู้ใช้จะต้องเป็นผู้ชี้ว่าภาพใดในชุดของภาพถ่ายสมองที่มีโพลงหรือ lateral ventricle โตที่สุดก่อน หลังจากนั้นการวิเคราะห์จะดำเนินไปอย่างอัตโนมัติจนกระทั่งเสร็จสิ้นทุกภาพในชุดของภาพถ่ายสมอง ผลการวิเคราะห์ในแต่ละภาพจะแสดงด้วยแผนที่ของภาพสมองซึ่งจะประกอบด้วย เนื้อเยื่อของสมอง สิ่งผิดปกติ และ ของเหลวภายในสมอง

โดยทั่วไป การวิเคราะห์ภาพสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนใหญ่ๆคือ การตัดแบ่งวัตถุในภาพออกจากกันเป็นส่วนๆ หรือ segmentation และการชี้บอกชนิดของวัตถุสำหรับส่วนต่างๆที่ตัดออกจากกัน หรือ identification ในเทคนิคการวิเคราะห์ภาพตามปกติจะต้องมีการคัดเลือกลักษณะเด่นหรือ features ของวัตถุที่เราสนใจซึ่งประกอบอยู่ในภาพนั้นเพื่อช่วยในการชี้บอกชนิดของวัตถุ

1.1 การคัดเลือกลักษณะเด่น (Features Selection)

ในการวิเคราะห์ภาพถ่าย MRI ของสมอง เราจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติของสมองที่ปรากฏบนภาพถ่าย ภาพถ่ายที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สำหรับเทคนิคที่นำเสนอนี้เป็นภาพถ่ายในระนาบที่เรียกว่า transaxial plane ซึ่งในภาพถ่ายระดับคิ้วขึ้นไปจะเห็นภาพของเนื้อเยื่อสมองมีลักษณะค่อนข้างกลม มีกะโหลกและไขมันเป็นลักษณะวงแหวนล้อมรอบ ส่วนภาพในระดับต่ำกว่าคิ้วลงมารูปร่างของเนื้อเยื่อสมองจะค่อยๆเปลี่ยนไปและจะปรากฏอวัยวะอย่างอื่นด้านนอกของเนื้อเยื่อสมองอย่างเช่นลูกตาและจมูก นอกจากนี้ ในภาพถ่ายที่สูงกว่าระดับลูกตา ขนาดของเนื้อเยื่อสมองจะใหญ่กว่าอวัยวะอื่นมาก ในขณะที่ภาพถ่ายที่ต่ำกว่าลูกตา ขนาดของเนื้อเยื่อสมองจะเล็กลงและขนาดของอวัยวะอื่นบางอย่างจะโตขึ้น

ภายในพื้นที่ของสมอง จะประกอบด้วยเนื้อเยื่อสมองที่สำคัญสองชนิดคือ gray matter และ white matter รวมทั้งของเหลวภายในสมองหรือ CSF (cerebrospinal fluid) สำหรับ gray matter คือเนื้อเยื่อสมองส่วนนอกซึ่งจะปรากฏในภาพถ่ายอยู่ติดกับขอบของสมอง ในขณะที่ white matter คือเนื้อเยื่อสมองส่วนใน ส่วน CSF จะปรากฏอยู่ตามขอบของก้อนสมองเป็นพื้นที่แคบๆและบรรจุอยู่ในโพลงต่างๆหรือ ventricles ซึ่งอยู่ภายในก้อนสมอง ในบรรดาโพลงต่างๆ

ในก้อนสมอง จะมีโพลงที่ใหญ่ที่สุดอันหนึ่งเรียกว่า lateral ventricle ปรากฏอยู่ประมาณกลางพื้นที่สมองในระดับคิ้ว พื้นที่ของ CSF ภายใน lateral ventricle ตามปกติจะใหญ่กว่าพื้นที่ของ CSF ที่อยู่ตามขอบสมองมาก ภาพถ่ายบางภาพซึ่งตามปกติต่ำกว่าระดับคิ้ว ในพื้นที่ของเนื้อเยื่อสมองจะมีอวัยวะบางอย่างปรากฏเป็นคู่และโดยประมาณจะสมมาตรกันตามแนวแกนกลางของสมอง

คุณสมบัติของภาพถ่ายสมองที่กล่าวมาข้างต้นนั้น จะเกี่ยวข้องกับ ตำแหน่ง(location) ขนาด(size) และรูปร่าง(shape) ของวัตถุซึ่งเป็นลักษณะเด่นเชิงภูมิศาสตร์(geographical)และเชิงรูปร่าง(morphological)ที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพ MRI ในเทคนิคที่นำเสนอนี้

ลักษณะเด่นอีกอย่างหนึ่งซึ่งแสดงบทบาทสำคัญมากในการวิเคราะห์ภาพถ่าย MRI คือ ความเข้มหรือ intensity ซึ่งจะปรากฏเป็นระดับสีเทา ความเข้มซึ่งปรากฏบนภาพถ่าย MRI จะแทนคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีบางอย่างของเนื้อเยื่อต่างๆ การสร้างภาพ MRI ใช้พื้นฐานของคุณสมบัติทางนิวเคลียแม่เหล็กของธาตุต่างๆที่ประกอบอยู่ในเนื้อเยื่อ ในระหว่างนิวเคลียสต่างๆที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก นิวเคลียสของไฮโดรเจนหรือโปรตอนน่าสนใจมากที่สุดเพราะมีเป็นจำนวนมากและมีคุณสมบัติแม่เหล็กที่แรง นอกจากคุณสมบัติทางแม่เหล็กของนิวเคลียสเอง ลักษณะการเชื่อมต่อกันของนิวเคลียสก็มีอิทธิพลต่อภาพ MRI ภาพถ่าย MRI ต่างๆประกอบด้วยตัวแปรพื้นฐาน 3 อย่างซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากเครื่อง MRI แล้วแปลงเป็นคุณสมบัติของจุดภาพ(pixel)ในรูปของความเข้มของภาพ ตัวแปรพื้นฐานทั้งสามได้แก่ spin density (SD) หรือ proton density (PD), spin-lattice relaxation time (T1) และ spin-spin relaxation time (T2) สำหรับ PD จะเป็นตัวสะท้อนจำนวนของโปรตอนหรือองค์ประกอบที่เป็นน้ำของเนื้อเยื่อ ในขณะที่ T1 และ T2 สะท้อนสภาวะแวดล้อมโดยรอบโปรตอนเหล่านั้น ในทางปฏิบัติ ภาพ MRI ที่มีเฉพาะ PD หรือ T1 หรือ T2 อย่างบริสุทธิ์นั้นสร้างได้ยาก ตามปกติจะได้ภาพที่ผสมกันระหว่าง PD, T1 และT2 ซึ่งภาพเหล่านี้จะเรียกว่า weighted images ดังนั้นในทางคลีนิก ภาพที่ได้จะเป็น PD-weighted, T1-weighted และ T2-weighted ซึ่งก็คือภาพที่มีความเข้มได้รับอิทธิพลส่วนใหญ่มาจาก PD, T1 และT2 ตามลำดับ

ภาพถ่ายที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์นี้จะต้องประกอบด้วย PD-weighted และ T2-weighted ที่สร้างขึ้นมาพร้อมกันในกระบวนการของการถ่ายภาพ MRI ในภาพ PD-weighted ทั้ง gray matter, white matter และ CSF จะมีความเข้มที่ใกล้เคียงกันแต่ความเข้มเฉลี่ยของ white matter ต่ำกว่าของ CSF และความเข้มเฉลี่ยของ gray matter สูงกว่าของ CSF อย่างไรก็ตาม รอยช้ำของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติในภาพ PD-weighted จะมีความเข้มสูงกว่า gray matter, white matter และ CSF ในภาพ T2-weighted ความเข้มของ CSF สูงกว่าของ gray matter และ white matter แต่จะใกล้เคียงกับรอยช้ำของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ ตามปกติความเข้มของ CSF

ในภาพถ่าย T2-weighted จะต่ำกว่าความเข้มของ CSF ในภาพถ่าย PD-weighted เล็กน้อย แต่ความเข้มของ gray matter และ white matter ในภาพถ่าย T2-weighted จะต่ำกว่าความเข้มของ gray matter และ white matter ในภาพถ่าย PD-weighted เป็นอย่างมาก

โดยทั่วไป ทั้งภาพถ่าย PD-weighted และ T2-weighted เป็นที่ต้องการในทางคลีนิก เพราะทั้งสองจะให้ข้อมูลที่แตกต่างกัน ภาพถ่าย PD-weighted จะให้ความแตกต่างของความเข้มของเนื้อเยื่อต่างชนิดกันของสมองปกติได้ดีมาก แต่ความแตกต่างของความเข้มระหว่างเนื้อเยื่อปกติกับเนื้อเยื่อที่เป็นโรคน้อยมาก ในขณะที่ภาพถ่าย T2-weighted ให้ความแตกต่างระหว่างเนื้อเยื่อปกติกับเนื้อเยื่อที่เป็นโรคได้ดีมาก แต่ให้ความแตกต่างระหว่างเนื้อเยื่อปกติต่างชนิดกันน้อย ดังนั้นตามปกติภาพถ่าย PD-weighted ใช้สำหรับแสดงสรีระที่ถูกต้องและภาพถ่าย T2-weighted ใช้แสดงสรีระที่เป็นโรค ถึงแม้ว่าเนื้อเยื่อที่เป็นโรคและเนื้อเนื่อแบบเดียวกันที่ปกติมีความแตกต่างกันอย่างมากในภาพถ่าย T2-weighted การแยกแยะประเภทหรือระดับของเนื้องอกยังไม่สามารถทำได้ เพราะเนื้อเยื่อที่เป็นโรคบางอย่างที่แตกต่างกันอาจมีความเข้มที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงกันในภาพถ่าย T2-weighted เพราะฉะนั้น ในการชี้บอกชนิดของเนื้อเยื่อในเทคนิคที่นำเสนอนี้จึงไม่มีการแยกประเภทของเนื้องอกหรือเนื้อเยื่อที่เป็นโรค

นอกจากลักษณะเด่นของความเข้มของภาพถ่าย PD-weighted และ T2-weighted ดังได้กล่าวไปแล้ว ลักษณะเด่นของความเข้มอื่นๆที่สำคัญสามารถหาได้โดยการสร้างภาพขึ้นมาใหม่จากการนำค่าความเข้มของภาพถ่าย T2-weighted ลบออกจากความเข้มของภาพถ่าย PD-weighted ภาพที่ได้นี้อาจเรียกว่า BR-density เนื่องจากการกระจายของความเข้มของเนื้อเยื่อสมองในการพลอตอิสโตแกรม(histogram)เป็นแบบปกติ(normal) ในภาพนี้ทั้ง gray matter และ white matter มีความเข้มสูงกว่าของ CSF มาก ในขณะที่เนื้อเยื่อที่เป็นโรคมีความเข้มอยู่ระหว่าง CSF กับ gray matter ดังนั้นภาพนี้จึงสามารถใช้แยก CSF ออกจากเนื้อเยื่อสมองได้ง่ายกว่าภาพอื่น ภาพ BR-density อาจพิจารณาว่าคล้ายกับภาพถ่าย T1-weighted ได้ เพราะมันมีความเข้มของ gray matter และ white matter สูงกว่าของ CSF

1.2 การตัดแบ่งวัตถุในภาพออกจากกันเป็นส่วน ๆ (Image Segmentation)

เทคนิคการวิเคราะห์ภาพที่นำเสนอนี้ได้ถูกออกแบบให้ตัดแบ่งภาพออกเป็นวัตถุที่น่าสนใจและวัตถุที่ไม่น่าสนใจ แล้วจึงลบวัตถุที่ไม่น่าสนใจออกจากภาพ การตัดแบ่งวัตถุในภาพก็จะดำเนินไปเป็นลำดับ ในแต่ละขั้นตอนวัตถุที่ไม่น่าสนใจก็จะถูกลบออกจากภาพ เทคนิคที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนจะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับคุณสมบัติของวัตถุในภาพ

ฉากหลังของภาพจะเป็นวัตถุที่ไม่น่าสนใจและถูกลบออกจากภาพเป็นอันดับแรก ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการตัดระดับความเข้ม(threshold)ที่ออกแบบขึ้นเฉพาะสำหรับงานนี้อาจเรียกเทคนิคนี้ว่า *การตัดระดับความเข้มแบบขยายจุดภาพภายใต้ระดับกั้น*(pixel growing under threshold) ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า PGUT เทคนิคนี้สามารถลบฉากหลังออกจากภาพได้โดยยังคงสามารถรักษาบางส่วนของเนื้อเยื่อสมองที่มีความเข้มต่ำกว่าระดับกั้นไว้ได้ เมื่อฉากหลังถูกลบออกจากภาพไปแล้ว วัตถุที่ยังคงเหลือในภาพจะประกอบด้วยเนื้อเยื่อสมองและอวัยวะบางอย่างที่อยู่ภายนอกก้อนสมอง

อวัยวะที่อยู่ภายนอกก้อนสมองเป็นวัตถุที่ไม่น่าสนใจซึ่งจะต้องถูกลบออกในขั้นตอนถัดไป เนื่องจากรูปร่างและขนาดของก้อนสมองและอวัยวะที่ไม่น่าสนใจภายนอกก้อนสมองมีการเปลี่ยนแปลงจากภาพหนึ่งไปยังอีกภาพหนึ่งที่อยู่ติดกัน ในการลบอวัยวะที่ไม่น่าสนใจออกจากภาพในขั้นตอนนี้จึงได้ออกแบบเทคนิคใหม่ขึ้นสองอย่าง เทคนิคแรกถูกออกแบบขึ้นเพื่อใช้กับภาพในระดับที่อยู่สูงกว่าระดับคิ้ว ซึ่งภาพเหล่านี้จะมีพื้นที่ของเนื้อเยื่อสมองขนาดใหญ่มากเมื่อเปรียบเทียบกับอวัยวะที่ไม่น่าสนใจภายนอกก้อนสมอง ดังนั้นอวัยวะที่ไม่น่าสนใจเหล่านี้จึงสามารถแยกออกจากเนื้อเยื่อสมองได้โดยใช้ตัวกรองเชิงรูปร่างหรือ morphological filter เทคนิคที่สองได้ถูกออกแบบขึ้นสำหรับภาพถ่ายที่อยู่ต่ำกว่าระดับคิ้ว ในภาพถ่ายเหล่านี้พื้นที่ของเนื้อเยื่อสมองจะมีขนาดเล็กลงและอวัยวะที่อยู่นอกสมองจะโตขึ้นและเห็นมีความซับซ้อนขึ้น นอกจากการใช้ morphological filter พื้นที่ของเนื้อเยื่อสมองที่เหลือจากการแยกอวัยวะที่ไม่น่าสนใจในภาพที่อยู่ติดกันสามารถนำมาใช้ในการชี้ตำแหน่งของเนื้อเนื่อสมองในภาพที่กำลังอยู่ในขั้นตอนการแยกอวัยวะที่ไม่น่าสนใจได้ morphological filter ที่ใช้ในเทคนิคการวิเคราะห์ภาพนี้ถูกออกแบบมาพิเศษเพื่อแยกวัตถุที่มีขนาดแตกต่างกันโดยยังคงรักษารูปร่างของวัตถุเดิมไว้ได้ เทคนิคนี้ใช้หลักการของการหดตัวเชิงรูปร่างของวัตถุหรือ morphological erosion ตามด้วยการขยายตัวของจุดภาพภายในกรอบของรูปร่างเดิมของวัตถุ ดังนั้นจึงอาจเรียกเทคนิคนี้ว่า *ตัวกรองแบบขยายจุดภาพภายในกรอบ* หรือ pixel-growing filter พื้นที่ของสมองที่เหลือจากการแยกอวัยวีที่ไม่น่าสนใจออกแล้วในขั้นตอนนี้ประกอบด้วย gray matter, white matter, CSF และเนื้อเยื่ออื่นๆซึ่งจะต้องแยกออกในขั้นตอนต่อไป

วัตถุที่จะต้องถูกแยกออกจากภาพในขั้นตอนต่อไปคือ gray matter และ white matter ซึ่งสามารถทำได้โดยการตัดแบ่งระดับความเข้ม(threshold)ในภาพ T2-weighted เนื่องจาก gray matter และ white matter มีความเข้มต่ำกว่าวัตถุอื่นๆที่อยู่ในพื้นที่สมอง และความเข้มของเนื้อเยื่อสมองทั้งสองจะรวมกันเป็นการกระจายแบบปกติโดยประมาณในการพลอตฮิสโตแกรม ระดับของการตัดแบ่งความเข้มจึงสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยและการเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายของความเข้ม วัตถุที่เหลือจากการตัดแบ่งระดับความเข้มนี้จะประกอบด้วย

CSF และเนื้อเยื่ออย่างอื่นที่ไม่ใช่เนื้อเยื่อสมองปกติ ถ้ามีเนื้อเยื่อที่ผิดปกติปรากฏในภาพก็จะเหลือไว้ในภาพนี้

กระบวนการตัดแบ่งวัตถุในภาพออกเป็นส่วนๆจบลงในขั้นตอนนี้ และวัตถุที่น่าสนใจที่เหลือจะถูกนำไปเข้ากระบวนการชี้บอกชนิดของวัตถุหรือ identification เพื่อค้นหาเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ การตัดแบ่งวัตถุในภาพจะต้องทำจนครบทุกภาพก่อนที่จะเข้ากระบวนการชี้บอกชนิดของวัตถุได้ ทั้งนี้เนื่องจาก ช่องหน้าต่างสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นกรอบที่พอดีกับพื้นที่สมองจะต้องถูกสร้างขึ้นในระหว่างการตัดแบ่งวัตถุในภาพและจะต้องนำไปใช้ในกระบวนการชี้บอกชนิดของวัตถุ

1.3 การชี้บอกชนิดของวัตถุ (Identification)

พื้นที่ที่เหลือภายในสมองจากกระบวนการตัดแบ่งวัตถุในภาพประกอบด้วย CSF เนื้อเยื่อที่ปกติ และเนื้อเยื่ออื่นๆ พื้นที่เหล่านี้อาจเรียกว่า *พื้นที่น่าสนใจ*(areas of interest) ส่วนของ CSF ในพื้นที่น่าสนใจนี้สามารถแยกออกได้โดยใช้ลักษณะเด่นทางด้านความเข้ม ดังได้กล่าวไว้แล้วว่า ในภาพ PD-weighted ความเข้มของ CSF จะต่ำกว่าของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ ดังนั้นถ้าเราสามารถหาระดับตัดแบ่งความเข้มที่เหมาะสมได้ ก็จะสามารถแยก CSF ออกได้ อย่างไรก็ตาม ในภาพ PD-weighted ทั้ง gray matter, white matter และ CSF มีความเข้มที่ใกล้เคียงกันมาก และบางส่วนของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติก็มีความเข้มใกล้เคียงกับ gray matter ในการกระจายความเข้มของภาพ PD-weighted บนการพลอตฮิสโตแกรมของพื้นที่น่าสนใจนี้ การกระจายความเข้มของวัตถุทั้งหมดเกือบจะรวมก้อนกันเป็นแบบเดียว ดังนั้นการหาระดับแบ่งความเข้มจากภาพ PD-weighted โดยตรงจึงเป็นไปไม่ได้ ปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยการนำตัวอย่างความเข้มของ CSF ที่อยู่ภายในบริเวณโพรงกลางสมอง(lateral ventricle)มาหาค่าเฉลี่ยและการเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายความเข้ม ซึ่งจะทำให้สามารถกำหนดระดับแบ่งความเข้มได้จากข้อมูลเชิงสถิติทั้งสอง การนำตัวอย่างความเข้มของ CSF จากโพรงกลางสมองจะต้องทำการแยกพื้นที่ของโพรงกลางสมองออกจากส่วนอื่นก่อน แต่ปรากฏว่าไม่สามารถทำบนภาพ PD-weighted และ T2-weighted ได้เนื่องจากบนภาพ PD-weighted ความเข้มของ CSF ใกล้เคียงกับของ gray matter และ white matter ดังได้กล่าวไว้แล้ว และบนภาพ T2-weighted ถ้ามีเนื้อเยื่อที่ผิดปกติใดๆปรากฏติดกับโพรงกลางสมอง มันจะไม่สามารถแยกออกจากโพรงสมองได้เพราะทั้งเนื้อเยื่อที่ผิดปกติและ CSF มีความเข้มใกล้เคียงกัน ในการแยกโพรงกลางสมองเราใช้ภาพ BR-density ที่เคยกล่าวไปแล้ว ในภาพนี้ CSF มีความเข้มต่ำกว่า gray matter และ white matter มากและความเข้มของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติจะแตกต่างกับของ CSF เพราะฉะนั้น CSF จึงสามารถแยกออกจากวัตถุอื่นๆโดยการตัดแบ่งระดับความเข้มบนภาพ

BR-density และ CSF ที่อยู่ภายในโพรงกลางสมองสามารถแยกออกจาก CSF ในส่วนอื่นได้ เนื่องจากมันมีขนาดที่ใหญ่กว่าและอยู่ประมาณกึ่งกลางสมอง เมื่อ CSF ในโพรงกลางสมองถูกแยกออกมาแล้ว เราสามารถใช้รูปร่างของ CSF ที่โพรงกลางสมองนี้เป็นกรอบในการเก็บตัวอย่างความเข้มของ CSF บนภาพ PD-weighted ได้ ในที่สุดก็จะสามารถกำหนดระดับแบ่งความเข้มสำหรับแยก CSF ออกจากวัตถุอื่นในพื้นที่น่าสนใจได้

การแยกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติออกจากเนื้อเยื่อสมองภายในพื้นที่น่าสนใจที่เหลือโดยการใช้ลักษณะเด่นทางด้านความเข้มไม่สามารถทำได้เนื่องจากมันมีความเข้มที่ใกล้เคียงกันทั้งบนภาพ PD-weighted และ T2-weighted อย่างไรก็ตาม วัตถุที่เป็นเนื้อเยื่อสมองหรืออวัยวะปกติจะปรากฏเป็นคู่และโดยประมาณสมมาตรกันบนเส้นแกนกลางสมอง(sagittal line) ดังนั้นเราสามารถใช้ลักษณะเด่นเหล่านี้ในการแยกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติกับเนื้อเยื่อปกติออกจากกัน ในการทำ จะต้องแบ่งพื้นที่สมองออกเป็นพื้นที่เล็กๆโดยใช้กรอบหน้าต่างที่พอดีกับพื้นที่สมองในทุกภาพดังที่เคยกล่าวไว้แล้ว การแบ่งพื้นที่จะแตกต่างกันในแต่ละภาพขึ้นกับตำแหน่งของวัตถุที่ปรากฏบนพื้นที่สมอง ในกรณีนี้ ภาพถ่ายทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็นสามกลุ่มและการแบ่งพื้นที่สมองในแต่ละกลุ่มภาพจะแตกต่างจากกลุ่มภาพอื่น วัตถุต่างๆในภาพที่ตรวจสอบได้ว่าปรากฏเป็นคู่และสมมาตรกันโดยประมาณบนเส้นแกนกลางสมองจะถูกลบออกจากภาพเพราะถือว่าเป็นวัตถุปกติ ในที่สุดวัตถุที่เหลือในพื้นที่น่าสนใจของภาพก็จะถูกกำหนดว่าเป็นเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ

มีปัญหาอย่างหนึ่งในการชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติที่มีสาเหตุมาจากขนาดของจุดภาพและความหนาของแผ่นชิ้นสมองที่สร้างเป็นภาพ เนื่องจากขนาดของจุดภาพและความหนาของชิ้นสมองที่สร้างเป็นภาพจะแทนปริมาตรที่บรรจุเนื้อเยื่อ ถ้าปริมาตรมีขนาดใหญ่มันอาจประกอบด้วยเนื้อเยื่อหลายชนิด ผลที่ตามมาก็คือ ความเข้มของจุดภาพจะแทนคุณสมบัติเฉลี่ยของเนื้อเยื่อต่างๆที่อยู่ภายในปริมาตรนั้นและการชี้บอกชนิดของเนื้อเยื่ออาจผิดพลาดได้ กรณีนี้เรียกว่า partial volume effect ปัญหานี้อาจแก้ได้บ้างโดยการใช้ภาพที่อยู่ข้างเคียง ถ้าเราใช้ภาพสามภาพที่อยู่ติดกันโดยสมมุติว่าภาพที่อยู่ตรงกลางเป็นภาพที่กำลังทำการชี้บอกชนิดของวัตถุเราจะเห็นได้ว่าขนาดของสมองและโพรงต่างๆของภาพทั้งสามจะแตกต่างกัน ถ้าเรานำเอาเฉพาะส่วนของสมองที่ปรากฏในภาพทั้งสามมาทำการชี้บอกชนิดของวัตถุ บางส่วนของ partial volume effect จะสามารถแยกออกไปได้ เพราะฉะนั้น ถ้าเนื้อเยื่อที่ถูกชี้บอกว่าผิดปกติปรากฏในพื้นที่ของสมองที่กำลังเปลี่ยนแปลงในระหว่างภาพที่อยู่ติดกัน ความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้

บางส่วนของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติที่มีความเข้มใกล้เคียงกับของ gray matter บนภาพ PD-weighted อาจถูกลบออกในขั้นตอนของการแยก CSF ได้ ดังนั้นส่วนที่หายไปนี้ควรจะได้กลับคืนมาและรวมเข้ากับเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ ซึ่งสามารถทำได้โดยการตัดแบ่งระดับความเข้มบนภาพ

PD-weighted ซ้ำอีกครั้งหนึ่ง แต่ในกรณีนี้ ระดับของการแบ่งความเข้มจะถูกกำหนดให้ต่ำกว่าครั้งก่อนเพื่อให้สามารถนำส่วนของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติซึ่งมีความเข้มใกล้เคียงกับบางส่วนของ gray matter กลับคืนมาได้หมด ในภาพเอ้าท์พุทของการตัดแบ่งระดับความเข้ม ถ้าพื้นที่ใดประกอบด้วยบางส่วนของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ พื้นที่ทั้งหมดนั้นจะถูกกำหนดว่าเป็นเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ การใช้เทคนิคนี้ มีบางส่วนของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติได้คืนมาเท่านั้น เนื่องจากมีขีดจำกัดในการตัดแบ่งระดับความเข้มบนภาพ PD-weighted ดังได้กล่าวไว้แล้วว่า วัตถุทุกชนิดในพื้นที่สมองของภาพ PD-weighted มีความเข้มใกล้เคียงกันมาก ถ้าระดับแบ่งความเข้มถูกกำหนดต่ำเกินไป พื้นที่บางส่วนของเนื้อเยื่อปกติจะถูกเชื่อมเข้ากับเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ แต่ถ้าระดับแบ่งความเข้มถูกกำหนดสูงเกินไป มีเพียงบางส่วนของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติเท่านั้นที่เอากลับคืนมาได้ จะต้องทำอีกกระบวนการหนึ่งเพื่อเอาส่วนของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติกลับคืนมา กระบวนการนี้ใช้ประโยชน์จากพื้นที่น่าสนใจที่ได้จากกระบวนการตัดแบ่งวัตถุในภาพมาพิจารณาขนาดของพื้นที่ของวัตถุ ในกรณีนี้ พื้นที่น่าสนใจที่มีขนาดใหญ่ซึ่งประกอบด้วยเนื้อเยื่อที่ถูกชี้บอกว่าไม่ปกติไปแล้วก็จะถูกชี้บอกซ้ำอีกว่าเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ

บทที่ 2 การพัฒนาเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายสมองจาก MRI

2.1 ระบบการทำงานพื้นฐาน

สิ่งแรกที่จะต้องเข้าใจเกี่ยวกับการพัฒนาเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายสมองจาก MRI คือโครงสร้างของระบบการทำงานพื้นฐานที่ถูกออกแบบมาสำหรับงานนี้ ระบบการทำงานนี้ประกอบด้วย*ระบบไฟล์เก็บภาพ*ซึ่งจะเก็บภาพอินพุทและเอ้าท์พุทในการปฏิบัติการ แต่ละไฟล์จะบอกตำแหน่งด้วยตัวเลขและภาพแต่ละภาพจะถูกดึงออกจากที่เก็บโดยการระบุตัวเลข ในทางปฏิบัติใช้ 18 ไฟล์ก็เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ เพื่อความสดวก เราสามารถแทนหมายเลขของไฟล์ด้วยตัวอักษรดังแสดงด้วยคำสั่งในรูปแบบของภาษ Turbo-C ดังต่อไปนี้

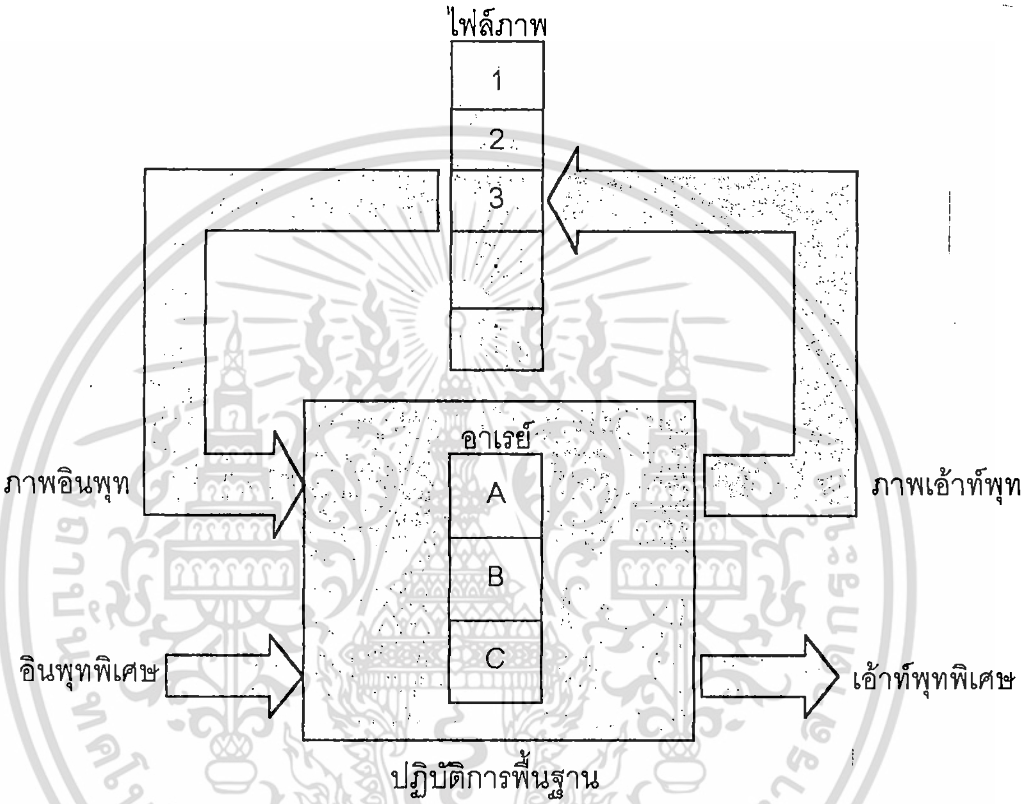
```
#define PDW   8    /*PD-weighted image*/
#define T2W   9    /*T2-weighted image*/
#define BRD   10   /*BR-density image*/
#define BR    11   /*Binary image of the brain area*/
#define BRx   12   /*Binary image of the brain area of the closed analysed slice*/
#define CSF   13   /*Binary image of CSF area*/
#define AOI   14   /*Binary image of area of interest*/
#define OOI   15   /*Binary image of objects of interest*/
#define VEN   16   /*Binary image of lateral ventricle area*/
#define ABN   17   /*Binary image of abnormality*/
#define MAP   18   /*Image of the classified map*/
```

การแทนตัวเลขตั้งแต่ 8 ถึง 18 ด้วยตัวอักษรเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ตลอดกระบวนการวิเคราะห์ สำหรับไฟล์หมายเลข 1 ถึง 7 จะใช้หมายเลขโดยตรง ในการแสดงโฟลว์ชาร์ทของระบบในบทนี้ แต่ละไฟล์จะถูกแทนด้วยหมายเลขหรือตัวอักษรที่อยู่ในวงกลมดังตัวอย่างต่อไปนี้

① ② ③ (PDW) (T2W) (BRD) ……………………………………

นอกจากไฟล์ภาพ ยังมีอาเรย์เก็บภาพ(image array)จำนวนสามชุด ซึ่งแทนด้วยตัวอักษร A, B และ C สำหรับชุดที่ 0, 1 และ 2 ตามลำดับ อาเรย์เก็บภาพทั้งสามจะใช้สำหรับปฏิบัติการพื้นฐานอย่างเช่นปฏิบัติการทางลอจิก(logical operation)และปฏิบัติการทางมอร์โฟโลยี(morphological operation)เป็นต้น ในปฏิบัติการแต่ละอย่าง ภาพอินพุทและภาพเอ้าท์พุทสามารถใส่ลงในอาเรย์ใดก็ได้แล้วแต่ความสดวก ปฏิบัติการพื้นฐานบางอย่างมีภาพอินพุทจำนวนสอง

ภาพและปฏิบัติการพื้นฐานบางอย่างมีภาพอินพุทเพียงภาพเดียว แต่ไม่ว่าจะเป็นปฏิบัติการแบบใด จะมีภาพเอ้าท์พุทเพียงภาพเดียว ปฏิบัติการพื้นฐานบางอย่างอาจมีอินพุทพิเศษซึ่งมิใช่ภาพอย่างเช่นค่าของระดับการตัดแบ่งความเข้มสำหรับการตัดแบ่งความเข้ม และปฏิบัติการพื้นฐานบางอย่างอาจมีเอ้าท์พุทพิเศษที่มิใช่ภาพ แผนผังโครงสร้างระบบปฏิบัติการพื้นฐานทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนผังโครงสร้างระบบปฏิบัติการพื้นฐานทั่วไป

2.2 การสร้างปฏิบัติการทางลอจิก

ปฏิบัติการทางลอจิกนับได้ว่าเป็นปฏิบัติการที่พื้นฐานที่สุดและที่ใช้ในระบบนี้ได้แก่ AND, OR และ XOR ปฏิบัติการทั้งสามอาจพิจารณาได้ว่าเป็น intersection, union และ symmetric difference ในทฤษฎีเซ็ทตามลำดับ มันเป็นปฏิบัติการที่จัดการกับภาพอินพุทสองภาพและให้ภาพเอ้าท์พุทหนึ่งภาพที่แตกต่างไปจากภาพอินพุททั้งสอง นอกจากนั้น ปฏิบัติการนี้ได้ถูกออกแบบให้มีเอ้าท์พุทพิเศษหนึ่งค่าที่ไม่ใช่ภาพค่าที่ให้ออกมาจะเป็น 0 ถ้าไม่มีจุดภาพเหลืออยู่ในภาพเอ้าท์พุทหรือเป็นภาพว่างเปล่า นอกเหนือจากนั้นจะให้ค่า 1 ออกมา

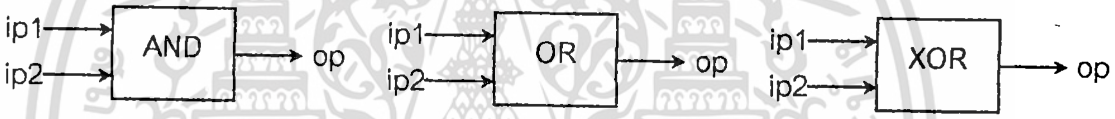
ปฏิบัติการ AND สามารถสร้างขึ้นเป็นภาษ Turbo-C ดังนี้

```
int     AND(int ip1,int ip2,int op)
{
        int A=0,B=1,C=2,x,y,z;

        retrieve_image(ip1,A);
        retrieve_image(ip2,B);
        clear_image_array(C);
        z=0;
        for(x=0;x<256;x++) for(y=0;y<256;y++)
                if(image[A][y][x]==200 && image[B][y][x]==200)
                {image[C][y][x]=200;z=1;}
        store_image(C,op);
        if(z==1) return(1);
        else return(0);
}
```

ปฏิบัติการ OR และ XOR สามารถสร้างขึ้นโดยเลียนแบบปฏิบัติการ AND ตามลำดับดังต่อไปนี้

```
int     OR(int ip1,int ip2,int op)
{
        int A=0,B=1,C=2,x,y,z;

        retrieve_image(ip1,A);
        retrieve_image(ip2,B);
        clear_image_array(C);
        z=0;
        for(x=0;x<256;x++) for(y=0;y<256;y++)
                if(image[A][y][x]==200 || image[B][y][x]==200)
                {image[C][y][x]=200;z=1;}
        store_image(C,op);
        if(z==1) return(1);
        else return(0);
}
int     XOR(int ip1,int ip2,int op)
{
        int A=0,B=1,C=2,x,y,z;
        retrieve_image(ip1,A);
        retrieve_image(ip2,B);
        clear_image_array(C);
        z=0;
        for(x=0;x<256;x++) for(y=0;y<256;y++)
                if((image[A][y][x]==200 && image[B][y][x]==0) ||
                (image[A][y][x]==0 && image[B][y][x]==200))
                {image[C][y][x]=200;z=1;}
        store_image(C,op);
        if(z==1) return(1);
        else return(0);
}
```

ปฏิบัติการ AND, OR และ XOR สามารถแทนด้วยบล็อกการทำงานดังนี้

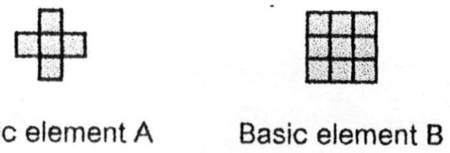


นอกจากการใช้ปฏิบัติการทางลอจิกโดยตรงแล้ว ปฏิบัติการทางลอจิกเหล่านี้ยังสามารถใช้ในการตรวจสอบภาพว่าเป็นภาพว่างเปล่าหรือเป็นภาพที่มีจุดภาพอยู่ได้ โดยการใช้ภาพที่จะตรวจสอบเป็นภาพอินพุททั้งสองแล้วใช้ปฏิบัติการทางลอจิกใดก็ได้หาค่าเอ้าท์พุทพิเศษออกมา ถ้าได้เป็น 0 แสดงว่าเป็นภาพว่างเปล่า แต่ถ้าเป็น 1 แสดงว่าเป็นภาพที่มีจุดภาพ

2.3 การสร้างปฏิบัติการทางมอร์โฟโลยี

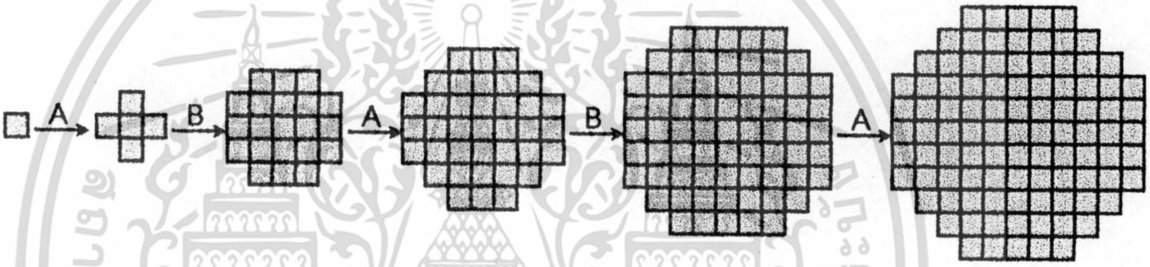
ในขั้นตอนต่างๆของการวิเคราะห์ภาพ ปฏิบัติการทางมอร์โฟโลยีต่างๆของ dilation, erosion, opening และ closing อาจจะใช้ structure element ที่มีขนาดแตกต่างกันไปซึ่งในงานนี้ได้กำหนดให้มีลักษณะเป็นแบบเดียวกันคือเป็นจานแปดเหลี่ยมที่มีจุดเริ่มต้นที่กึ่งกลาง ปฏิบัติการทางมอร์โฟโลยีที่ใช้ structure element เป็นจานแปดเหลี่ยมทำได้ง่ายกว่าแบบจานกลมแต่ให้ความแม่นยำในการวัดขนาดของวัตถุไม่แตกต่างกันมากนัก การสร้างปฏิบัติการของ dilation และ erosion ด้วยแผ่นจานแปดเหลี่ยมที่มีขนาดต่างๆ จะต้องใช้ structuring element พื้นฐานสองอย่างคือ ชนิดที่เป็นเครื่องหมายบวกขนาด 3x3 หรือแบบ A กับชนิดที่เป็นสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 3x3 หรือแบบ B ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แล้วใช้เทคนิคของการทำงานแบบวนรอบ(iteration) กับ structuring element พื้นฐานแต่ละตัว

เอกสารนี้เป็น ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



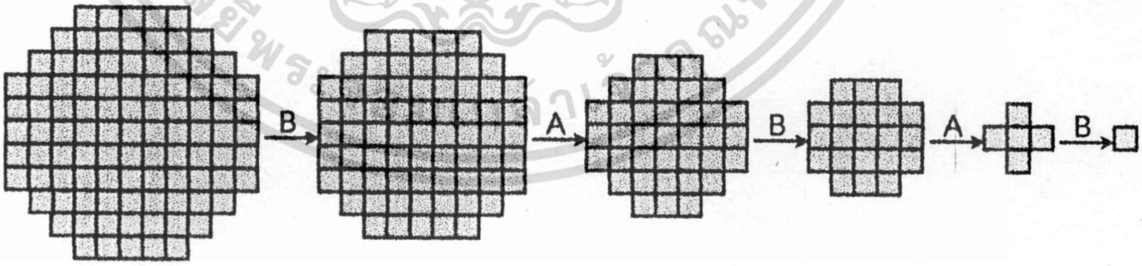
รูปที่ 2.2 Structuring element พื้นฐานสองแบบ
ที่ใช้ในการสร้าง structuring element แบบจานแปดเหลี่ยม

ขนาดของ structuring element แบบจานแปดเหลี่ยมที่ใช้ในปฏิบัติการทางมอร์โฟโลยีนี้ กำหนดได้ด้วยจำนวนรอบของการทำงานวนรอบ ในการทำงาน structuring element พื้นฐานทั้งสองจะถูกนำมาใช้สลับกันในแต่ละรอบของการทำงาน เพื่อความเข้าใจในการทำงานและการได้ structuring element แบบจานแปดเหลี่ยม จงพิจารณารูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงปฏิบัติการ dilation ของการทำงานในรอบต่างๆโดยเริ่มต้นจากจุดภาพเดียว

สำหรับปฏิบัติการ erosion แสดงให้เห็นตัวอย่างในรูปที่ 2.4 โดยใช้วัตถุตัวอย่างเป็นจานแปดเหลี่ยม เมื่อทำปฏิบัติการไปเรื่อยๆ ในที่สุดวัตถุจะหดตัวหายไปหมด



รูปที่ 2.4 แสดงปฏิบัติการ erosion โดยใช้วัตถุรูปจานแปดเหลี่ยมเป็นตัวอย่าง

โดยใช้เทคนิคนี้ในปฏิบัติการของ dilation และ erosion ขนาดของ structuring element ที่มีผลต่อปฏิบัติการสามารถหาได้จาก 2N+1 โดยที่ N คือจำนวนรอบของการทำงานซึ่งอาจเรียกว่า disc number หรือ disc size ของปฏิบัติการ

การสร้างปฏิบัติการของ dilation, erosion, opening และ closing จะพิจารณา structuring element ว่าเป็นช่องหน้าต่าง(window)ที่กวาดไปบนเส้นสแกนของภาพจากมุมบนซ้ายไปสิ้นสุดที่มุมล่างขวา structuring element จะทำตัวเหมือนกับเป็นช่องที่กวาดหาจุดภาพที่ตรงกับเงื่อนไขของปฏิบัติการ

การสร้างปฏิบัติการ dilation ในงานนี้สามารถเขียนเป็นภาษา Turbo-C ได้ดังนี้

```
void    DILATE(int disc_no, int ip, int op)
{
        int A=0,B=1,a,x,y,z,N;

        clear_image_array(A);
        retrieve_image(ip,B);
        for(N=0;N<disc_no;N++)
        {
                a=(N+2)%2;
                if(a==0)
                {
                        for(x=0;x<256;x++) for(y=0;y<256;y++)
                        {
                                if(image[B][x][y]==0)
                                {
                                        z=0;
                                                if(image[B][x-1][y]==200) z=1;
                                        else    if(image[B][x+1][y]==200) z=1;
                                        else    if(image[B][x][y-1]==200) z=1;
                                        else    if(image[B][x][y+1]==200) z=1;
                                        if(z==1) image[A][x][y]=200;
                                        else    image[A][x][y]=0;
                                }
                                else image[A][x][y]=200;
                        }
                }
                else if(a==1)
                {
                        for(x=0;x<256;x++) for(y=0;y<256;y++)
```

```
            {
                if(image[A][x][y]==0)
                {
                    z=0;
                        if(image[A][x-1][y]==200) z=1;
                    else    if(image[A][x+1][y]==200) z=1;
                    else    if(image[A][x][y-1]==200) z=1;
                    else    if(image[A][x][y+1]==200) z=1;
                    else    if(image[A][x-1][y-1]==200) z=1;
                    else    if(image[A][x+1][y-1]==200) z=1;
                    else    if(image[A][x-1][y+1]==200) z=1;
                    else    if(image[A][x+1][y+1]==200) z=1;
                    if(z==1) image[B][x][y]=200;
                    else    image[B][x][y]=0;
                }
                else image[B][x][y]=200;
            }
        }
    }
    if(a==0) store_image(A,op);
    else store_image(B,op);
}
```

การสร้างปฏิบัติการ erosion จะซับซ้อนกว่า dilation เล็กน้อย เนื่องจากจะต้องมีการตัดสินใจว่าควรใช้ structuring element พื้นฐานแบบใดในรอบวนที่เป็นเลขคี่และเลขคู่ ซึ่งสามารถเขียนเป็นภาษา Turbo-C ได้ดังนี้

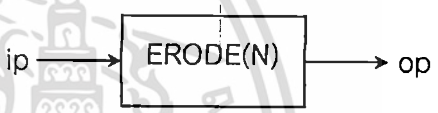
```
void    ERODE(int disc_no, int ip, int op)
{
    int A=0,B=1,a,n,x,y,z,N;

    if((disc_no+2)%2==1)
            {clear_image_array(A);retrieve_image(ip,B);n=0}
    else    {clear_image_array(B);retrieve_image(ip,A);n=1}
```

```
for(N=0;N<disc_no;N++)
{
        a=(N+n+2)%2;
        if(a==0)
        {
                for(x=0;x<256;x++) for(y=0;y<256;y++)
                {
                        if(image[B][x][y]==0)
                        {
                                z=0;
                                        if(image[B][x-1][y]==0) z=1;
                                else    if(image[B][x+1][y]==0) z=1;
                                else    if(image[B][x][y-1]==0) z=1;
                                else    if(image[B][x][y+1]==0) z=1;
                                if(z==1) image[A][x][y]=0;
                                else    image[A][x][y]=200;
                        }
                        else image[A][x][y]=0;
                }
        }
        else if(a==1)
        {
                for(x=0;x<256;x++) for(y=0;y<256;y++)
                {
                        if(image[B][x][y]==200)
                        {
                                z=0;
                                        if(image[A][x-1][y]==0) z=1;
                                else    if(image[A][x+1][y]==0) z=1;
                                else    if(image[A][x][y-1]==0) z=1;
                                else    if(image[A][x][y+1]==0) z=1;
                                else    if(image[A][x-1][y-1]==0) z=1;
                                else    if(image[A][x+1][y-1]==0) z=1;
                                else    if(image[A][x-1][y+1]==0) z=1;
                                else    if(image[A][x+1][y+1]==0) z=1;
```

```
                    if(z==1) image[B][x][y]=0;
                    else     image[B][x][y]=200;
                }
                else image[B][x][y]=0;
            }
        }
    }
    if(a==0) store_image(A,op);
    else store_image(B,op);
}
```

ปฏิบัติการของ dilation และ erosion สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ที่เป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้

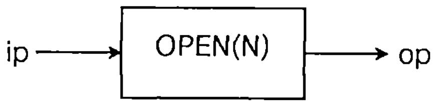
ip
DILATE(N)
op

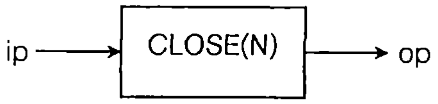


การสร้างปฏิบัติการ opening และ closing สามารถทำได้โดยใช้ปฏิบัติการ dilation และ erosion มารวมกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นภาษา Turbo-C ได้ดังนี้

```
void    OPEN(int disc_no, int ip, int op)
{
        ERODE(disc_no,ip,op);
        DILATE(disc_no,op,op);
}
void    CLOSE(int disc_no, int ip, int op)
{
        DILATE(disc_no,ip,op);
        ERODE(disc_no,op,op);
}
```

ปฏิบัติการของ opening และ closing สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ที่เป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้





สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.4 การกรองแบบขยายจุดภาพภายในกรอบ

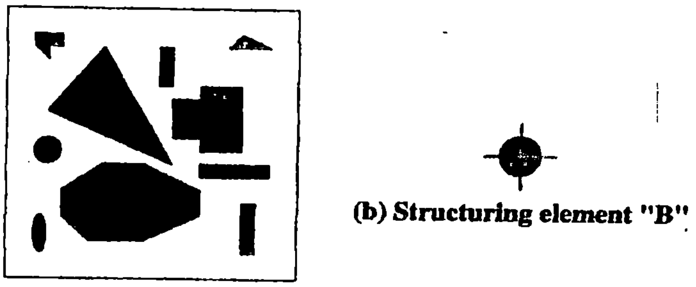
ปฏิบัติการ opening สามารถนำมาใช้ในการแยกวัตถุที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันได้โดยกำหนด structuring element ให้เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ปฏิบัติการ opening จะทำให้รูปร่างของวัตถุที่เหลือในภาพมีความผิดเพี้ยนไปจากเดิมโดยทำให้ขอบของวัตถุเรียบกว่าเดิม เนื่องจากพื้นที่ของวัตถุที่ structuring element ไม่สามารถแทรกเข้าไปได้หดหายไป มีวิธีหนึ่งที่เคยมีผู้นำมาใช้เพื่อดึงเอาส่วนที่หายไปของวัตถุกลับคืนมาเรียกว่า conditional dilation ซึ่งนำมาใช้หลังจากได้ทำปฏิบัติการ opening แล้วโดยการจำกัดขอบเขตของการขยายตัวของจุดภาพของวัตถุให้อยู่ภายในกรอบของรูปร่างเดิมของวัตถุ เทคนิกนี้ได้เคยถูกนำมาใช้ในงานทางด้านกำจัดสิ่งรบกวนในภาพที่มีการตัดแบ่งระดับความเข้มเป็นสองระดับแล้ว [1]

พิจารณาปฏิบัติการในรูปที่ 2.5 ภาพ A ประกอบด้วยวัตถุที่มีรูปร่างและขนาดต่างๆกัน เราต้องการแยกเอาวัตถุที่มีขนาดใหญ่ที่สุดสามอันออกมาจากภาพ ดังนั้นเราต้องกำหนดขนาดของ structuring element ให้เล็กกว่าวัตถุอันใหญ่ทั้งสามแต่โตกว่าวัตถุอื่นๆที่เหลือ ในกรณีนี้เลือกใช้ structuring element ที่มีลักษณะเป็นจานกลมเพราะมีความเหมาะสมสำหรับวัตถุที่มีรูปร่างต่างๆกัน

พิจารณาผลที่ได้จากปฏิบัติการ conditional dilation พบว่าวัตถุที่มีมุมแหลมมากจะผิดเพี้ยนไปจากเดิม ถ้าต้องการแก้ปัญหานี้จะต้องใช้ structuring element ที่มีขนาดโตขึ้นมาก ผลที่ตามมาก็คือต้องใช้เวลาสำหรับปฏิบัติการเพิ่มขึ้นมาก

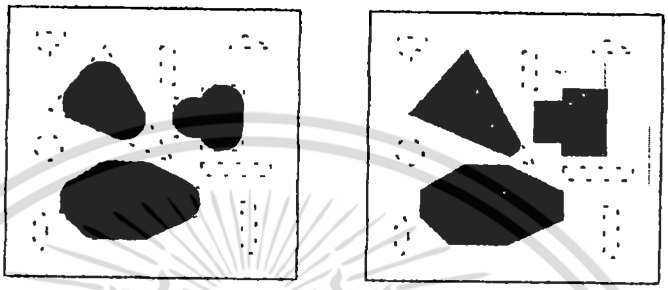
เพื่อแก้ปัญหานี้ จึงได้พัฒนาวิธีใหม่ขึ้นโดยใช้เทคนิคของการขยายจุดภาพภายในกรอบร่วมกับปฏิบัติการ erosion ซึ่งอาจเรียกว่า **การกรองแบบขยายจุดภาพภายในกรอบ** กระบวนการดังกล่าวเริ่มต้นด้วยปฏิบัติการ erosion เพื่อกำจัดวัตถุที่ไม่ต้องการออกโดยการกำหนดขนาดของ structuring element ให้โตกว่าวัตถุที่ไม่ต้องการทุกอันแต่เล็กกว่าวัตถุที่เราต้องการให้เหลืออยู่ ปฏิบัติการนี้จะทำให้วัตถุที่เหลืออยู่มีขนาดเล็กลงซึ่งสามารถทำให้ขยายกลับเท่าเดิมได้ด้วยการขยายจุดภาพจากส่วนที่เหลือของวัตถุภายในขอบเขตของรูปร่างเดิมโดยใช้ภาพเดิมเป็นกรอบ ปฏิบัติการนี้แสดงในรูปที่ 2.6

34397



(a) Image "A"

(b) Structuring element "B"



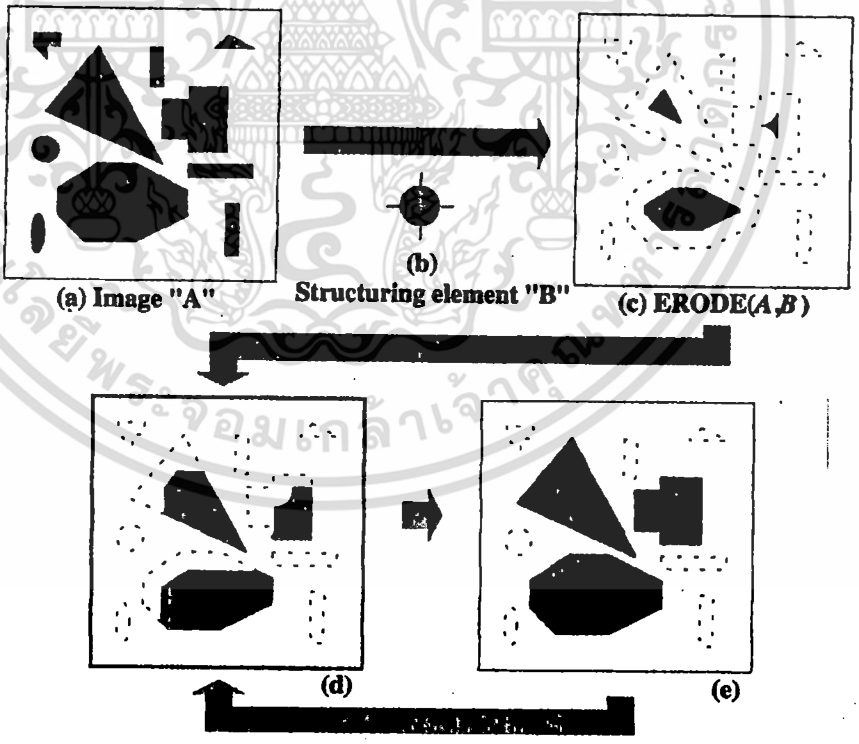
(c)

(d)

รูปที่ 2.5 ปฏิบัติการของ conditional dilation (a) ภาพเดิม A (b) structuring element B

(c) ปฏิบัติการ opening บนภาพ A โดย structuring element B

(d) ปฏิบัติการ conditional dilation ของภาพในข้อ(c)โดยใช้ภาพเดิมเป็นกรอบ



รูปที่ 2.6 แสดงการกรองแบบขยายจุดภาพภายในกรอบ (a) ภาพเดิม A

(b) structuring element B (c) ภาพ A ที่ถูกปฏิบัติการ erosion ด้วย B

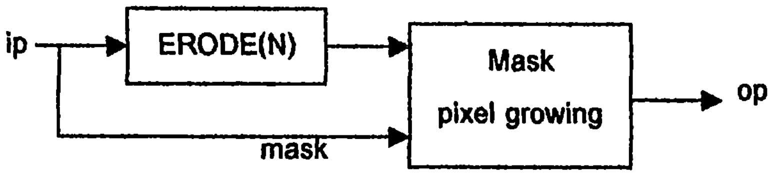
(d)-(e) กระบวนการขยายจุดภาพภายในกรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใ ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

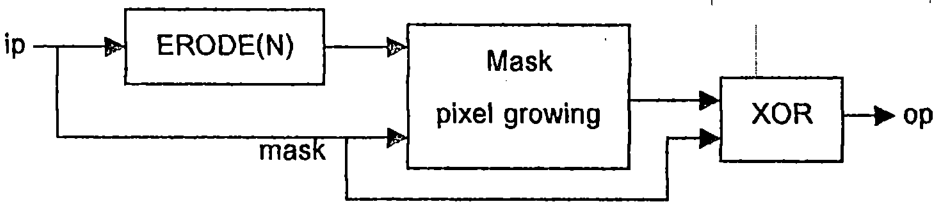
เทคนิคการขยายจุดภาพมีการทำงานแบบวนซ้ำจนกระทั่งได้ทุกจุดภาพของวัตถุที่ต้องการให้เหลืออยู่กลับคืนมา จำนวนรอบของการทำงานจะขึ้นกับความซับซ้อนของรูปร่างของวัตถุ ปฏิบัติการกรองแบบขยายจุดภาพภายในกรอบสามารถเขียนเป็นคำสั่งภาษา C ได้ดังนี้

```
void mask_pixel_growing(int mask, int object, int op)
{
        int x, y, z, B=1, C=2;

        retrieve_image(mask, B);
        retrieve_image(object, C);
loop:   z=0;
        for(y=0; y<256; y++) for(x=0; x<256; x++)
                if(image[C][y][x]==0 && image[B][y][x]==200 &&
                  (image[C][y][x-1]==200 || image[C][y-1][x]==200))
                        {image[C][y][x]=200; z=1;}
        for(y=255; y>=0; y--) for(x=255; x>=0; x--)
                if(image[C][y][x]==0 && image[B][y][x]==200 &&
                  (image[C][y][x+1]==200 || image[C][y+1][x]==200))
                        {image[C][y][x]=200; z=1;}
        if(z==1) goto loop;
        store_image(C, op);
}
```

ฟังก์ชันนี้ต้องการอินพุทเป็นภาพสองภาพคือ ภาพไบนารีที่ใช้เป็นกรอบเรียกว่า mask กับภาพไบนารีของวัตถุที่ถูกทำให้หดตัวลงโดยปฏิบัติการ erosion และต้องการขยายจุดภาพให้มีขนาดเท่าเดิมเรียกว่า object และมีภาพเอ้าท์พุทเป็นแบบไบนารีหนึ่งภาพเรียกว่า op ฟังก์ชันนี้สมารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



การกรองแบบขยายจุดภาพภายในกรอบสามารถนำมาดัดแปลงให้แยกวัตถุที่มีขนาดใหญ่ออกจากภาพได้โดยการใช้ปฏิบัติการ XOR ดังแสดงด้วยบล็อกไดอะแกรมดังนี้



2.5 การตัดแบ่งระดับความเข้ม (Thresholding)

การตัดแบ่งระดับความเข้มหรือ thresholding เป็นปฏิบัติการที่มีประโยชน์อันหนึ่งในการวิเคราะห์ภาพ ปฏิบัติการนี้จะแปลงภาพที่เป็นระดับสีเทา(gray scale image)ให้เป็นภาพแบบสองระดับหรือไบนารี(binary image) ปฏิบัติการตัดแบ่งระดับสีเทาเป็นการตัดแบ่งภาพ(image segmentation)ชนิดหนึ่งซึ่งจะแยกภาพออกเป็นส่วนๆ เทคนิคของการตัดแบ่งระดับสีเทาแบบที่ง่ายที่สุดคือ การตัดแบ่งระดับสีเทาด้วยค่าระดับกั้นตายตัวค่าเดียว(thresholding by a fixed threshold value)ซึ่งจะแบ่งภาพออกเป็นส่วนพื้น(background)กับส่วนด้านหน้า(foreground) เทคนิคในการตัดแบ่งระดับสีเทาที่มีใช้ในการวิเคราะหภาพมีด้วยกันหลายอย่าง บางอย่างก็จะใช้ได้ผลดีกับภาพเฉพาะอย่างและบางอย่างก็จะถูกออกแบบมาเพื่อใช้เฉพาะงาน เพื่อให้ผลการแปลงภาพไบนารีดีที่สุดนอกจากการเลือกเทคนิคที่เหมาะสมแล้ว การกำหนดระดับกั้น(threshold value)ก็มีความสำคัญมากเพราะความแม่นยำในการตัดแบ่งภาพขึ้นกับค่าของระดับกั้นด้วย ต่อไปนี้จะเป็นการอธิบายเทคนิคต่างๆของการตัดแบ่งระดับสีเทาที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายสำหรับงานนี้

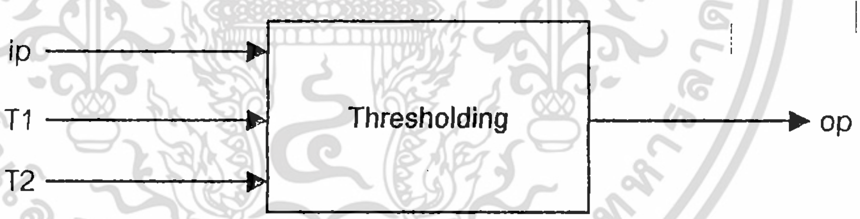
2.5.1 การตัดแบ่งระดับสีเทาด้วยค่าระดับกั้นตายตัวสองค่า (Thresholding by Two Fixed Threshold Values)

เทคนิคของการตัดแบ่งระดับสีเทาด้วยค่าระดับกั้นตายตัวสองค่าโดยพื้นฐานก็เหมือนกับการตัดแบ่งระดับสีเทาด้วยค่าระดับกั้นตายตัวค่าเดียว เพียงแต่ต้องใช้ค่าระดับกั้นสองค่ายกตัวอย่างเช่น T1 และ T2 โดยที่ T1<T2 โดยเทคนิคนี้ จุดภาพใดที่มีความเข้มน้อยกว่า T1 และสูงกว่า T2 จะถูกกำหนดให้เป็นส่วนพื้นหรือ background ในขณะที่จุดภาพใดมีความเข้มอยู่ระหว่าง T1 กับ T2 ก็จะถูกกำหนดเป็นส่วนด้านหน้าหรือ foreground ในการเขียนโปรแกรม เราสามารถใช้เทคนิคนี้แตกต่างไปอีกสองวิธีซึ่งใช้ค่าระดับกั้นเพียงค่าเดียว วิธีแรกไม่ใช้ T1 จึงกำหนดให้เป็นค่า

0 ซึ่งจะกำหนดจุดภาพที่มีความเข้มต่ำกว่าหรือเท่ากับ T2 เป็นส่วนด้านหน้า ส่วนจุดภาพที่เหลือเป็นส่วนด้านพื้น อีกวิธีหนึ่งไม่ใช้ T2 จึงกำหนดให้มีค่า 255 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของระดับสีเทาของภาพ ซึ่งจะกำหนดให้จุดภาพที่มีความเข้มสูงกว่าหรือเท่ากับ T1 เป็นส่วนหน้าและจุดภาพที่เหลือเป็นส่วนพื้น โปรแกรมสำหรับเทคนิคนี้ที่เขียนเป็นภาษา Turbo-C จะเป็นดังนี้

```
void thresholding(int T1, int T2, int ip, int op)
{
        int x,y,C=2;
        retrieve_image(ip, C);
        for(x=0; x<256; x++) for(y=0; y<256; y++)
                if(image[C][y][x]>=T1 && image[C][y][x]<=T2)
                        image[C][y][x]=200;
                else image[C][y][x]=0;
        store_image(C,op);
}
```

ฟังก์ชันนี้เมื่อเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมจะเป็นดังนี้



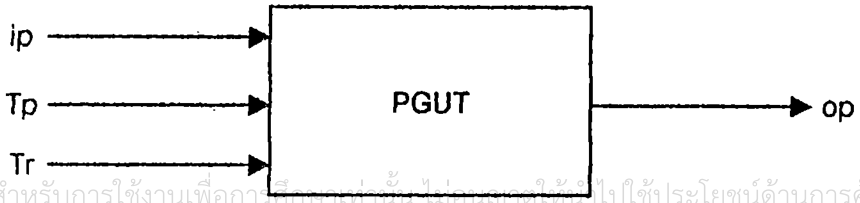
2.5.2 การตัดแบ่งระดับสีเทาด้วยการขยายพื้นที่จุดภาพภายใต้ระดับกั้น
(Thresholding by Pixel Growing Under Threshold)

การตัดแบ่งระดับสีเทาด้วยการขยายพื้นที่จุดภาพภายใต้ระดับกั้น (thresholding by pixel growing under threshold) หรืออาจจะเรียกว่า PGUT เทคนิคนี้ออกแบบมาเพื่อใช้กับงานนี้โดยเฉพาะ ในการทำงานจะต้องกำหนดระดับกั้นสองค่า ค่าแรกเรียกว่า ค่าเตรียมระดับกั้น (pre-threshold value) ค่าที่สองเรียกว่า ค่าระดับกั้นจริง(real-threshold value) ค่าเตรียมระดับกั้นจะมีค่าเท่าใดก็ได้ที่ต่ำกว่าค่าระดับกั้นจริง

เทคนิคนี้ถูกออกแบบมาเพื่อตัดแบ่งส่วนของภาพที่ประกอบด้วยวัตถุที่อยู่ในความสนใจซึ่งมีความเข้มสูงอยู่รอบๆวัตถุ แต่พื้นที่ภายในวัตถุมีความเข้มต่ำ ซึ่งภาพชนิดนี้เมื่อใช้การตัดแบ่งระดับสีเทาด้วยค่าระดับกั้นตายตัวจะทำให้พื้นที่ภายในซึ่งมีความเข้มต่ำถูกตัดหายไป ในเทคนิคของ PGUT นี้ การกำหนดค่าระดับกั้นจริงจะใช้ตำแหน่งที่เป็นร่องระหว่างยอดสองอันที่ปรากฏในอิสโตแกรม(histogram)ของระดับสีเทาของภาพ ส่วนค่าเตรียมระดับกั้นสามารถกำหนดให้มีค่าต่ำมากๆได้เพื่อให้ต่ำกว่าค่าต่ำสุดของความเข้มของวัตถุที่อยู่ในความสนใจ ในการทำงาน PGUT จะแปลงจุดภาพที่มีความเข้มต่ำกว่าค่าเตรียมระดับกั้นให้เป็นค่า 0 หรือส่วนพื้นก่อน หลังจากนั้นก็จะขยายพื้นที่ของส่วนพื้นไปยังจุดภาพข้างเคียงที่มีความเข้มต่ำกว่าระดับกั้นจริง การขยายพื้นที่ของส่วนพื้นจะดำเนินไปจนไม่มีจุดภาพเพิ่มขึ้นอีก หลังจากนั้นก็กำหนดให้จุดภาพที่เหลือทั้งหมดเป็นส่วนด้านหน้า การเขียนโปรแกรมสำหรับฟังก์ชันนี้ในภาษา Turbo-C จะเป็นดังนี้

```
void PGUT(int Tp, int Tr, int ip, int op)
{
        int x,y,z,C=2;
        retrieve_image(ip, C);
        for(x=0; x<256; x++) for(y=0; y<256; y++)
                if(image[C][y][x]<Tp) image[C][y][x]=0;
loop:   z=0;
        for(y=0; y<256; y++) for(x=0; x<256; x++)
                if(image[C][y][x]<Tr && (image[C][y][x-1]==0 || image[C][y-1][x]==0))
                        {image[C][y][x]=0; z=1;}
        for(y=255; y>=0; y--) for(x=255; x>=0; x--)
                if(image[C][y][x]<Tr && (image[C][y][x+1]==0 || image[C][y+1][x]==0))
                        {image[C][y][x]=0;z=1;}
        if(z==1) go loop;
        for(x=0; x<256; x++) for(y=0; y<256; y++)
                if(image[C][y][x]>0) image[C][y][x]=200;
        store_image(C, op);
}
```

บล็อกไดอะแกรมของ PGUT จะเป็นดังนี้

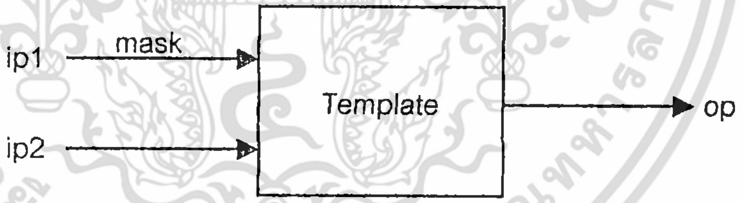


2.6 การทำหน้ากากภาพ (Templating the Image)

เทคนิคของการทำหน้ากากภาพออกแบบมาเพื่อใช้ในการกำจัดส่วนของภาพแบบระดับสีเทาโดยใช้ภาพไบนารีเป็นหน้ากาก(mask) ในการทำงาน สมมุติว่า B คือภาพแบบระดับสีเทา และ C คือภาพไบนารีที่จะใช้เป็นหน้ากาก เมื่อทำการกวาด(scan)ไปบนตำแหน่งต่างๆของภาพ ถ้า C(x, y)ใดเป็นส่วนหน้าของภาพ ก็ให้ใส่ค่าของ B(x, y) ลงบน C(x, y) นั้น ภาพที่ได้เมื่อกวาดไปจนครบทุกจุดภาพแล้วจะเป็นภาพแบบระดับสีเทาซึ่งส่วนที่ไม่อยู่ในความสนใจถูกตัดออกไป การเขียนโปรแกรมในภาษ Turbo-C จะเป็นดังนี้

```
void template(int ip1, int ip2, int op)
{
        int x,y,B=1,C=2;
        retrieve_image(ip1, C);
        retrieve_image(ip2, B);
        for(x=0; x<256; x++) for(y=0; y<256; y++)
                if(image[C][y][x]==200) image[C][y][x]=image[B][y][x];
        store_image(C, op)
}
```

บล็อกไดอะแกรมของฟังก์ชันนี้เป็นดังนี้



2.7 การตรวจสอบสมมาตร

เทคนิคนี้ออกแบบมาเพื่อใช้ตรวจสอบวัตถุในภาพไบนารี ถ้าวัตถุใดปรากฏในภาพเป็นคู่ในตำแหน่งที่สมมาตรกับเส้นกึ่งกลางก็จะถูกตรวจจับและให้ไปปรากฏในภาพเอ้าท์พุท ในกรณีนี้เส้นกึ่งกลางหมายถึงเส้นที่แบ่งภาพออกเป็นสองส่วนเท่าๆกันทางด้านซ้ายและขวา เทคนิคนี้จะนำไปใช้ในกระบวนการแยกกลุ่มประเภทของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ และเส้นกึ่งกลางของภาพอาจจะประมาณได้ว่าเป็นเส้นแกนสมอง โปรแกรมของการตรวจสอบสมมาตรในภาษา Turbo-C จะเป็นดังนี้

```
void check_symmetry(int ip, int op)
{
        int x,x1,x2,y,y1,y2,B=1,C=2;
        retrieve_image(ip, B);
        clear_image_array(C);
        x1=BR_left;
        x2=BR_right;
        y1=BR_top;
        y2=BR_bottom;
        for(x=x1; x<=x2; x++) for(y=y1; y<=y2; y++)
                image[C][y][x]=image[B][y][x2-x+x1];
        store_image(C, 3);
        AND(3, ip, 3);
        mask_pixel_growing(ip, 3, op);
}
```

บล็อกไดอะแกรมของฟังก์ชันนี้คือ

ip
Check symmetry
op

บทที่ 3 ระบบการวิเคราะห์ภาพถ่ายสมอง MRI

3.1 โครงสร้างของระบบการวิเคราะห์ภาพถ่ายสมอง MRI

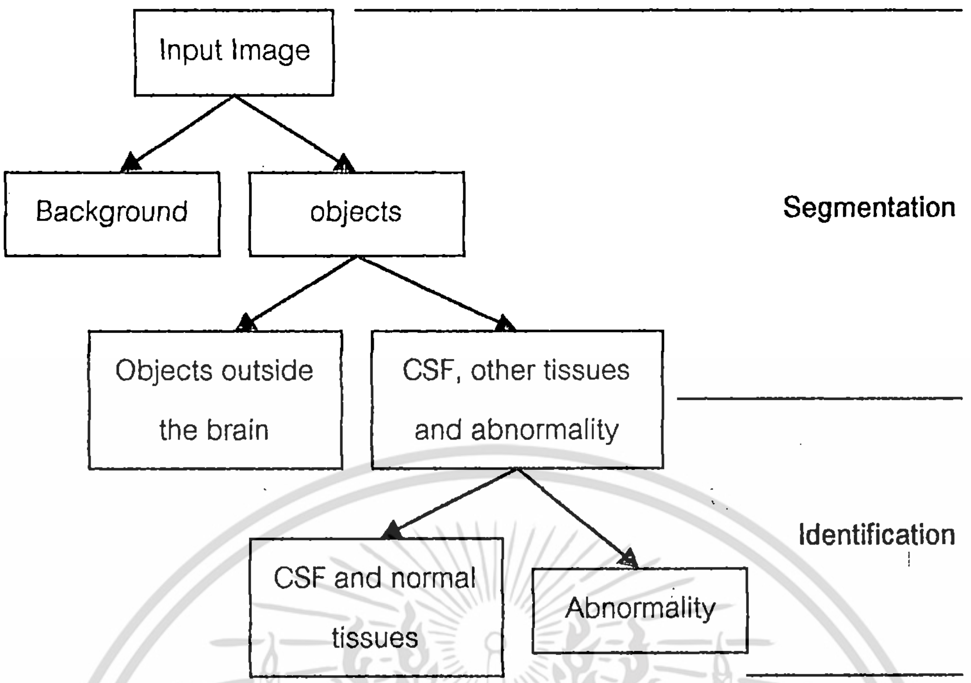
ภาพถ่ายสมอง MRI ที่จะนำมาวิเคราะห์ในระบบนี้จะต้องประกอบด้วยชุดของภาพต่อเนื่องกันจำนวน 18 ถึง 22 ภาพ และจะต้องเป็นภาพชนิด PD-weighted และ T2-weighted การวิเคราะห์จะกระทำกับทุกภาพโดยเริ่มจากภาพหนึ่งที่ถูกกำหนดโดยผู้ใช้ ภาพเริ่มต้น(starting slice)จะต้องเป็นภาพที่ประกอบด้วยพื้นที่ของ lateral ventricle ที่มีพื้นที่มากที่สุดปรากฏบริเวณกลางพื้นที่สมอง การกำหนดภาพเริ่มต้นที่เหมาะสมมีความสำคัญมากเพราะข้อมูลบางอย่างจะต้องได้จากภาพนี้และนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในทุกภาพ ภาพเริ่มต้นที่กำหนดขึ้นนี้จะแบ่งชุดของภาพออกเป็นสองส่วนคือภาพที่อยู่ล่าง(lower slices)กับภาพที่อยู่บน(upper slices) ในการวิเคราะห์ภาพ เมื่อทำที่ภาพเริ่มต้นเสร็จภาพต่อไปจะเป็นภาพที่อยู่ล่างซึ่งติดกับภาพเริ่มต้นและทำต่อไปจนหมดภาพที่อยู่ล่าง จึงย้อนกลับมาทำที่ภาพที่อยู่บนซึ่งติดกับภาพเริ่มต้นก่อน แล้วจึงขยับขึ้นไปเรื่อยๆจนครบทุกภาพ

การวิเคราะห์ในแต่ละภาพ(ยกเว้นภาพเริ่มต้น)จะต้องนำข้อมูลบางอย่างที่ได้จากภาพที่ชิดติดกันและผ่านการวิเคราะห์มาแล้วมาใช้ด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์ภาพจึงจำเป็นต้องกระทำเป็นลำดับตามที่กล่าวไว้ข้างบน การวิเคราะห์จะดำเนินไปอย่างอัตโนมัติหลังจากภาพเริ่มต้นถูกกำหนดขึ้นจากผู้ใช้ และผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้จากการวิเคราะห์ในแต่ละภาพจะแทนด้วยแผนที่ของสมองที่จะมีส่วนของเนื้อเยื่อสมอง(brain-parenchyma) สิ่งผิดปกติ(abnormality)ถ้ามี และเนื้อเยื่อส่วนที่เหลือรวมกับ CSF

โดยหลักทั่วไป การวิเคราะห์ภาพประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ การตัดแบ่งภาพหรือ segmentation กับการแยกประเภทของวัตถุที่ตัดแบ่งแล้วหรือ classification

3.2 เทคนิคการตัดแบ่งภาพ

การวิเคราะห์ภาพถ่ายสมอง MRI ของระบบนี้มีหลักการในการตัดแบ่งภาพโดยการกำจัดวัตถุที่อยู่นอกความสนใจออกไปทีละอย่างตามลำดับด้วยเทคนิคที่แตกต่างกันในแต่ละขั้นตอนขึ้นกับคุณสมบัติของวัตถุนั้นๆ ดังแสดงขั้นตอนของกระบวนการในรูปที่ 3.1

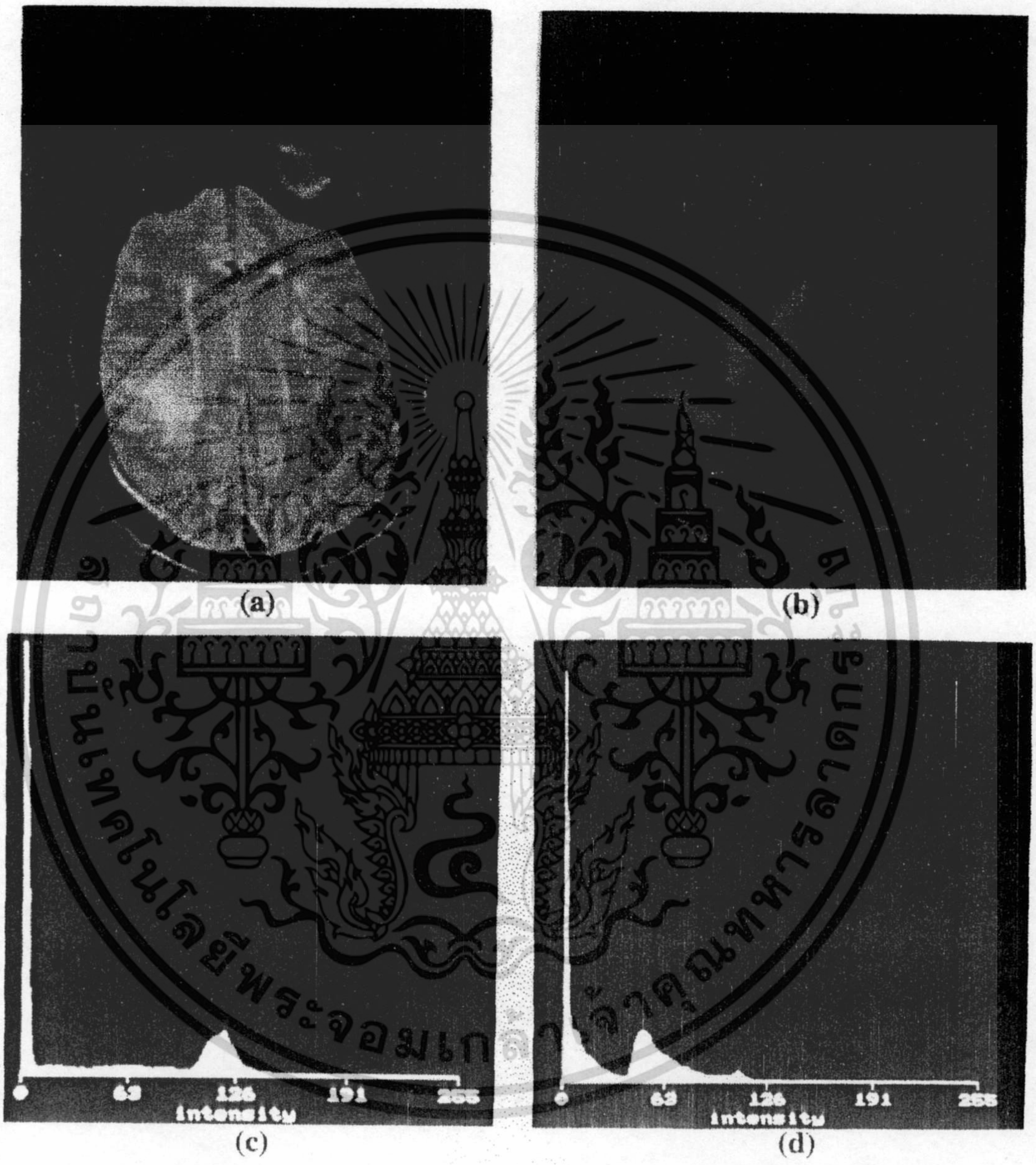

Input Image
Background
objects
Segmentation
Objects outside the brain
CSF, other tissues and abnormality
Identification
CSF and normal tissues
Abnormality

รูปที่ 3.1 แสดงลำดับของการวิเคราะห์ภาพถ่ายสมอง MRI

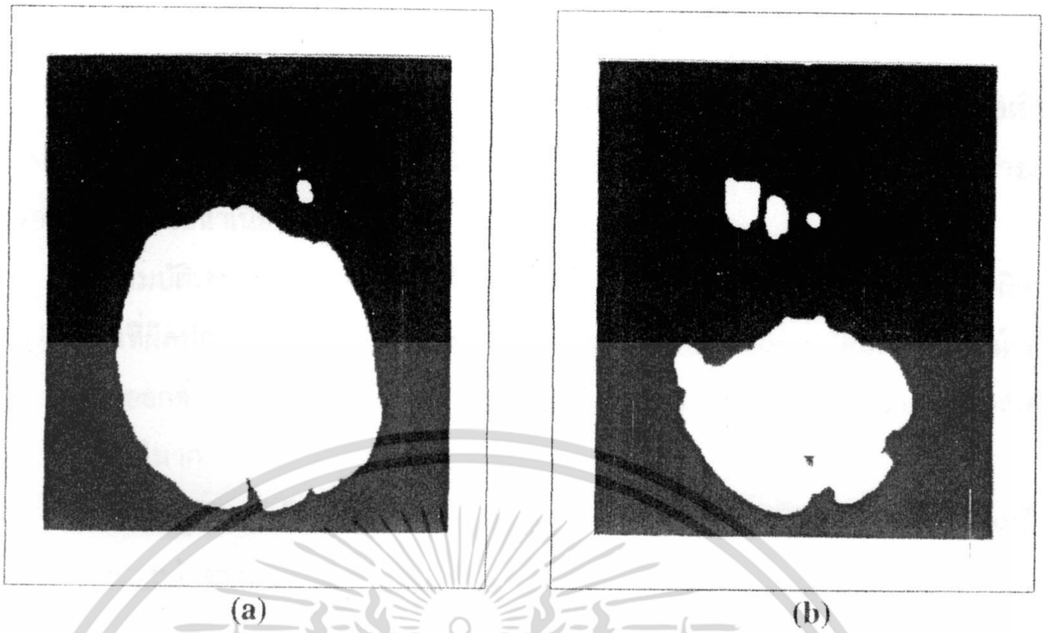
ในรูปที่ 3.1 ส่วนพื้นของภาพจะถูกกำจัดออกจากภาพเป็นอันดับแรก ส่วนพื้นของภาพก็คืออากาศที่อยู่โดยรอบศีรษะคนไข้นั่นเองและปรากฏในภาพมีความเข้มต่ำมาก ถ้าพิจารณาจากอิสโตแกรมความเข้มของภาพทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 3.2 จะเห็นการจับตัวเป็นกลุ่มแคบๆของส่วนพื้นปรากฏทางซ้ายมือ ส่วนการจับตัวเป็นกลุ่มของความเข้มที่อยู่ทางด้านขวามือจะเป็นของ gray matter, white matter, CSF, abnormality(ถ้ามี) และวัตถุอื่นๆที่อยู่ในบริเวณสมอง กลุ่มทางขวามือมีความกว้างมากกว่าเนื่องจากประกอบด้วยวัตถุหลายอย่าง สำหรับไขมันและไขกระดูกที่ปรากฏรอบๆสมองจะมีความเข้มอยู่ระหว่างกลุ่มความเข้มทั้งสองในอิสโตแกรมของภาพ T2-weighted แต่จะมีความเข้มอยู่ในกลุ่มเดียวกับเนื้อเยื่อสมองในอิสโตแกรมของภาพ PD-weighted ส่วนพื้นของภาพจึงสามารถกำจัดออกได้โดยใช้เทคนิคการตัดแบ่งระดับสีเทาบางอย่าง

เมื่อส่วนพื้นถูกกำจัดออกไปจากภาพแล้ว ส่วนที่เหลือประกอบด้วยวัตถุบางอย่างที่ปรากฏอยู่ภายนอกสมอง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ในบางภาพโดยเฉพาะภาพเริ่มต้นและภาพที่อยู่ใกล้เคียง พื้นที่สมองจะมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับวัตถุอื่น แต่ในบางภาพที่อยู่ต่ำๆขนาดของพื้นที่สมองอาจเล็กกว่าวัตถุอื่นๆได้ สำหรับภาพที่มีพื้นที่สมองขนาดใหญ่และวัตถุอื่นมีขนาดเล็ก วัตถุที่อยู่นอกความสนใจซึ่งมีขนาดเล็กสามารถกำจัดออกได้โดยใช้เทคนิคของการกรองแบบมอร์โฟโลยีหรือ morphological filtering อย่างไรก็ตามสำหรับภาพที่มีพื้นที่สมองขนาดเล็กและวัตถุที่อยู่นอกความสนใจมีขนาดใหญ่

นอกจากใช้เทคนิคการกรองแบบมอร์โฟโลยีแล้วยังต้องใช้เทคนิคเชิงภูมิศาสตร์(geographical technic)ร่วมด้วย

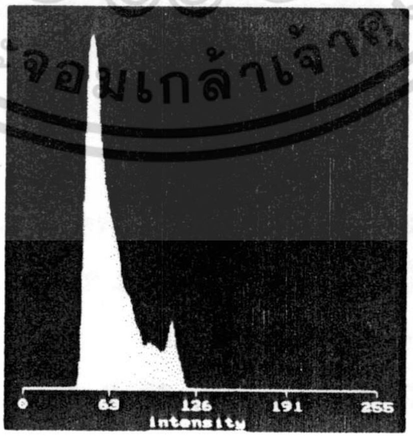

(a)
(b)
0
63
126
191
255
intensity
0
63
126
191
255
intensity
(c)
(d)

รูปที่ 3.2 (a) ภาพ PD-weighted (b) ภาพ T2-weighted (c) ฮิสโตแกรมความเข้มของภาพ PD-weighted และ (d) ฮิสโตแกรมความเข้มของภาพ T2-weighted


(a) (b)

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างภาพไบนารีบางภาพหลังจากกำจัดส่วนพื้นไปแล้ว (a) สำหรับภาพที่มีพื้นที่สมองขนาดใหญ่และวัตถุอื่นขนาดเล็ก (b) สำหรับภาพที่มีพื้นที่สมองเล็กลงและวัตถุอื่นใหญ่ขึ้น

ภาพ T2-weighted ที่ผ่านการกำจัดส่วนพื้นและวัตถุนอกความสนใจที่อยู่ภายนอกสมองออกแล้วมีการกระจายความเข้มของเนื้อเยื่อสมองซึ่งประกอบด้วย white matter และ gray matter โดยประมาณเป็นแบบปกติดังแสดงในรูปที่ 3.4 เราสามารถสมมุติเอาว่าการกระจายความเข้มของเนื้อเยื่อสมองเป็นแบบปกติได้ และสามารถแยกเนื้อเยื่อสมองออกจากวัตถุในความสนใจอื่นๆได้ด้วยเทคนิคการตัดแบ่งระดับความเข้ม



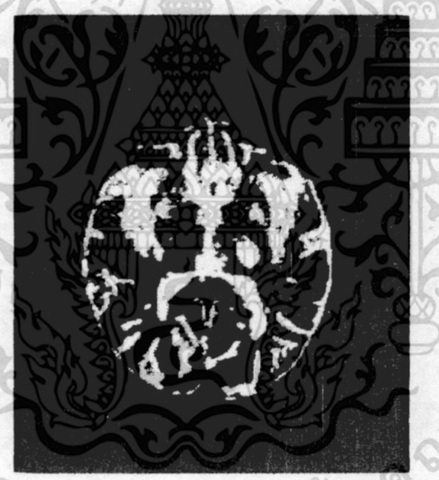
รูปที่ 3.4 ฮิสโตแกรมความเข้มของภาพ T2-weighted ที่ผ่านการกำจัดส่วนพื้นและวัตถุนอกความสนใจที่อยู่นอกสมองไปแล้ว

3.3 เทคนิคการแยกประเภทของวัตถุ

ส่วนที่เหลือในภาพหลังจากผ่านการกำจัดส่วนเนื้อเยื่อสมองประกอบด้วย CSF, เนื้อเยื่อที่ผิดปกติ(abnormality) และเนื้อเยื่ออื่นๆ ส่วนที่เหลืออยู่ในภาพเหล่านี้ก็จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการแยกประเภทของวัตถุเพื่อหาเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ

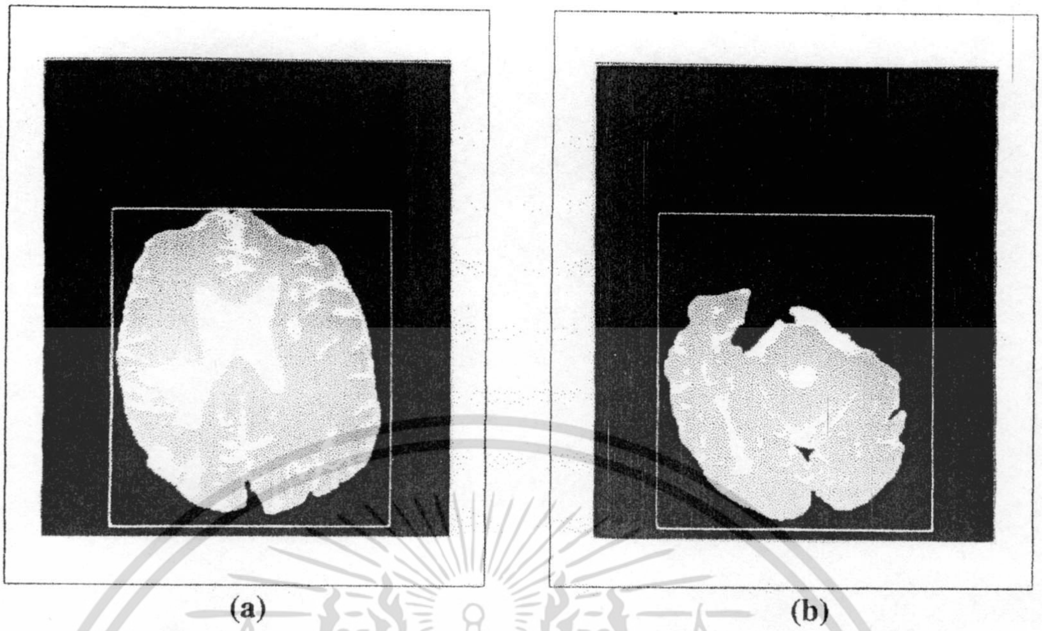
มีคุณสมบัติเด่น(feature)อันหนึ่งที่มีประโยชน์มากในการแยกประเภทของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ นั่นคือ เนื้อเยื่อที่ผิดปกติจะมีความเข้มสูงที่สุดในภาพ PD-weighted คุณสมบัติเด่นอันนี้ถูกนำมาใช้เพื่อแยก CSF ออกจากภาพ แต่ไม่สามารถใช้แยกเนื้อเยื่อส่วนที่เหลือได้เพราะมีความเข้มใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อที่ผิดปกติมาก

เทคนิคเชิงภูมิศาสตร์จะมีบทบาทสำคัญมากในการแยกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ เนื้อเยื่อที่เหลืออยู่ในภาพบางอย่างหลังจากแยกเนื้อเยื่อสมองออกไปแล้ว โดยปกติจะปรากฏเป็นคู่ที่สมมาตรกับเส้นแกนสมองดังแสดงในรูปที่ 3.5 ดังนั้น เนื้อเยื่อเหล่านี้จึงสามารถตรวจจับและกำจัดออกจากภาพได้โดยการตรวจสอบการสมมาตร



รูปที่ 3.5 เนื้อเยื่อบางอย่างที่ยังคงเหลืออยู่และปรากฏเป็นคู่สมมาตรระหว่างเส้นแกนสมอง

ในการตรวจสอบความสมมาตร เราต้องหาช่องกรอบสี่เหลี่ยมที่สามารถบรรจุทุกส่วนของสมองในทุกภาพได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 แล้วในช่องกรอบสี่เหลี่ยมนี้ก็จะถูกแบ่งเป็นพื้นที่ต่างๆขึ้นกับแต่ละภาพ ช่องกรอบสี่เหลี่ยมนี้สมารถหาได้หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการตัดแบ่งภาพในทุกภาพแล้วเท่านั้น ดังนั้น การแยกประเภทของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติจะสามารถทำได้หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการตัดแบ่งภาพแล้ว



รูปที่ 3.6 แสดงช่องกรอบสี่เหลี่ยมที่สามารถบรรจุพื้นที่สมองของทุกภาพได้ (a) สำหรับภาพเริ่มต้น (b) สำหรับภาพที่อยู่ต่ำ

บทที่ 4 การตัดแบ่งองค์ประกอบของภาพถ่ายสมองจาก MRI

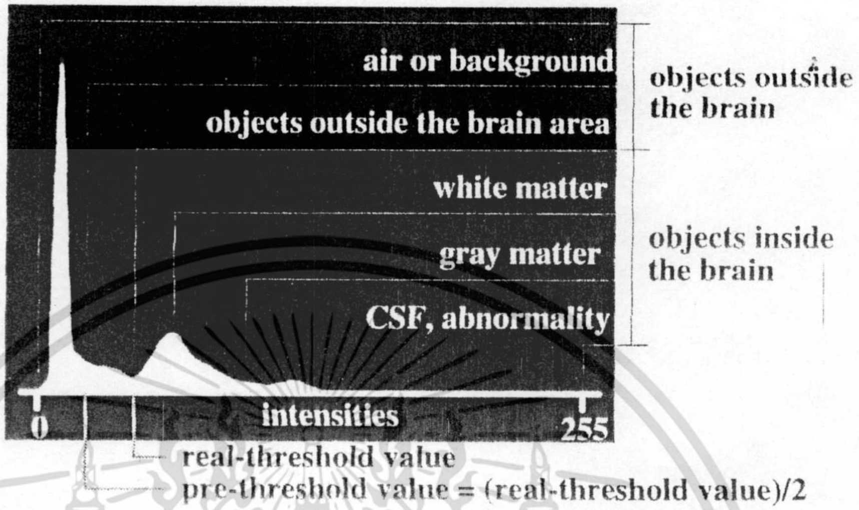
4.1 การแยกส่วนพื้นของภาพออกจากวัตถุ

การแยกส่วนพื้นของภาพถ่ายออกจากวัตถุเป็นขั้นตอนแรกในการวิเคราะห์ มีเพียงภาพ PD-weighted และ T2-weighted สองภาพเท่านั้นที่จะนำเข้าสู่การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ ถ้าพิจารณาในภาพ PD-weighted ทั้งสมองและวัตถุอื่นที่อยู่ภายนอกสมองจะมีความเข้มสูงใกล้เคียงกัน และมีบางส่วนของวัตถุที่อยู่นอกสมองจะเห็นอยู่ใกล้ชิดกับขอบของสมองมาก ในขณะที่ในภาพ T2-weighted วัตถุอย่างเดียวกันที่อยู่ภายนอกสมองปรากฏมีความเข้มต่ำและใกล้เคียงกับความเข้มของส่วนพื้นของภาพ ดังนั้นถ้าใช้ภาพ T2-weighted ในการตัดแบ่งระดับความเข้มเพื่อตัดแบ่งส่วนพื้นของภาพออกไป วัตถุที่อยู่ภายนอกสมองเกือบทั้งหมดซึ่งเป็นวัตถุที่ไม่อยู่ในความสนใจก็คาดว่าจะถูกตัดออกไปด้วย ผลที่ได้ตามมาคือ ในการแยกสมองกับวัตถุภายนอกสมองที่เหลือซึ่งไม่อยู่ในความสนใจจะทำได้ง่ายขึ้นในขั้นตอนต่อไป อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาภาพ T2-weighted จะเห็นว่าบางส่วนของ white matter มีความเข้มต่ำมาก ถ้าทำการตัดแบ่งระดับความเข้มบนภาพ T2-weighted ด้วยค่าระดับกั้นที่ตายตัว บางส่วนของ white matter อาจถูกตัดออกไปจากภาพเพราะมีความเข้มต่ำกว่าค่าระดับกั้น ถึงแม้ว่าส่วนนี้ของ white matter จะไม่ใช่เนื้อเยื่อที่ผิดปกติเพราะมีความเข้มต่ำมาก แต่มันก็ไม่ควรถูกตัดออกไปจากภาพในขั้นตอนนี้เพราะอาจทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ตามมา

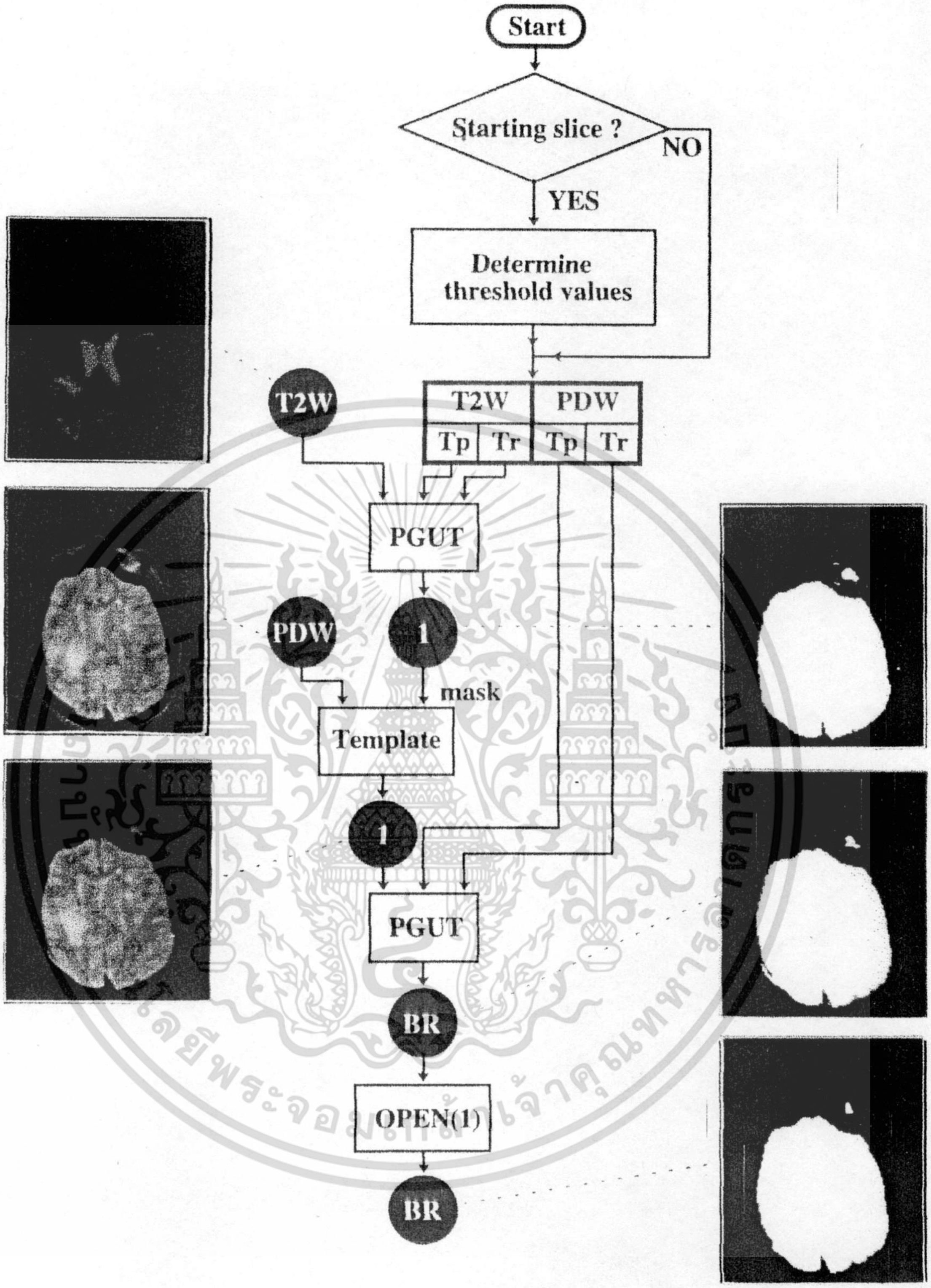
เทคนิคการตัดแบ่งแบบขยายจุดภาพภายใต้ระดับกั้น(pixel growing under threshold)หรือ PGUT จึงเหมาะที่จะนำมาใช้กับภาพ T2-weighted ในขั้นตอนนี้ซึ่งจะช่วยสงวนส่วนของ white matter ไว้ได้ ค่าระดับกั้นจริง(real-threshold value)ที่ใช้ในเทคนิคนี้สามารถกำหนดได้จากตำแหน่งก้นของหุบที่อยู่ระหว่างยอดสองยอดของฮิสโตแกรมความเข้ม และค่าเตรียมระดับกั้น(pre-threshold value)กำหนดให้มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าระดับกั้นจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ในรูปที่ 4.1 สามารถพิจารณาได้ว่ามียอดใหญ่ๆสองยอด จะเห็นว่ายอดที่สูงที่สุดทางซ้ายของฮิสโตแกรมซึ่งก็คืออากาศหรือส่วนพื้นของภาพมีลักษณะแคบเพราะเป็นวัตถุที่เกือบจะเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนอีกยอดหนึ่งมีลักษณะกระจายกว้างเพราะประกอบด้วยเนื้อเยื่อหลายชนิด จะเห็นได้ทันทีว่าค่าระดับกั้นจริงจะเป็นจุดแบ่งระหว่างวัตถุภายนอกสมองกับวัตถุภายในสมอง ถ้ากำหนดให้ค่าเตรียมระดับกั้นมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าระดับกั้นจริงก็จะประกันได้ว่าไม่มีส่วนใดของวัตถุภายในสมองมีความเข้มต่ำกว่าค่านี้ เมื่อทำการตัดแบ่งระดับความเข้มด้วย PGUT บนภาพ T2-weighted การขยายจุดภาพของส่วนพื้นภาพจะไปหยุดที่ขอบของสมองเนื่องจาก

gray matter และ CSF ซึ่งมีความเข้มสูงกว่าค่าระดับกั้นจริงมากอยู่ในตำแหน่งชิดกับขอบสมอง ในขณะที่ white matter ซึ่งมีความเข้มต่ำอยู่ในตำแหน่งด้านในของสมอง วิธีการตัดแบ่งส่วนพื้นออกจากวัตถุแสดงด้วยโฟลว์ชาร์ทในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ภาพร่างของฮิสโตแกรมความเข้มของภาพ T2-weighted และการกำหนดตำแหน่งของค่าระดับกั้นจริงและค่าเตรียมระดับกั้น


Start
Starting slice ?
NO
YES
Determine threshold values
T2W
PDW
Tp
Tr
Tp
Tr
T2W
PGUT
PDW
1
mask
Template
1
PGUT
BR
OPEN(1)
BR

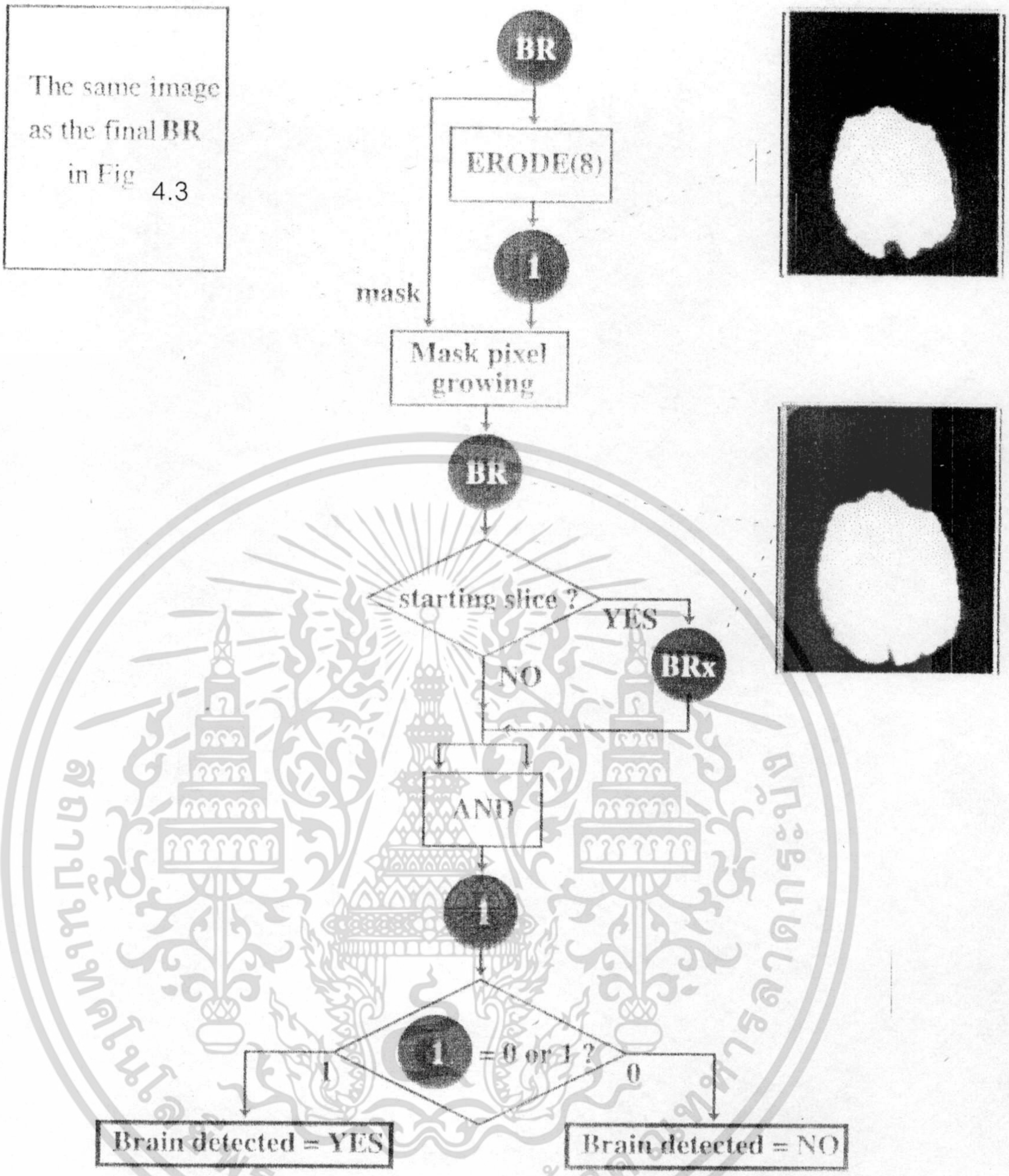
รูปที่ 4.2 โฟลว์ชาร์ทของการตัดแบ่งส่วนพื้นออกจากวัตถุ

4.2 การแยกสมองออกจากวัตถุนอกสมอง

การแยกสมองออกจากวัตถุอื่นนอกสมองที่ไม่อยู่ในความสนใจสามารถทำได้โดยใช้การกรองเชิงมอร์โฟโลยี(morphological filter) ถ้าพิจารณารูปร่างและขนาดของสมองเปรียบเทียบกับวัตถุนอกสมองในแต่ละภาพ จะเห็นได้ว่าในภาพที่เป็นส่วนบนของสมองจะมีรูปร่างของสมองเป็นรูปประมาณทรงกลมและขนาดของสมองก็ใหญ่กว่าวัตถุนอกสมองมาก ในทางกลับกันภาพที่เป็นส่วนล่างของสมอง จะมีรูปร่างของสมองที่เปลี่ยนแปลงและเล็กลงมาก แต่วัตถุนอกสมองโตขึ้นและมีความซับซ้อนขึ้น สำหรับภาพสมองส่วนบนสามารถใช้การกรองเชิงมอร์โฟโลยีด้วย structuring element ที่มีขนาดเล็ก แต่สำหรับภาพสมองส่วนล่างต้องใช้ structuring element ที่มีขนาดใหญ่กว่ามาก ผลที่ตามมาคือต้องใช้เวลาในปฏิบัติการมากกว่า และในบางภาพสมองที่อยู่ต่ำมากซึ่งขนาดของสมองประมาณเท่ากับหรือเล็กกว่าขนาดของวัตถุนอกสมอง การแยกสมองไม่สามารถทำได้

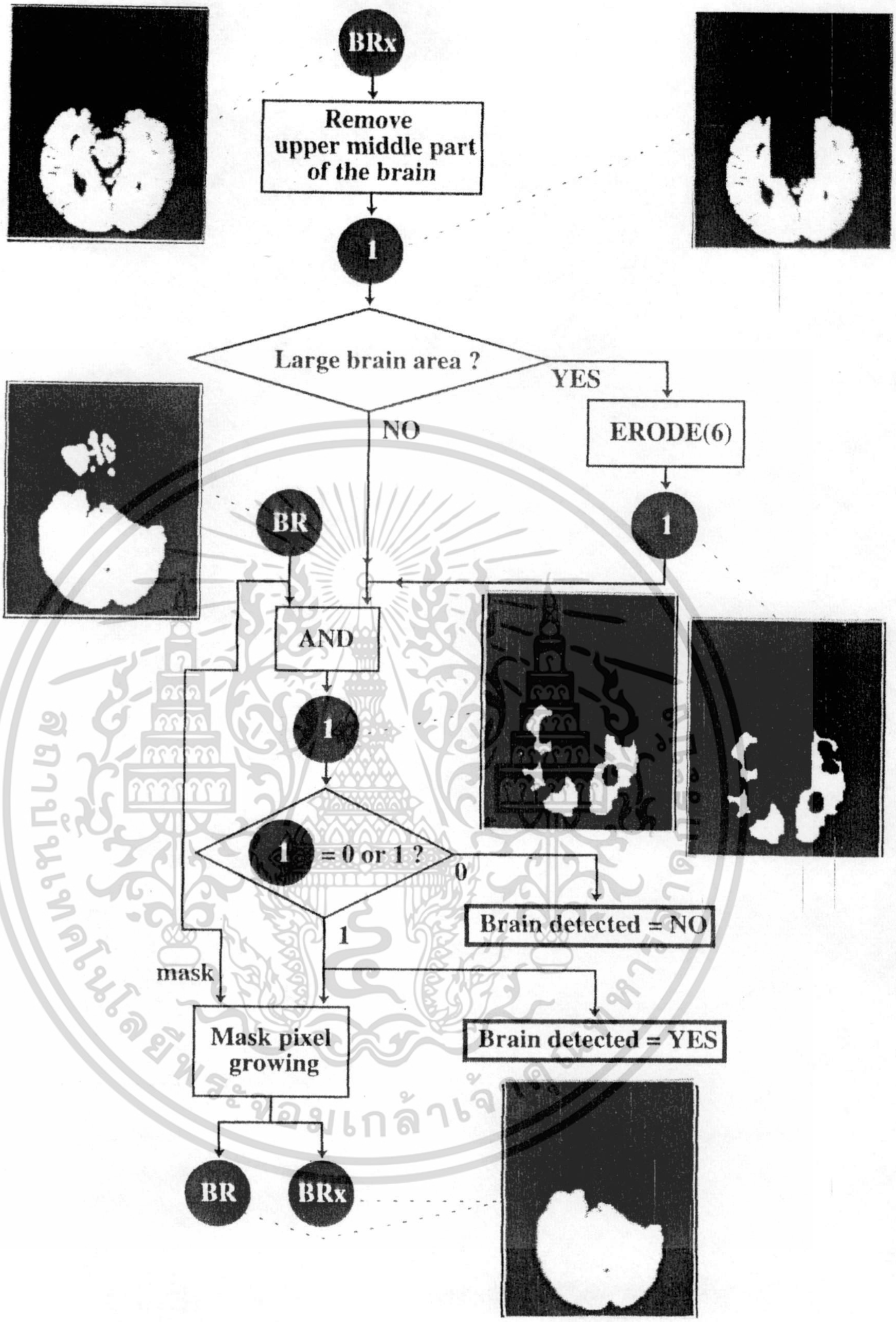
ได้มีการพัฒนาเทคนิคอันหนึ่งเพื่อใช้กับภาพสมองที่อยู่ต่ำโดยใช้ภาพไบนารีของสมองที่ได้ผ่านการแยกมาจากภาพที่อยู่ติดกัน เป็นตัวชี้ตำแหน่งของพื้นที่สมองในภาพที่กำลังทำการวิเคราะห์ ดังนั้น วิธีการแยกสมองออกจากวัตถุนอกสมองจึงแบ่งออกเป็นกระบวนการย่อยสองกระบวนการคือ กระบวนการแรกใช้กับภาพเริ่มต้นกับภาพสมองส่วนบน และกระบวนการที่สองใช้กับภาพสมองส่วนล่าง

วิธีการแยกสมองออกจากวัตถุนอกสมองสำหรับภาพเริ่มต้นและภาพส่วนบนของสมองแสดงด้วยโฟลว์ชาร์ทในรูปที่ 4.3 ภาพอินพุท BR แบบไบนารีสำหรับกระบวนการนี้ประกอบด้วยสมองและวัตถุนอกสมองที่ไม่อยู่ในความสนใจ การตัดวัตถุนอกสมองออกใช้การกรองเชิงมอร์โฟโลยีด้วยวิธีขยายจุดภาพภายในกรอบโดยเริ่มทำปฏิบัติการ erosion ก่อนด้วย structuring element ขนาด 8 แล้วตามด้วยการขยายจุดภาพจากส่วนของสมองที่เหลือให้มีขนาดและรูปร่างเหมือนเดิมโดยใช้ภาพอินพุท BR เป็นกรอบในการขยายจุดภาพ แล้วไฟล์ภาพ BR จะถูกบันทึกด้วยภาพใหม่ที่ได้นี้และถ้าภาพที่กำลังวิเคราะห์อยู่นี้เป็นภาพเริ่มต้น ภาพที่ได้นี้ก็จะถูกบันทึกลงในไฟล์ BRx ด้วยซึ่งต่อไปจะถูกนำไปใช้ในการแยกสมองสำหรับภาพสมองส่วนล่างที่อยู่ติดกัน สามารถตรวจสอบได้ว่าภาพที่กำลังวิเคราะห์อยู่นี้ยังมีส่วนของสมองอยู่หรือไม่ โดยการใช้ปฏิบัติการ AND ด้วยการป้อนอินพุททั้งสองของ AND ด้วยภาพ BRx เดียวกัน ถ้าปฏิบัติการ AND คืนค่า 1 ออกมาแสดงว่าภาพนั้นมีส่วนของสมองอยู่ ในทางกลับกัน ถ้าคืนค่า 0 ออกมาภาพนั้นก็จะไม่มีส่วนของสมองอยู่ ดังนั้นการวิเคราะห์จึงควรจะหยุด


The same image as the final BR in Fig 4.3
BR
ERODE(8)
1
mask
Mask pixel growing
BR
starting slice ?
YES
BRx
NO
AND
1
1 = 0 or 1 ?
1
0
Brain detected = YES
Brain detected = NO

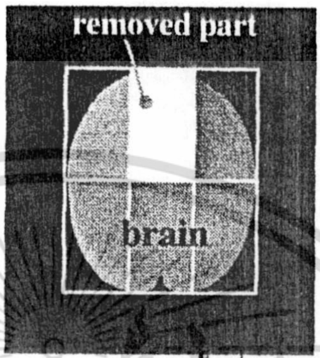
รูปที่ 4.3 โฟลว์ชาร์ทแสดงวิธีแยกสมองออกจากวัตถุนอกสมอง
สำหรับภาพเริ่มต้นและภาพสมองส่วนบน

สำหรับภาพสมองส่วนล่าง การแยกสมองออกจากวัตถุนอกสมองมีความซับซ้อนมากกว่า ในกรณีนี้ ภาพสมองแบบไบนารีที่ได้จากภาพข้างเคียงหรือภาพ BRx จะถูกนำมาใช้ในการชี้ตำแหน่งของสมองในภาพที่กำลังวิเคราะห์ วิธีการแสดงด้วยโฟลว์ชาร์ทในรูปที่ 4.4


BRx
Remove upper middle part of the brain
1
Large brain area ?
YES
NO
ERODE(6)
1
BR
AND
1
1 = 0 or 1 ?
0
1
Brain detected = NO
mask
Brain detected = YES
Mask pixel growing
BR
BRx

รูปที่ 4.4 โฟลว์ชาร์ทของการแยกสมองออกจากวัตถุนอกสมองสำหรับภาพสมองส่วนล่าง

ในรูปที่ 4.4 ภาพ BRx คือภาพไบนารีของสมองที่ได้ทำการแยกออกมาจากภาพข้างเคียง ก่อนที่จะใช้ภาพนี้จะต้องทำการตัดบางส่วนออกก่อน เนื่องจากโดยทั่วไป ขนาดของสมองของภาพนี้จะใหญ่กว่าของภาพที่กำลังวิเคราะห์ และในพื้นที่ด้านหน้าของสมองของภาพสมองที่ต่ำกว่าบางภาพจะมีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากภาพหนึ่งไปอีกภาพหนึ่ง บางส่วนของภาพสมองจะถูกตัดออกไปดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงการตัดส่วนของพื้นที่สมองในภาพ BRx ออก

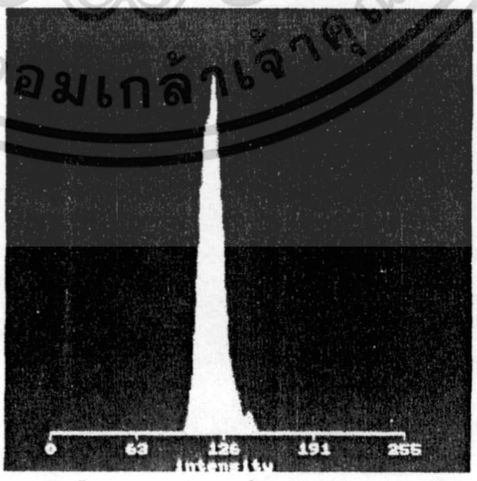
หลังจากนั้น ถ้าสมองในภาพ BRx มีพื้นที่ขนาดใหญ่(ซึ่งกำหนดจากขนาดในแนวดิ่งของสมองในภาพ BRx เล็กกว่าครึ่งหนึ่งของขนาดในแนวดิ่งของสมองในภาพเริ่มต้น)ก็จะทำการหดพื้นที่ของสมองโดยใช้ปฏิบัติการ erosion ด้วย structuring element ขนาด 6 สำหรับพื้นที่สมองในภาพ BRx ที่มีขนาดเล็ก ก็จะไม่ถูกทำให้หดเพราะจะทำให้บางส่วนของสมองที่ไม่ต่อเนื่องกับพื้นที่ส่วนใหญ่ของสมองในภาพสมองที่อยู่ต่ำหายไปจากภาพในขั้นตอนที่ตามมาได้ แล้วส่วนที่เหลือของพื้นที่สมองก็จะถูกนำไปชี้ตำแหน่งของพื้นที่สมองในภาพที่กำลังวิเคราะห์ซึ่งอยู่ในไฟล์ภาพ BR โดยใช้ปฏิบัติการ AND ถ้าปฏิบัติการ AND คืนค่า 0 ออกมาแสดงว่าไม่มีส่วนของพื้นที่สมองอยู่ในภาพที่กำลังวิเคราะห์ กระบวนการวิเคราะห์ในภาพนี้ก็จะหยุด ในทางกลับกัน ถ้าปฏิบัติการ AND คืนค่า 1 แสดงว่ามีบางส่วนของพื้นที่สมองอยู่ในภาพที่กำลังวิเคราะห์ ดังนั้นส่วนของสมองจากเอ้าท์พุทของปฏิบัติการ AND จะถูกขยายจุดภาพจนโตเท่าขนาดเดิมโดยวิธีขยายจุดภาพในกรอบโดยใช้ภาพจากไฟล์ BR เป็นกรอบ สุดท้ายภาพ BR และ BRx ใหม่ก็จะถูกบันทึกเก็บไว้

พอมาถึงขั้นนี้ เราสามารถกำหนดกรอบสี่เหลี่ยมที่จะบรรจุพื้นที่สมองในทุกภาพได้ กรอบสี่เหลี่ยมนี้จะถูกปรับใหม่ทุกครั้งเมื่อมีการวิเคราะห์ในแต่ละภาพ จนสุดท้ายจะได้กรอบที่สามารถบรรจุพื้นที่สมองของทุกภาพได้ กรอบสี่เหลี่ยมนี้จะเป็นประโยชน์มากในการชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ นอกจากนี้ เวลาที่ใช้ในปฏิบัติการต่างๆหลังจากนี้ไปสามารถลดลงได้โดยใช้กรอบสี่เหลี่ยมนี้

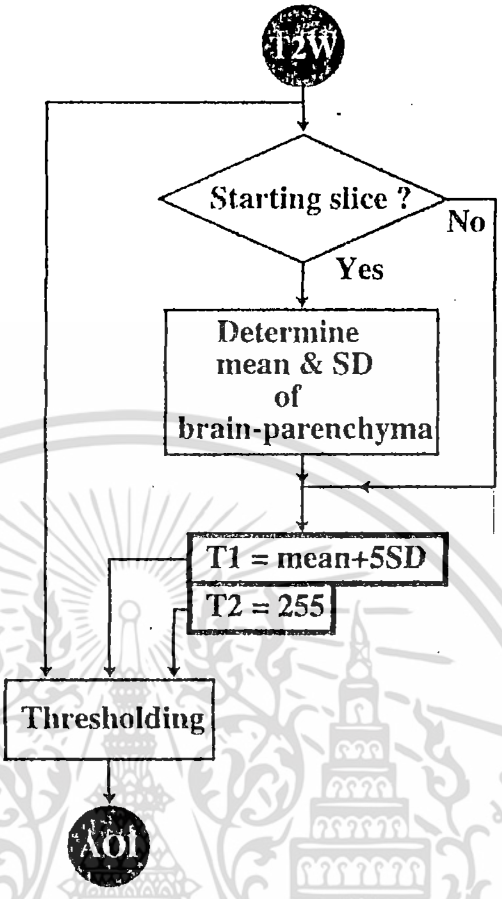
โดยให้ปฏิบัติการต่างๆอยู่ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เท่านั้น

4.3 การแยกเนื้อเยื่อสมอง

ถ้ากลับมาพิจารณาภาพ PD-weighted และ T2-weighted อีกครั้ง จะเห็นว่าส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อสมองซึ่งประกอบด้วย gray matter และ white matter ในภาพ T2-weighted สามารถแยกออกได้ง่ายกว่าในภาพ PD-weighted ในภาพ PD-weighted ส่วนของ white matter มีความเข้มน้อยที่สุด CSF มีความเข้มสูงกว่า white matter แต่ต่ำกว่า gray matter เล็กน้อยหรือเท่ากัน เนื้อเยื่อที่ผิดปกติหรือเนื้อเยื่ออื่นๆจะมีความเข้มสูงสุด แต่บนฮิสโตแกรมความเข้มดังแสดงในรูปที่ 4.6 ทั้งหมดจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มเดียว ดังนั้น จึงเป็นการยากที่จะแยกอย่างใดอย่างหนึ่งออกจากกันโดยใช้ภาพ PD-weighted ในภาพ T2-weighted ส่วนของ white matter มีความเข้มต่ำสุด gray matter มีความเข้มสูงกว่า white matter เล็กน้อย ในขณะที่ CSF และเนื้อเยื่อที่ผิดปกติจะมีความเข้มสูงมาก และเนื้อเยื่ออื่นๆจะมีความเข้มอยู่ระหว่าง gray matter กับเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ ความแตกต่างของความเข้มระหว่างเนื้อเยื่อสมองกับเนื้อเยื่อที่ผิดปกติดีมาก บนฮิสโตแกรมความเข้มของภาพ T2-weighted ส่วนของ gray matter และ white matter จะรวมกลุ่มกันและการกระจายของความเข้มโดยประมาณเป็นแบบปกติ(normal) ในขณะที่ CSF เนื้อเยื่อที่ผิดปกติและเนื้อเยื่ออื่นๆปรากฏอยู่ทางด้านขวาของกลุ่ม gray matter และ white matter ถ้าเราสมมุติว่าการกระจายความเข้มของ gray matter และ white matter เป็นแบบปกติและค่าเฉลี่ย(mean)ของการกระจายคือความเข้มที่จุดยอดของฮิสโตแกรม ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน(standard deviation)ของการกระจายของเนื้อเยื่อสมองสามารถหาได้โดยใช้เพียงสมาชิกที่มีความเข้มต่ำกว่าค่าเฉลี่ย ดังนั้น gray matter และ white matter สามารถแยกออกจาก CSF เนื้อเยื่อที่ผิดปกติ และเนื้อเยื่ออื่นๆโดยใช้การตัดแบ่งระดับความเข้มด้วยระดับกั้นตายตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.7

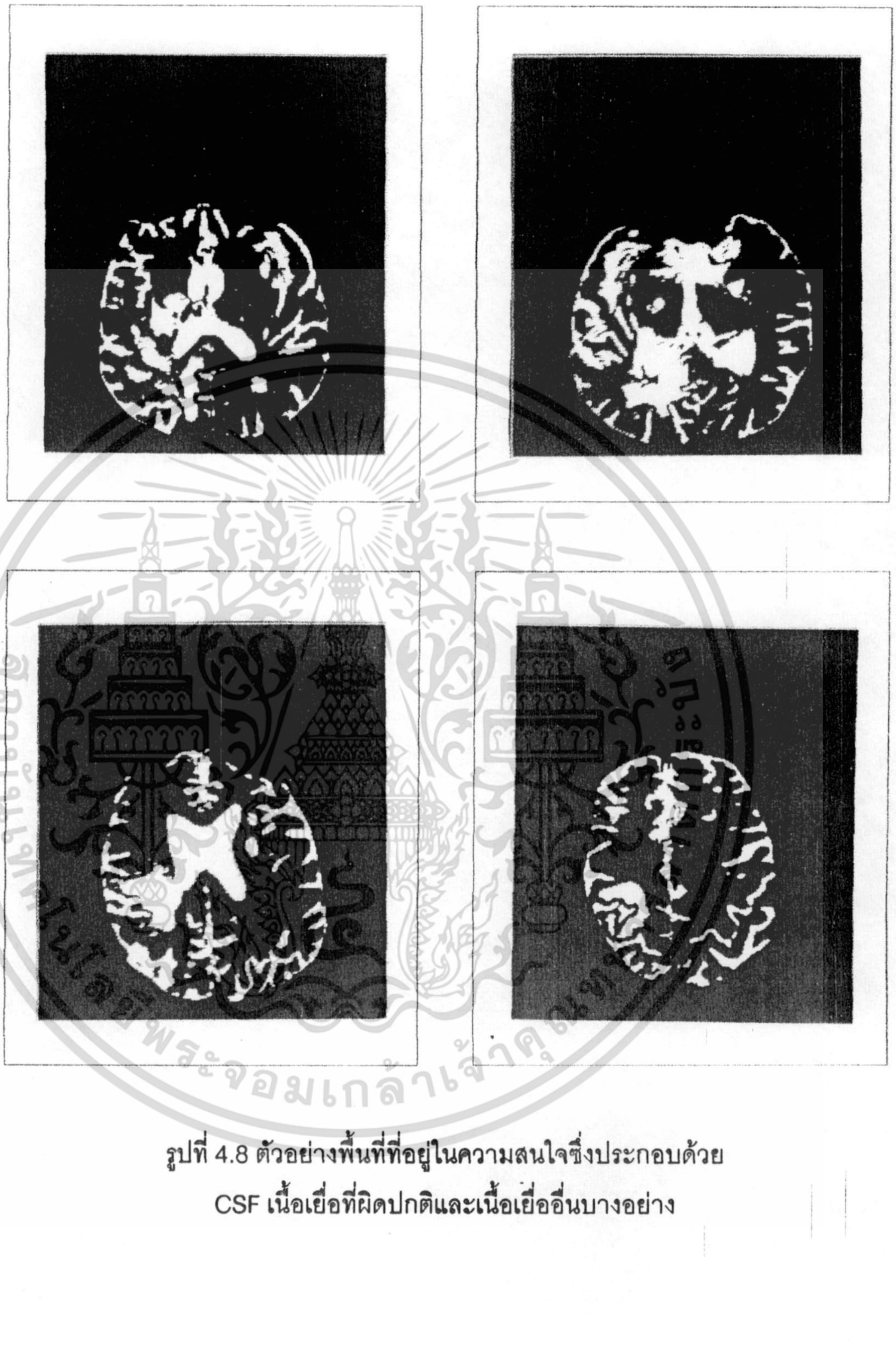


รูปที่ 4.6 ฮิสโตแกรมความเข้มของภาพ PD-weighted
เมื่อได้ตัดส่วนพื้นของภาพและวัตถุที่อยู่นอกสมองออกแล้ว


T2W
Starting slice ?
No
Yes
Determine mean & SD of brain-parenchyma
T1 = mean+5SD
T2 = 255
Thresholding
AOI

รูปที่ 4.7 โฟลว์ชาร์ทของการแยกเนื้อเยื่อสมอง

ในรูปที่ 4.7 ถ้าภาพที่กำลังวิเคราะห์เป็นภาพเริ่มต้น จะต้องหาค่าเฉลี่ยและค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายความเข้มของเนื้อเยื่อสมองจากภาพ T2-weighted และค่าทั้งสองนี้จะต้องนำไปใช้กับภาพทุกภาพโดยไม่ต้องหาใหม่อีก หลังจากนั้นก็กำหนดค่าระดับกั้นสำหรับการตัดแบ่งระดับความเข้มเป็น T1 = mean + 5 SD และ T2 = 255 เมื่อทำการตัดแบ่งระดับความเข้มบนภาพ T2-weighted แล้ว จุดภาพที่มีความเข้มอยู่ระหว่าง T1 และ T2 จะเป็นส่วนของวัตถุที่อยู่ในความสนใจซึ่งประกอบด้วย CSF เนื้อเยื่อที่ผิดปกติและบางส่วนของเนื้อเยื่ออื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 กระบวนการตัดแบ่งองค์ประกอบของภาพถ่ายแต่ละภาพจะจบลงที่จุดนี้



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างพื้นที่ที่อยู่ในความสนใจซึ่งประกอบด้วย CSF เนื้อเยื่อที่ผิดปกติและเนื้อเยื่ออื่นบางอย่าง

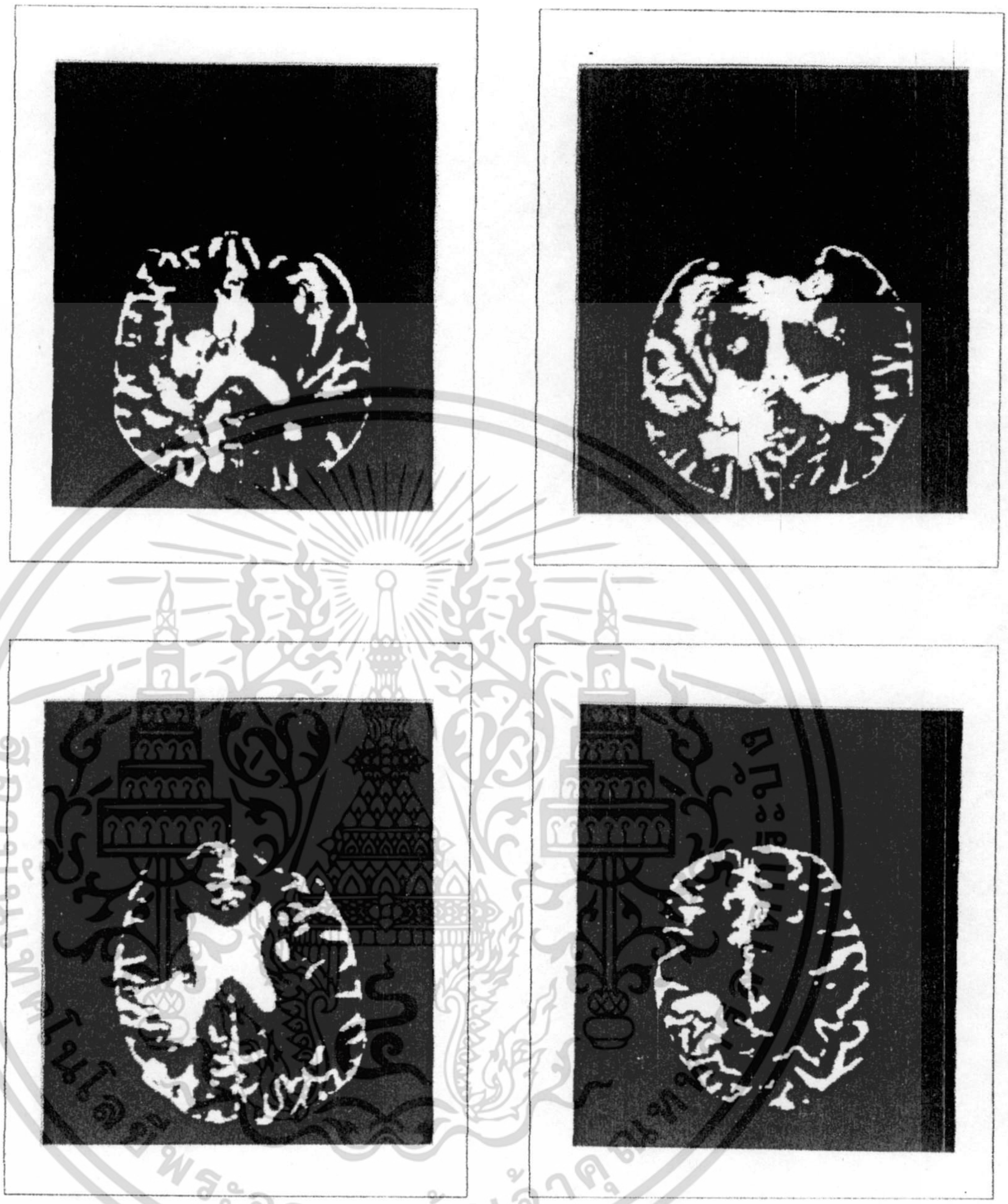
บทที่ 5 การชี้บอกเนื้อเยื่อผิดปกติ

5.1 ลักษณะเด่นที่ใช้ในการชี้บอกเนื้อเยื่อผิดปกติ

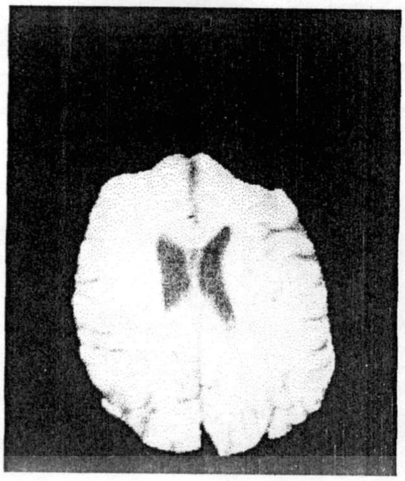
พื้นที่ต่างๆที่อยู่ในความสนใจที่ถูกนำเข้าสู่กระบวนการชี้บอกเนื้อเยื่อผิดปกติอาจประกอบด้วย เนื้อเยื่อผิดปกติ(abnormality) CSF และเนื้อเยื่อบางอย่างที่ยังคงเหลืออยู่ ทั้งหมดนั้นจะมีความเข้มใกล้เคียงกันในภาพ T2-weighted จึงไม่สามารถแยกออกจากกันได้ในภาพประเภทนี้ จากที่เคยกล่าวมาแล้วว่าในภาพ PD-weighted เนื้อเยื่อผิดปกติและเนื้อเยื่อที่เหลืออยู่มีความเข้มใกล้เคียงกัน แต่มีความเข้มสูงกว่าของ CSF ดังนั้น เราสามารถใช้ความเข้มเป็นลักษณะเด่นเพื่อแยก CSF ออกไป เนื่องจากเนื้อเยื่อผิดปกติกับเนื้อเยื่อที่เหลือมีความเข้มใกล้เคียงกันทั้งในภาพ PD-weighted และ T2-weighted เนื้อเยื่อทั้งสองจึงไม่อาจแยกออกจากกันได้โดยใช้คุณสมบัติความเข้ม อย่างไรก็ดี เนื้อเยื่อที่เหลือโดยปกติจะปรากฏในบางพื้นที่ของสมองและปรากฏเป็นคู่และสมมาตรกันระหว่างเส้นแกนสมอง ดังนั้นเราจึงสามารถใช้คุณสมบัติเชิงภูมิศาสตร์ในการแยกเนื้อเยื่อผิดปกติออกจากเนื้อเยื่อที่เหลือ

การแยก CSF โดยใช้คุณสมบัติของความเข้มในภาพ PD-weighted เราสามารถใช้การตัดแบ่งระดับความเข้มด้วยค่าระดับกั้นตายตัว แต่การกำหนดตำแหน่งของค่าระดับกั้นให้พอดีมีความสำคัญมาก ถ้าค่าระดับกั้นถูกกำหนดขึ้นในตำแหน่งที่ผิด การแยก CSF ก็จะไม่แม่นยำและบางครั้งอาจไม่ประสบความสำเร็จ โดยปกติ ค่าระดับกั้นหาได้จากการมองที่ฮิสโตแกรมความเข้มของภาพเพื่อหาร่องที่อยู่ระหว่างยอดสองยอด หรือโดยการหาค่าเฉลี่ยและการเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายแบบปกติของวัตถุหนึ่งแล้วกำหนดค่าระดับกั้นโดยการใช้ค่าเฉลี่ยและการเบี่ยงเบนมาตรฐาน แต่โชคไม่ดีที่ในภาพ PD-weighted ความเข้มของ CSF เนื้อเยื่อผิดปกติและเนื้อเยื่อที่เหลือได้รวมตัวเป็นกลุ่มเดียวกัน ดังนั้นการกำหนดค่าระดับกั้นจึงไม่สามารถทำได้โดยใช้ภาพนี้ ในภาพ T2-weighted เนื้อเยื่อผิดปกติและ CSF มีความเข้มใกล้เคียงกัน ดังนั้นเราไม่สามารถหาค่าระดับกั้นโดยใช้ภาพ T2-weighted เช่นกัน

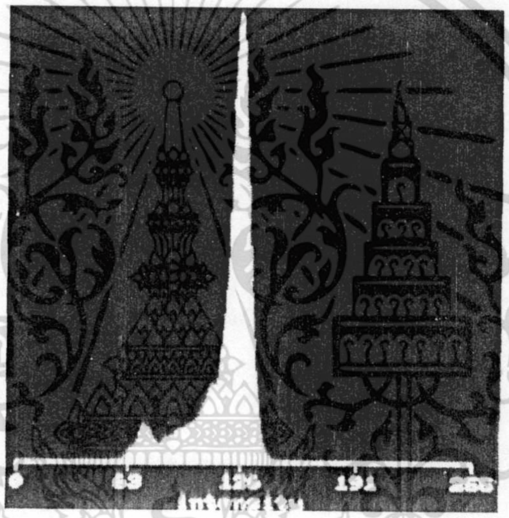
มีเทคนิคอันหนึ่งใช้ในการสร้างภาพแบบใหม่โดยการนำความเข้มของภาพ PD-weighted ลบด้วยความเข้มของภาพ T2-weighted โดยเรียกภาพที่ได้ใหม่ว่า BR-density ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ในภาพนี้ ความเข้มของเนื้อเยื่อสมองมีค่าสูงกว่าของ CSF มาก และการกระจายความเข้มของเนื้อเยื่อสมองจะรวมกลุ่มกันเกือบจะเป็นการกระจายแบบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ในขณะที่ความเข้มของเนื้อเยื่อผิดปกติกระจัดกระจายอยู่ระหว่าง CSF และเนื้อเยื่อสมอง ภาพนี้จะมีประโยชน์มากในการกำหนดค่าระดับกั้นของ CSF



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างพื้นที่ที่อยู่ในความสนใจซึ่งประกอบด้วย
CSF เนื้อเยื่อที่ผิดปกติและเนื้อเยื่ออื่นบางอย่าง



รูปที่ 5.1 ภาพ BR-density



รูปที่ 5.2 ฮิสโตแกรมความเข้มของภาพ BR-density

ในทางปฏิบัติ ความเข้มของภาพต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ในระบบนี้จะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 255 ดังนั้น เมื่อลบความเข้มของภาพ T2-weighted ออกจากภาพ PD-weighted แล้ว ต้องให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 255 ซึ่งทำได้โดยนำผลที่ได้จากการลบความเข้มมาบวกด้วยค่าคงที่ จากการทดลองพบว่าค่า 64 เป็นค่าที่เหมาะที่สุดในการนำมาบวกสำหรับทุกภาพ ดังนั้น ภาพ BR-density จึงสร้างขึ้นได้จากสมการต่อไปนี้

$$B = 64 + P - T$$

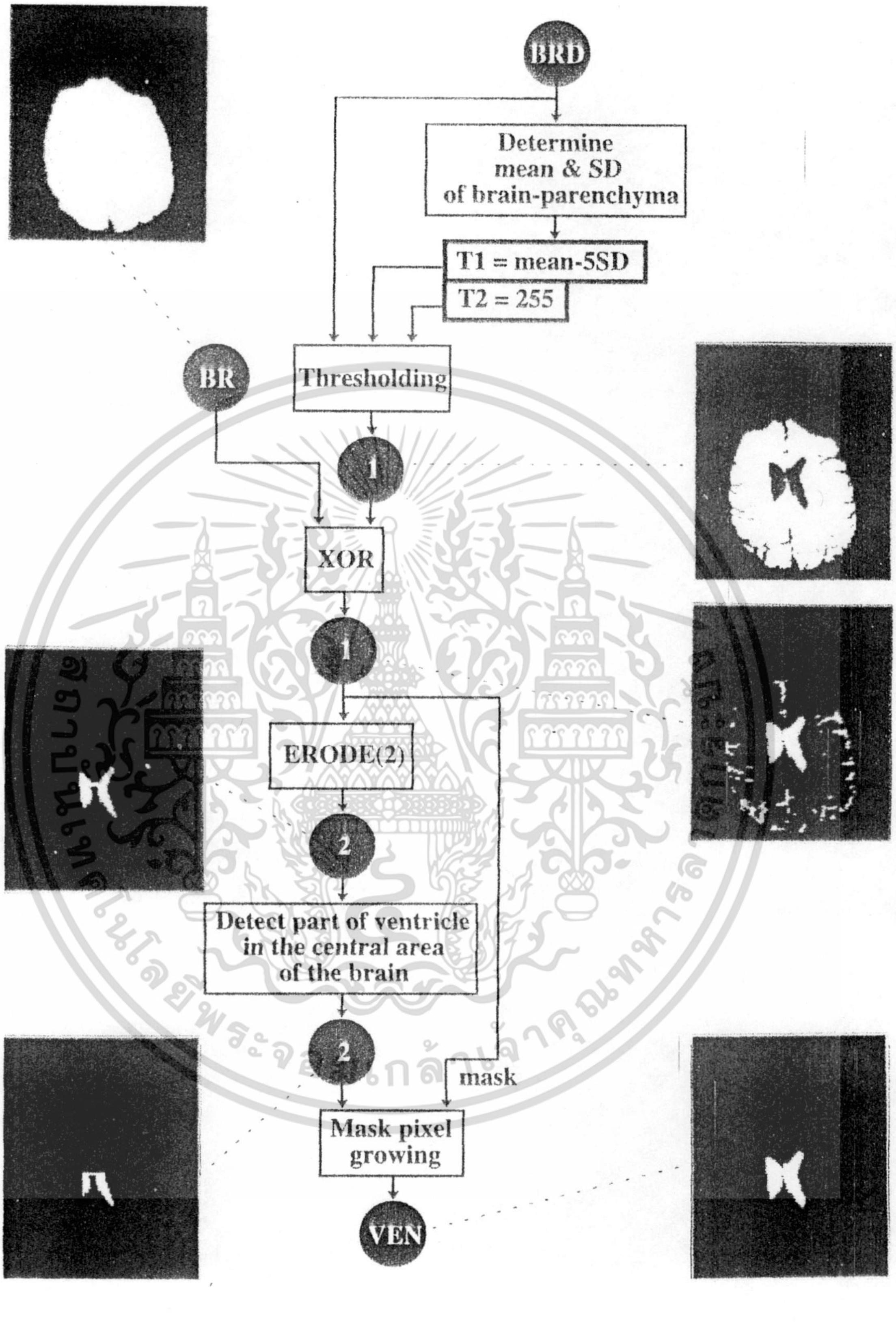
โดยที่ B คือความเข้มของภาพ BR-density

P คือความเข้มของภาพ PD-weighted

และ T คือความเข้มของภาพ T2-weighted

ปัญหาในการหาค่าระดับกั้นของ CSF ในภาพ PD-weighted สามารถแก้ได้โดยใช้ภาพ BR-density ในภาพ BR-density ของภาพเริ่มต้น โพรง(lateral ventricle)ที่ปรากฏบริเวณกลางพื้นที่ของสมองจะถูกแยกออกมา ในโพรงนี้จะเต็มไปด้วย CSF ดังนั้นถ้านำเอาตัวอย่างของ CSF ในโพรงนี้ของภาพ PD-weighted ออกมาได้ ก็จะสามารถหาค่าเฉลี่ยและการเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายของ CSF ได้ และจะสามารถหาค่าระดับกั้นของ CSF ได้ ขั้นตอนในการแยกโพรงที่อยู่กลางพื้นที่สมองออกมาแสดงในรูปที่ 5.3

ภาพเอ้าท์พุทที่ได้จากการแยกโพรงที่อยู่กลางสมองคือภาพ VEN จะเป็นภาพแบบไบนารีซึ่งจะใช้เป็นหน้ากาก(mask)สำหรับเก็บตัวอย่าง CSF ในภาพ PD-weighted เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยและการเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายความเข้ม แล้วจึงนำไปใช้เพื่อกำหนดค่าระดับกั้นสำหรับ CSF ในภาพ PD-weighted ต่อไป ค่าระดับกั้นที่ได้จากภาพเริ่มต้นนี้จะถูกนำไปใช้กับภาพสมองในทุกภาพต่อไป


BRD
Determine mean & SD of brain-parenchyma
T1 = mean-5SD
T2 = 255
BR
Thresholding
1
XOR
1
ERODE(2)
2
Detect part of ventricle in the central area of the brain
2
mask
Mask pixel growing
VEN

รูปที่ 5.3 การแยกโพรงที่อยู่กลางสมองออก

5.2 เทคนิคเชิงภูมิศาสตร์ที่ใช้ในการชี้บอกเนื้อเยื่อผิดปกติ

กลับไปที่เทคนิคการแยกเนื้อเยื่อผิดปกติออกจากเนื้อเยื่อที่เหลือ ได้เคยกล่าวมาแล้วว่า เนื้อเยื่อทั้งสองชนิดไม่สามารถแยกออกจากกันได้โดยใช้คุณสมบัติของความเข้ม แต่สามารถทำได้โดยใช้คุณสมบัติเชิงภูมิศาสตร์ ถ้าเราพิจารณาภาพสมองในทุกๆภาพจะเห็นว่ารูปร่างของสมองและองค์ประกอบของมันเปลี่ยนแปลงจากภาพหนึ่งไปอีกภาพหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับภาพสมองที่อยู่ต่ำๆ ในภาพสมองที่อยู่ต่ำบางภาพ บริเวณพื้นที่ส่วนกลางและส่วนหน้าของสมองจะมีวัตถุบางชนิดปรากฏขึ้นเป็นคู่และสมมาตรกับแนวเส้นแกนสมอง วัตถุเหล่านี้ตามปกติมีความเข้มสูงคล้ายกับเนื้อเยื่อผิดปกติทั้งในภาพ PD-weighted และ T2-weighted ในภาพเริ่มต้นซึ่งจะต้องประกอบด้วยโพรงกลางสมอง(lateral ventricle)ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดและภาพบางภาพที่ใกล้กับภาพเริ่มต้นมีบางส่วนของ gray matter บริเวณพื้นที่ส่วนกลางของส่วนด้านหน้าของสมองก็มีความเข้มสูงทั้งในภาพ PD-weighted และ T2-weighted เช่นกัน นอกจากนี้ ความเข้มของเนื้อเยื่อรอบขอบของโพรงกลางสมองก็คล้ายกับเนื้อเยื่อผิดปกติ ในภาพสมองส่วนบนบางภาพ มีบางส่วนของ gray matter ซึ่งอยู่ใกล้กับเส้นแนวแกนของสมอง มีความเข้มสูงใกล้เคียงเนื้อเยื่อผิดปกติด้วย ดังนั้นในการชี้บอกเนื้อเยื่อผิดปกติจะต้องตรวจสอบสมมาตรของวัตถุในบริเวณดังกล่าวและกำจัดวัตถุที่ปรากฏเป็นคู่ออกไปจากพื้นที่ในความสนใจ

ในทางปฏิบัติ ภาพสมองต่างๆจะถูกแบ่งออกเป็นสามกลุ่มตามลักษณะการปรากฏของวัตถุในพื้นที่สมอง ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ภาพในกลุ่ม 1 ประกอบด้วยภาพเริ่มต้นและภาพที่อยู่ติดกับภาพเริ่มต้นทั้งด้านบนและล่าง ภาพในกลุ่มนี้จะประกอบด้วยโพรงกลางสมอง และมี gray matter ในส่วนด้านหน้าของสมอง ภาพในกลุ่ม 2 ประกอบด้วยภาพสมองส่วนบนที่เหลือทั้งหมด ภาพสมองในกลุ่มนี้ มีบางส่วนของ gray matter ที่อยู่บริเวณเส้นแกนสมองมีความเข้มสูงใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ ภาพในกลุ่ม 3 ประกอบด้วยภาพสมองส่วนล่างที่เหลือทั้งหมด ภาพในกลุ่มนี้มีวัตถุบางอย่างปรากฏขึ้นเป็นคู่บริเวณส่วนหน้าของสมองและสมมาตรกับเส้นแกนสมอง ดังนั้น วิธีการชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติในแต่ละกลุ่มจึงต่างกัน

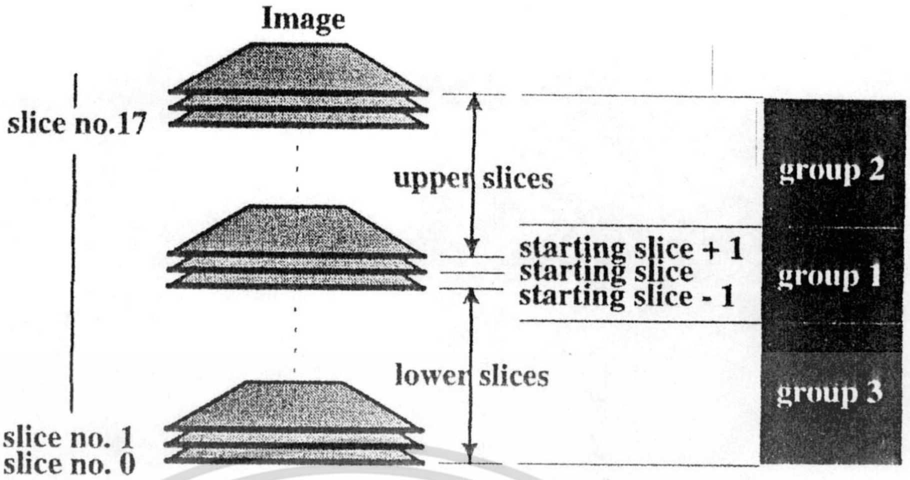
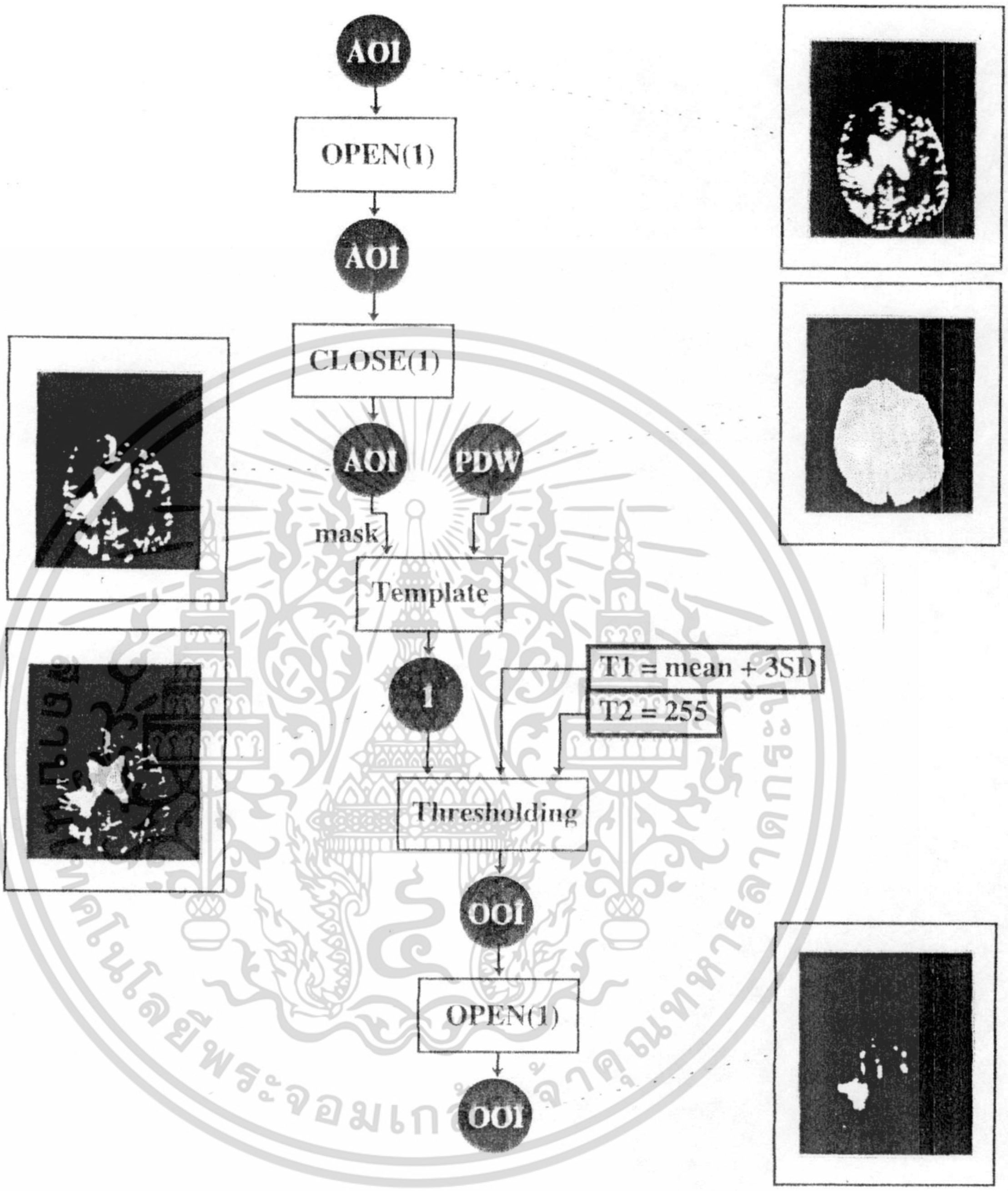


Image
slice no.17
upper slices
starting slice + 1
starting slice
starting slice - 1
lower slices
slice no. 1
slice no. 0
group 2
group 1
group 3

รูปที่ 5.4 การแบ่งภาพสมองออกเป็นสามกลุ่มสำหรับการชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ

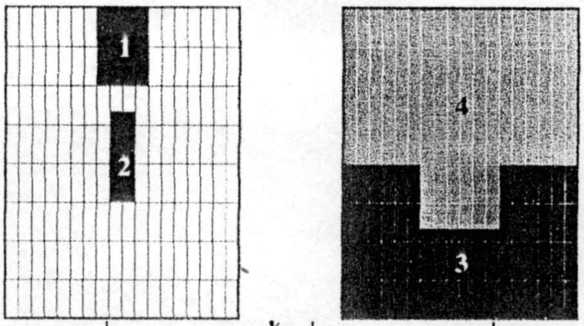
5.3 การชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ

จากกระบวนการล่าสุดในการแยกเนื้อเยื่อสมอง พื้นที่ในความสนใจที่เหลือในภาพถูกเก็บในไฟล์ AOI ประกอบด้วย CSF เนื้อเยื่อที่ผิดปกติและเนื้อเยื่อที่เหลือบางอย่าง การชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติในพื้นที่ในความสนใจแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรก ส่วนของ CSF จะถูกแยกออกโดยเทคนิคการตัดแบ่งระดับความเข้ม กระบวนการในขั้นตอนนี้สำหรับภาพสมองในทุกกลุ่มจะเหมือนกัน ในขั้นตอนที่สอง เนื้อเยื่อที่ผิดปกติจะถูกแยกออกโดยเทคนิคเชิงภูมิศาสตร์ กระบวนการในขั้นตอนนี้สำหรับภาพสมองในแต่ละกลุ่มจะแตกต่างกัน สำหรับวิธีแยก CSF จากวัตถุในพื้นที่ในความสนใจในขั้นตอนที่หนึ่งแสดงในรูปที่ 5.5


AOI
OPEN(1)
AOI
CLOSE(1)
AOI
PDW
mask
Template
1
T1 = mean + 3SD
T2 = 255
Thresholding
OOI
OPEN(1)
OOI

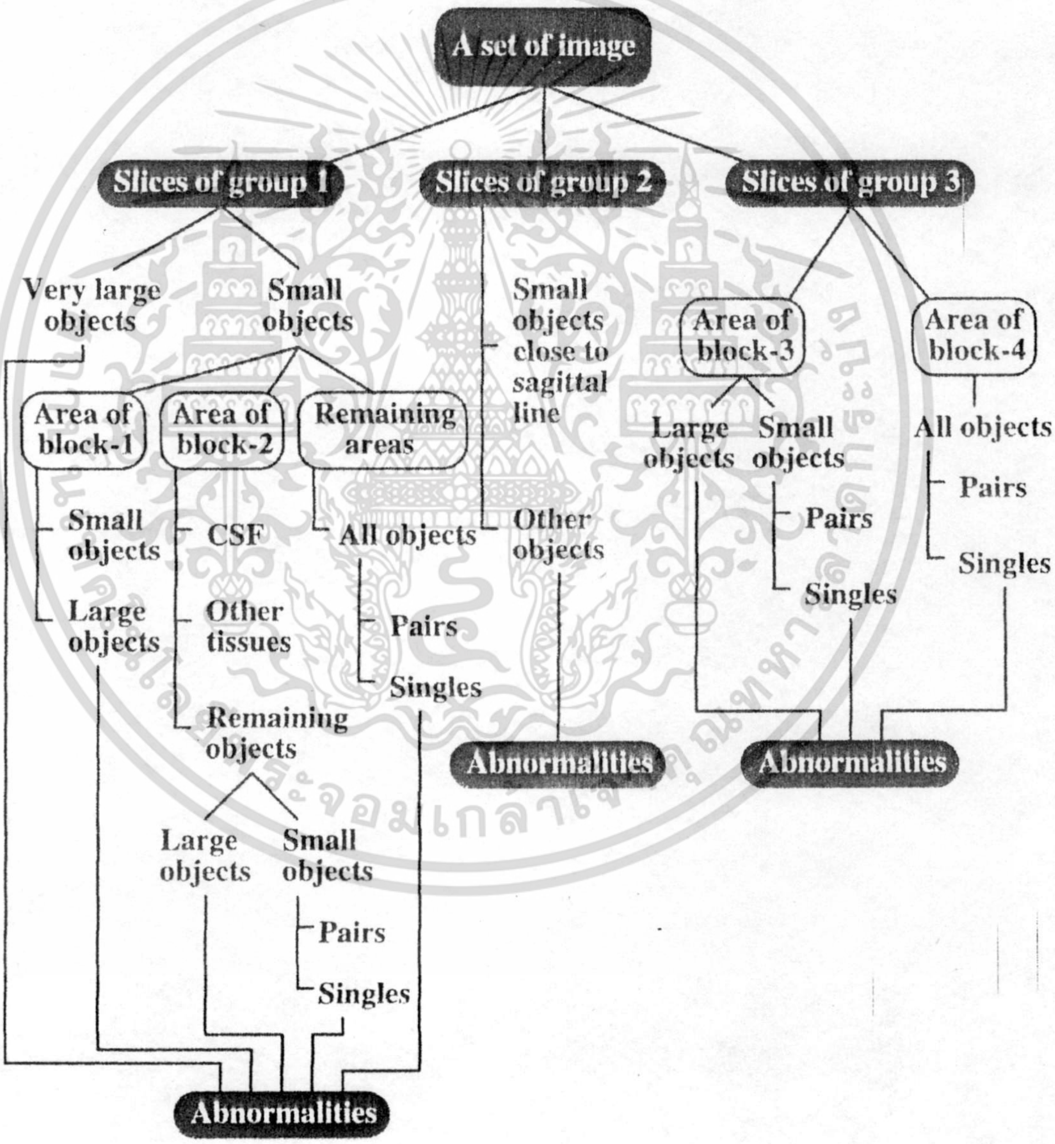
รูปที่ 5.5 วิธีแยก CSF ออกจากพื้นที่ในความสนใจ

ในขั้นตอนที่สองเป็นการชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ ได้มีการแบ่งพื้นที่ของสมองออกเป็นสี่ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 5.6 พื้นที่หมายเลข 1 และ 2 (block-1 และ block-2)ใช้สำหรับภาพสมองกลุ่ม 1 ส่วนพื้นที่หมายเลข 3 และ 4 (block-3 และ block-4)ใช้สำหรับภาพสมองกลุ่ม 2



รูปที่ 5.6 การแบ่งพื้นที่สมองออกเป็นสี่ส่วน

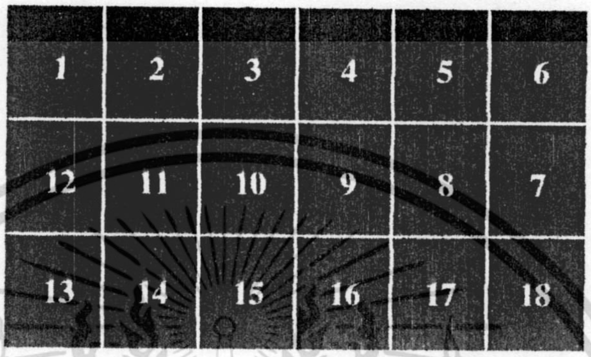
หลักการของการชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติแสดงในรูปที่ 5.7


A set of image
Slices of group 1
Slices of group 2
Slices of group 3
Very large objects
Small objects
Area of block-1
Area of block-2
Remaining areas
Small objects
Large objects
CSF
Other tissues
Remaining objects
Large objects
Small objects
Pairs
Singles
All objects
Pairs
Singles
Small objects close to sagittal line
Other objects
Area of block-3
Area of block-4
Large objects
Small objects
Pairs
Singles
All objects
Pairs
Singles
Abnormalities
Abnormalities
Abnormalities

รูปที่ 5.7 หลักการของการชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติจากวัตถุที่อยู่ในความสนใจโดยใช้เทคนิคเชิงภูมิศาสตร์และมอร์โฟโลยี

บทที่ 6 การทดลอง

ในการทดลองได้ใช้ภาพสมองทั้งหมด 6 ชุด ในแต่ละชุดประกอบด้วยภาพสมองจำนวน 18 ภาพ และในการแสดงผลจะเรียงลำดับภาพตามหมายเลขดังแสดงในรูปที่ 6.1

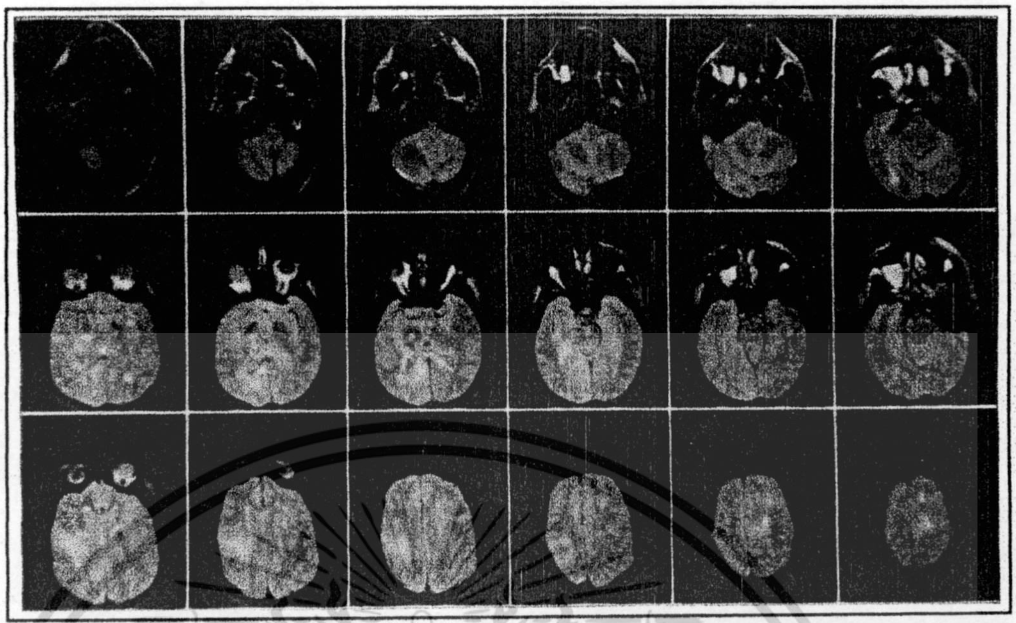


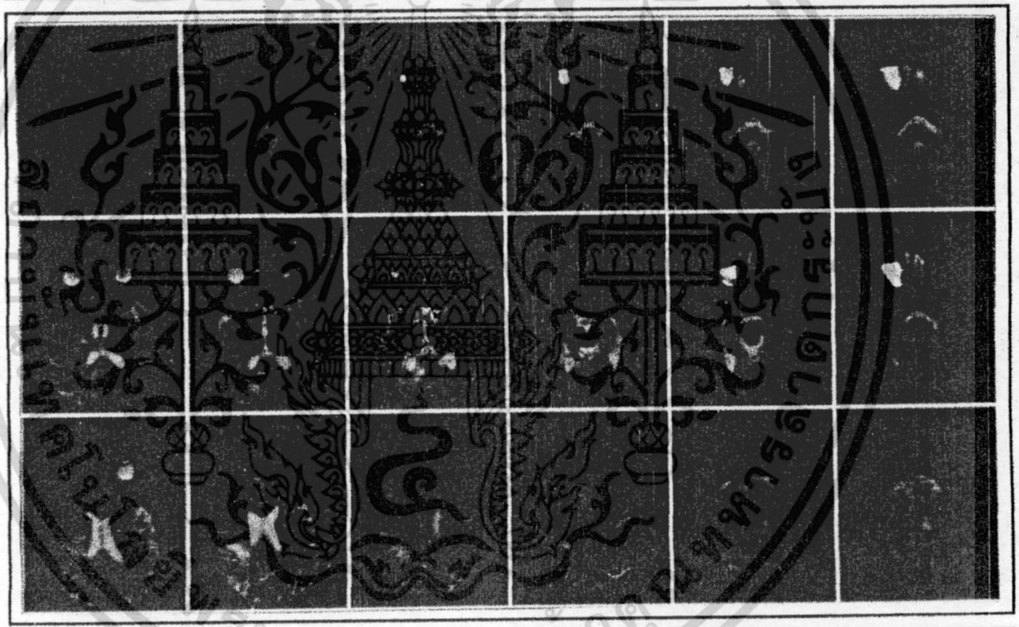
1	2	3	4	5	6
12	11	10	9	8	7
13	14	15	16	17	18

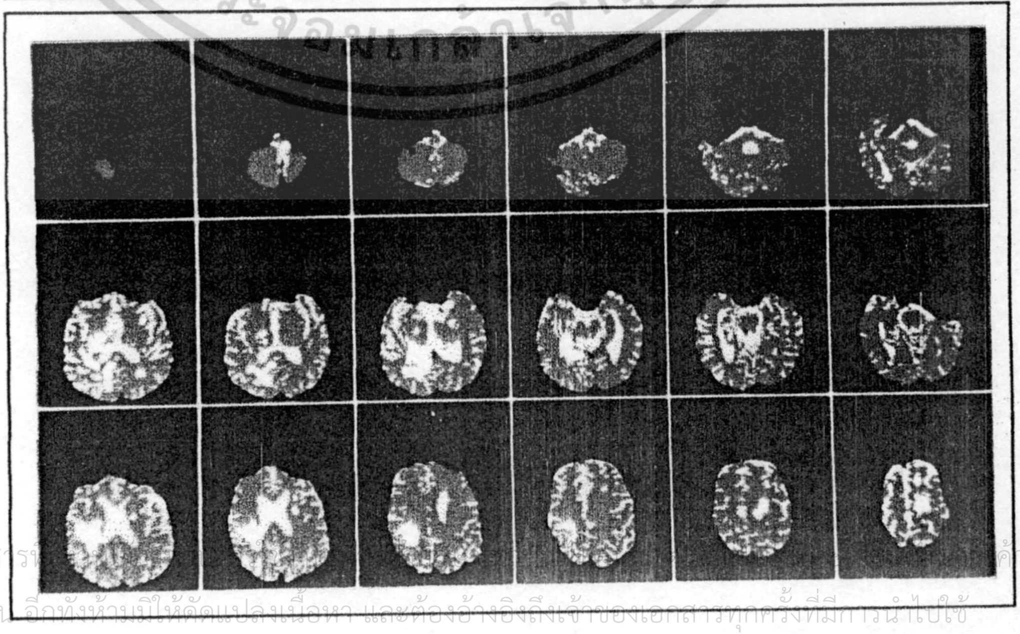
รูปที่ 6.1 แสดงลำดับการจัดเรียงภาพสมองในแต่ละชุด

ผลจากการทดลองกับภาพสมองทั้ง 6 ชุดจะเป็นดังต่อไปนี้ โดยในแต่ละการทดลองมีภาพชุดบนเป็น PD-weighted ชุดกลางเป็น T2-weighted และชุดล่างเป็นผลจากการวิเคราะห์

การทดลองที่ 1

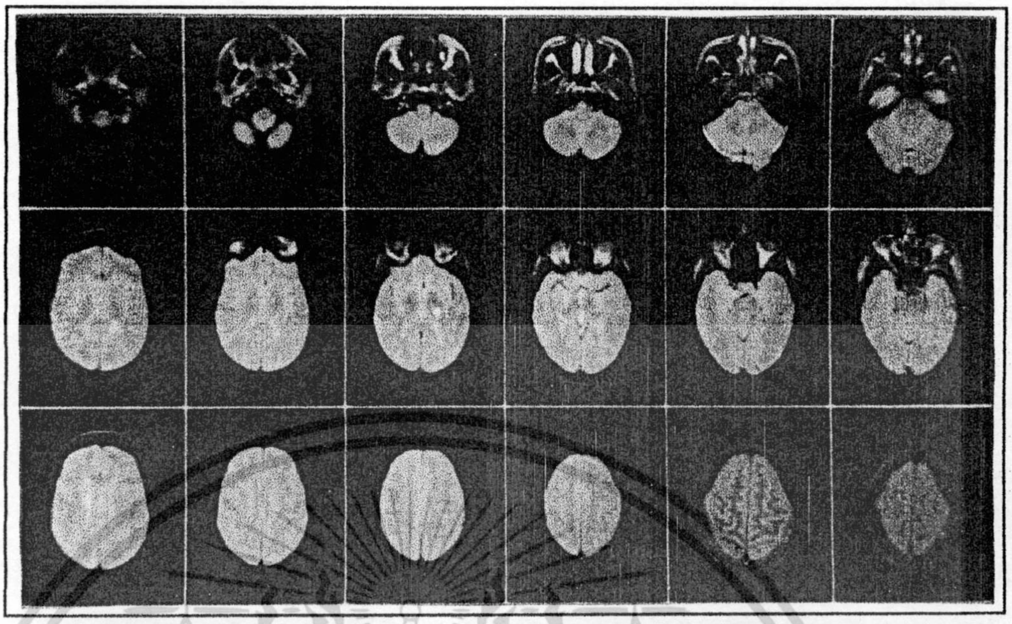


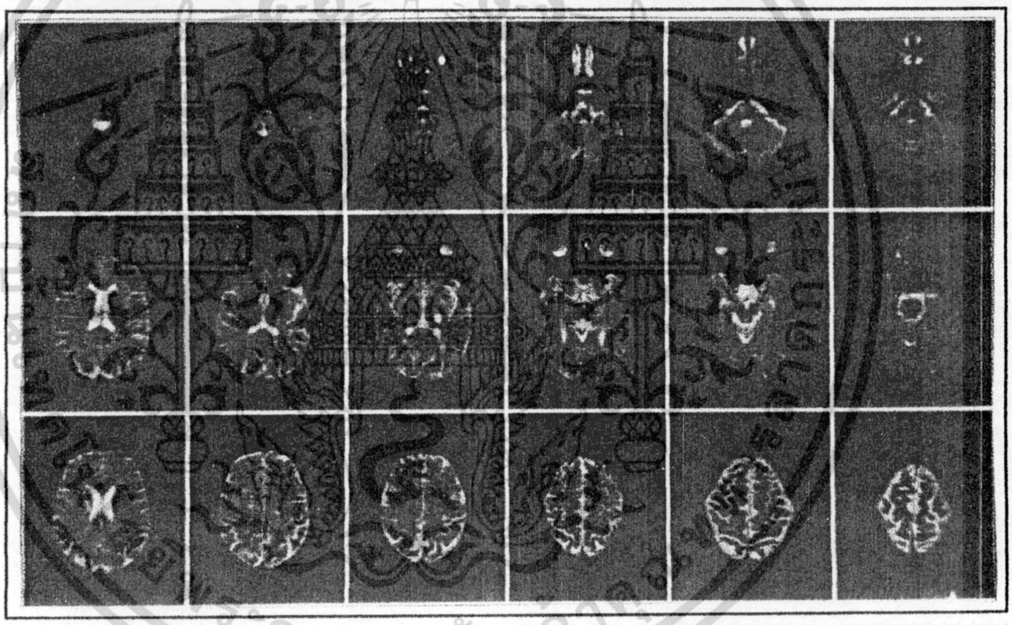


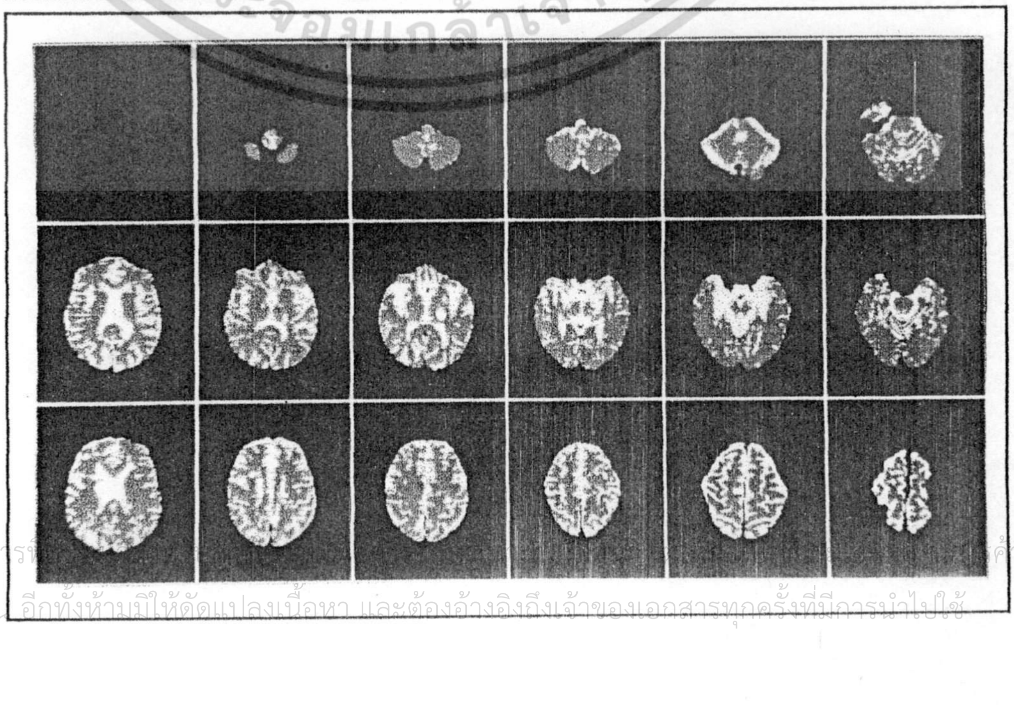


เอกสารนี้เป็นเอกสาร ค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 2

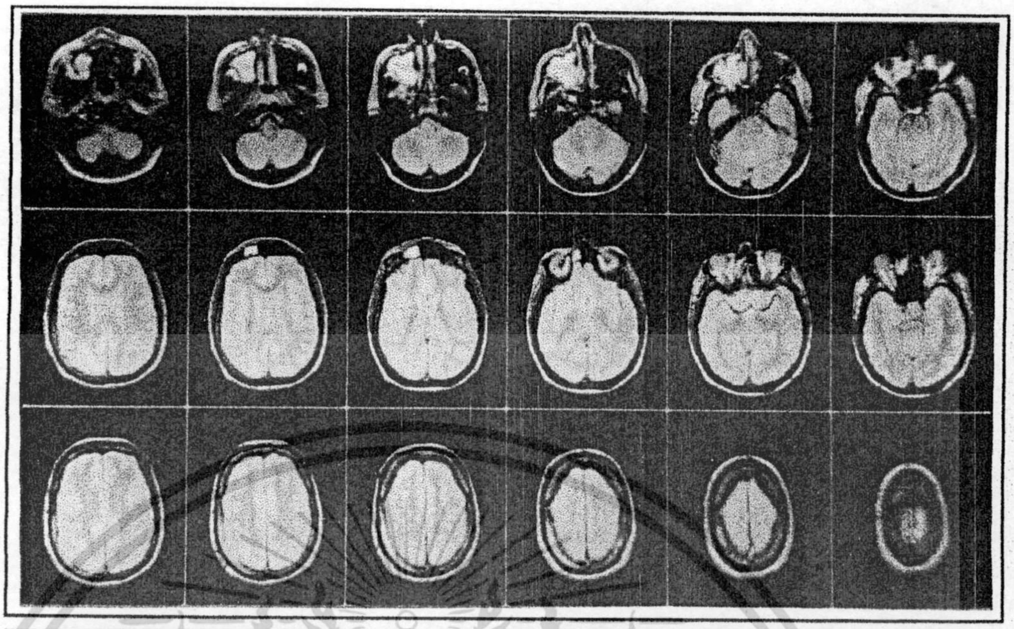


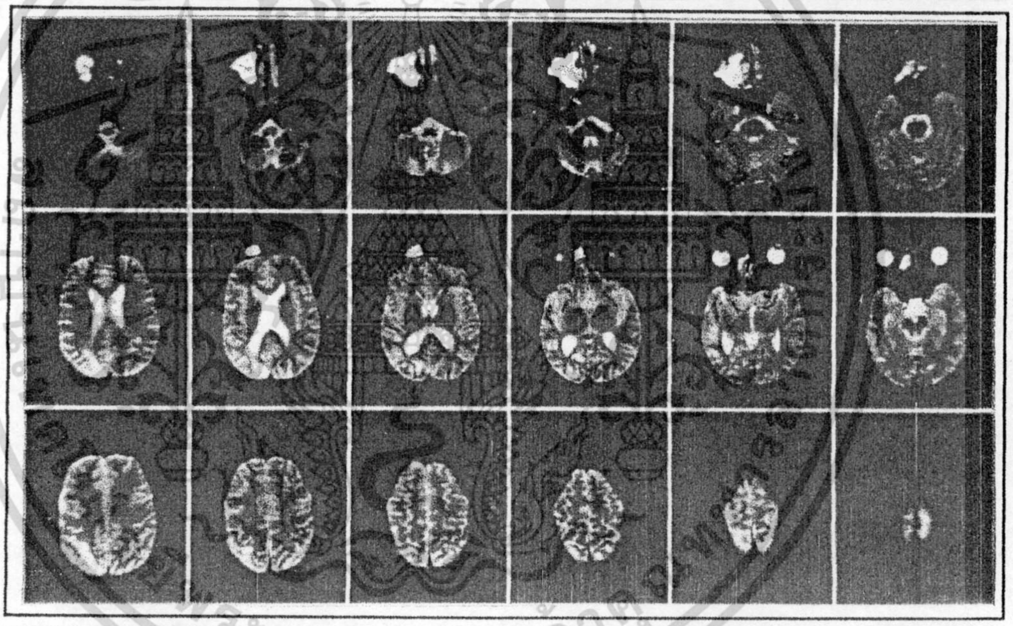


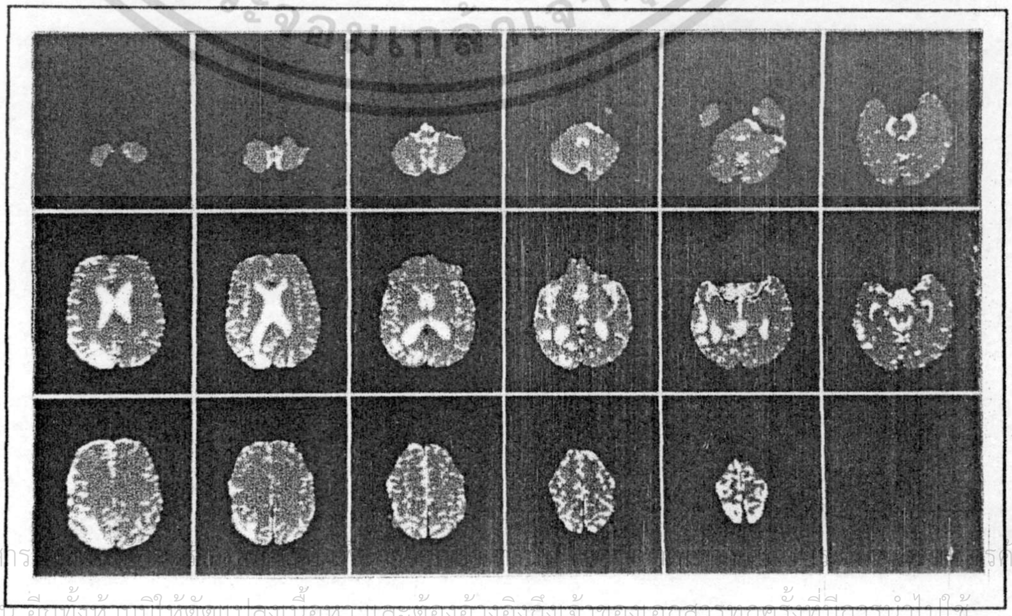


เอกสารนี้เป็นเอกสาร ค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

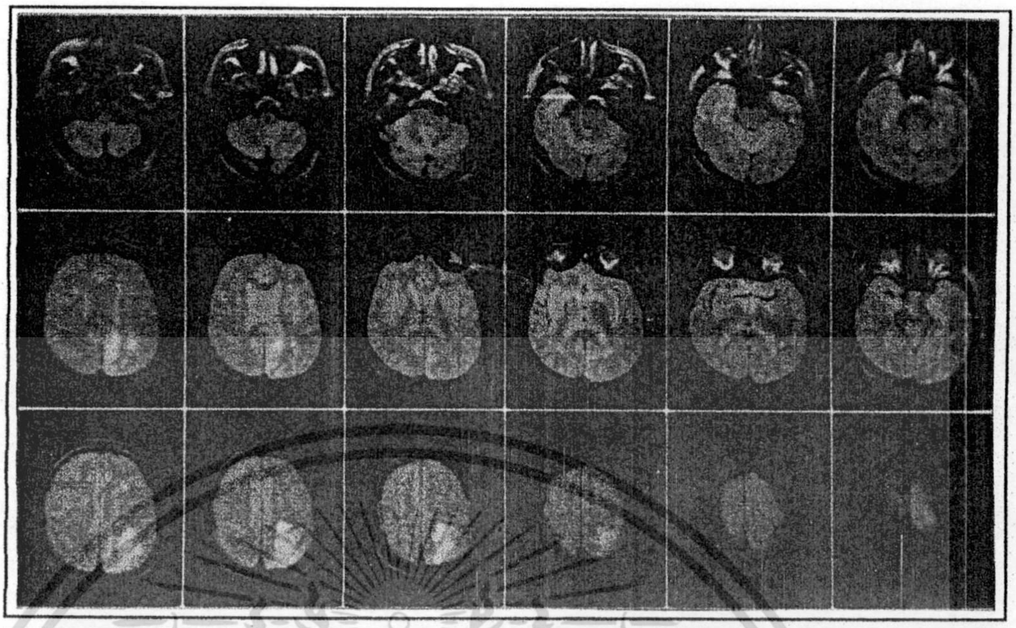
การทดลองที่ 3

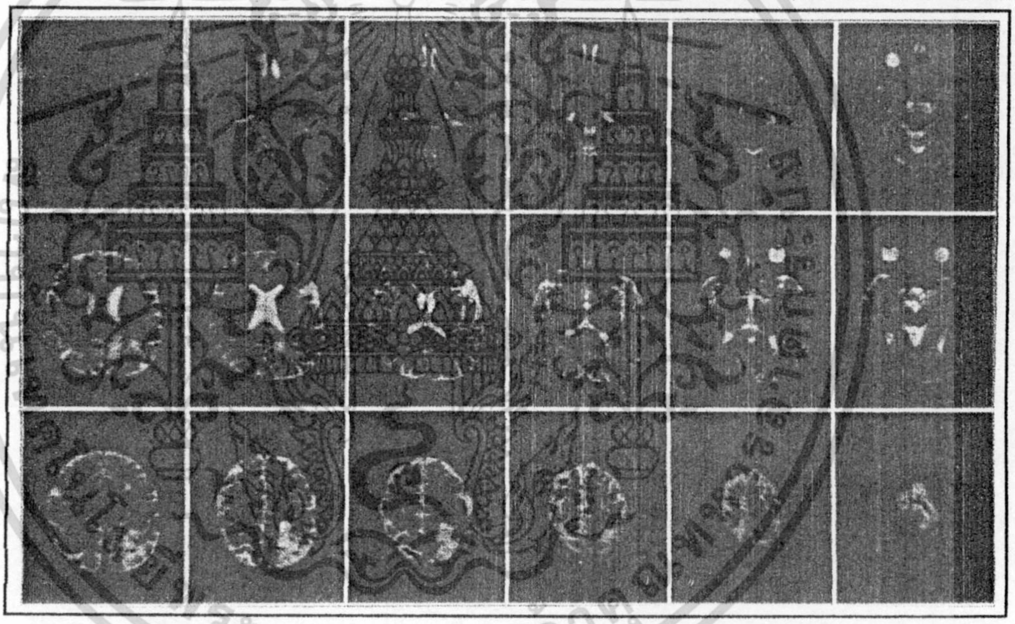


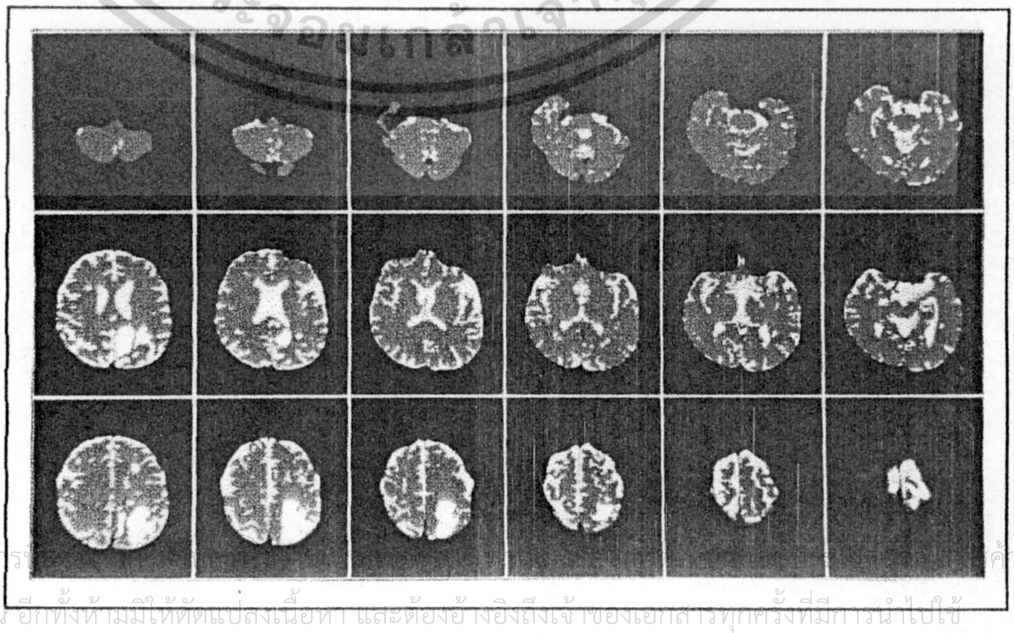




การทดลองที่ 4

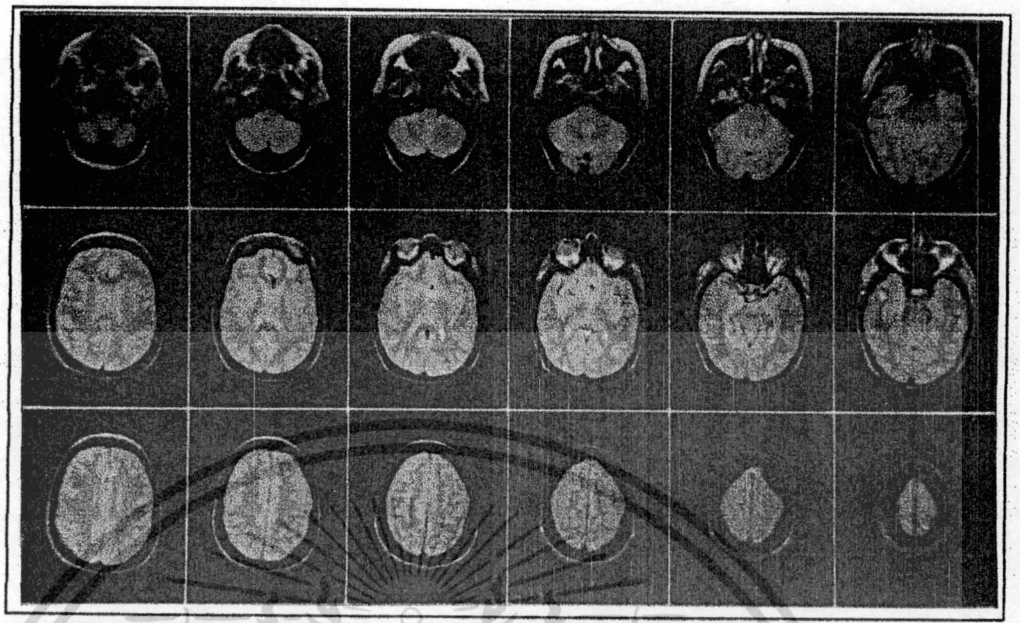


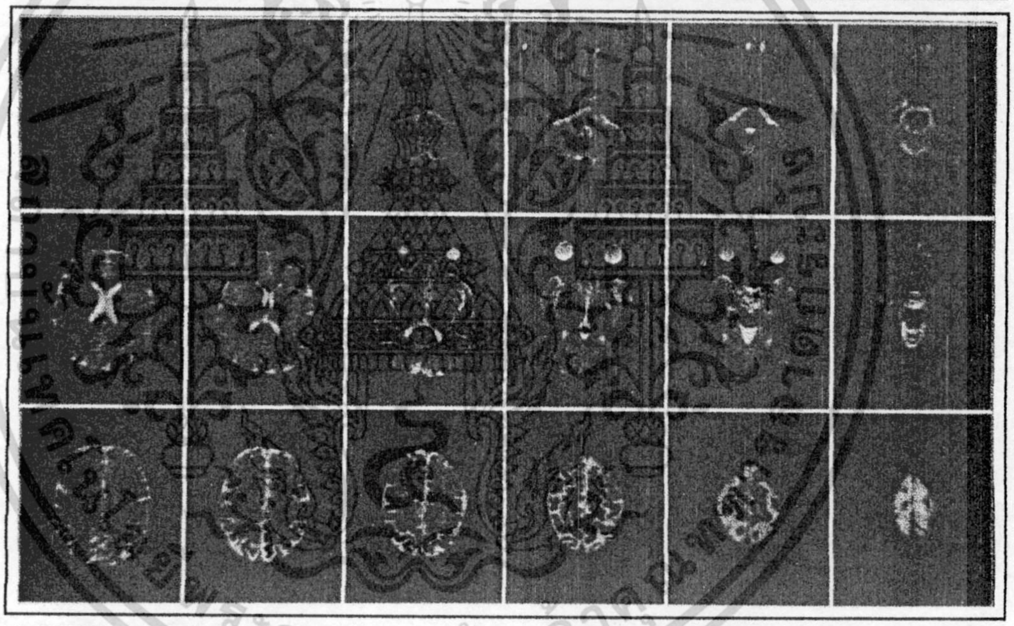


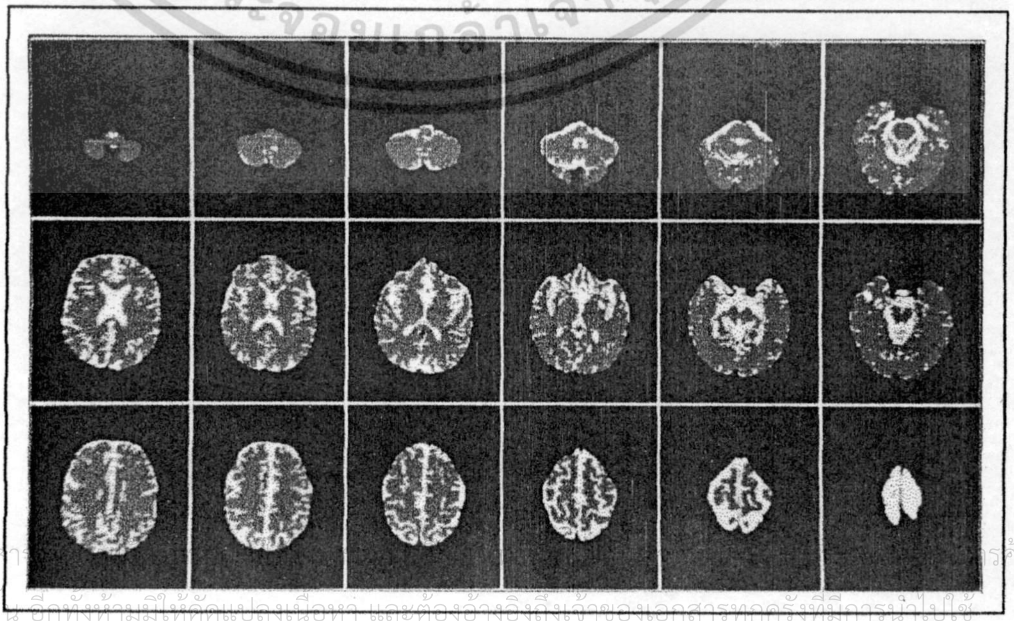


เอกสารนี้เป็นเอกสาร ... ค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 5

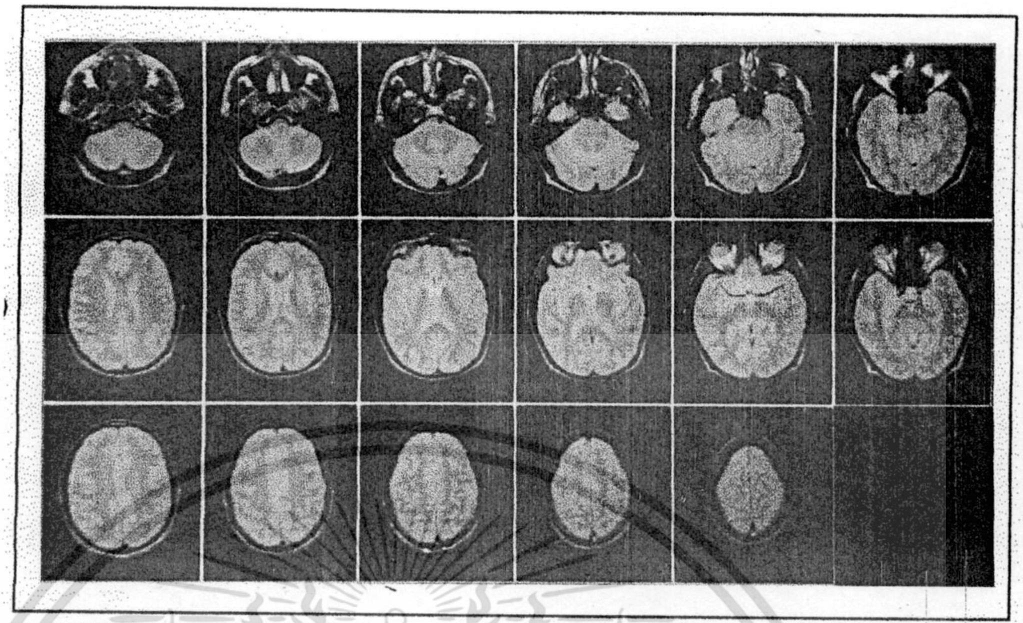


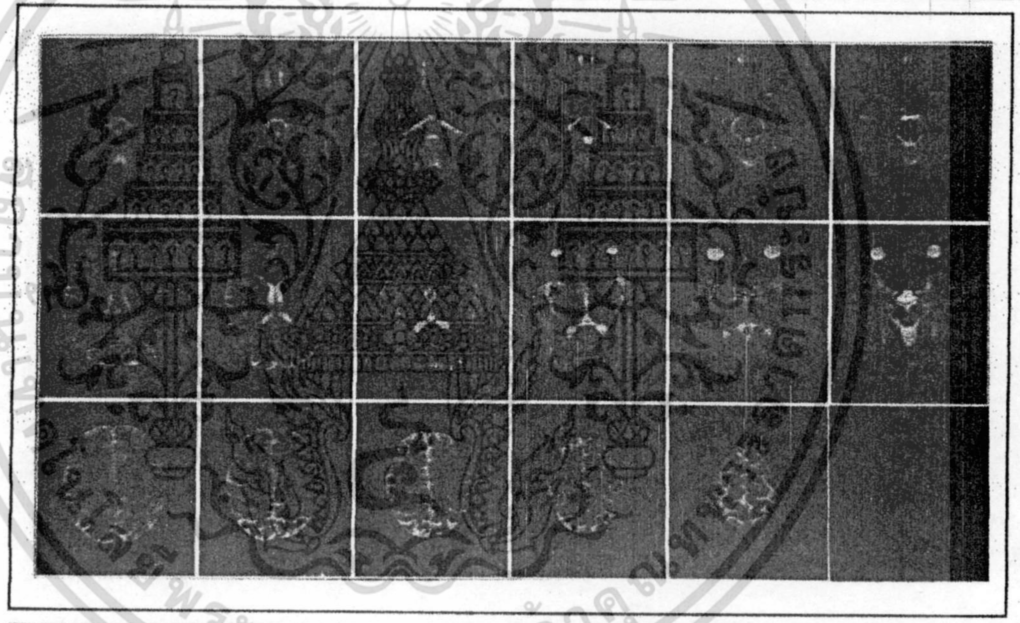


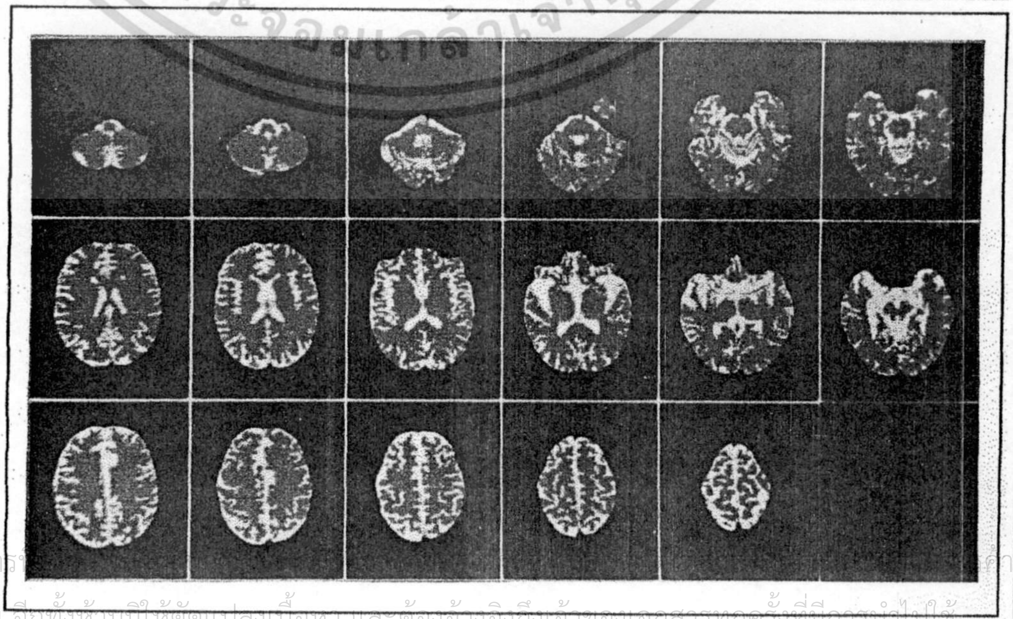


เอกสารนี้เป็นเอกสาร รค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 6







บทที่ 7 สรุป

เมื่อได้ออกแบบระบบการวิเคราะห์เนื้อเยื่อผิดปกติในสมองเรียบร้อยแล้ว ได้ทำการทดลองกับภาพสมองจำนวน 6 ชุด โดยภาพสมองที่ได้มาทั้ง 6 ชุดนี้ไม่มีข้อมูลอื่นประกอบมาด้วยอย่างเช่น TR (repetition time) และ TE (echo time) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการสร้างภาพ MRI ซึ่งจากการสังเกตพบว่าภาพสมองที่ได้มาทั้ง 6 ชุดนั้นน่าจะมีค่า TR และ TE ที่แตกต่างกัน เนื่องจากความเข้มของ gray matter, white matter และ CSF ในภาพ PD-weighted มีความแตกต่างกัน ในการสร้างภาพ MRI ของสมองอาจจะกำหนดค่า TR และ TE ที่แตกต่างกันเพื่อที่จะทำการค้นหาเนื้อเยื่อที่ผิดปกติคนละประเภทกัน ดังนั้นในการออกแบบระบบวิเคราะห์ภาพสมองจึงต้องมีการประนีประนอมกันสำหรับภาพที่มีค่า TR และ TE แตกต่างกัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความแม่นยำในการวิเคราะห์เลวลง ในภาพ PD-weighted บางชุด ความเข้มของ CSF ใกล้เคียงกับของเนื้อเยื่อที่ผิดปกติ ถ้าภาพชุดนั้นสร้างขึ้นจากการกำหนดค่า TR ที่ยาวนาน ดังนั้น ถ้าระบบวิเคราะห์ถูกออกแบบให้มีความไวมากเกินไปในการตรวจจับเนื้อเยื่อที่ผิดปกติที่มีขนาดพื้นที่เล็กซึ่งอาจมีขนาดเดียวกับพื้นที่ของ CSF ความผิดพลาดในผลการวิเคราะห์อาจเกิดขึ้นได้ซึ่งพบเห็นในบางการทดลอง เนื่องจากระบบวิเคราะห์นี้ได้ใช้เทคนิคเชิงภูมิศาสตร์บางอย่างในการตรวจหาวัตถุที่ปรากฏเป็นคู่และสมมาตรกันระหว่างเส้นแนวแกนสมอง ถ้าภาพที่ได้มาเอียงโดยเส้นแนวแกนสมองไม่ตั้งฉาก ความผิดพลาดในการวิเคราะห์มีโอกาสเกิดขึ้นได้มาก

อย่างไรก็ดี สามารถพิจารณาได้ว่าระบบวิเคราะห์นี้มีสมรรถนะที่ดีเนื่องจากมีเพียงความผิดพลาดเล็กน้อยในการชี้บอกเนื้อเยื่อที่ผิดปกติเท่านั้น รวมทั้งการแยกเนื้อเยื่อสมองออกจากส่วนพื้นของภาพและวัตถุต่างๆที่อยู่นอกพื้นที่สมองมีความแม่นยำ และความแม่นยำในการแยก gray matter กับ white matter ก็นับว่าเป็นที่น่าพอใจ

ถึงแม้ว่าระบบวิเคราะห์นี้จะไม่สามารถให้ผลวิเคราะห์ที่ถูกต้องอย่างสมบูรณ์ การเลือกเทคนิคต่างๆมาใช้ในระบบนี้ให้ความหวังพอสมควรสำหรับการวิเคราะห์ภาพประเภทนี้ ผมมีความเชื่อว่าความคิดและเทคนิคบางอย่างที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับงานนี้จะเป็นประโยชน์ต่องานอื่นๆและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้าง

บรรณานุกรม

1. Magnetic resonance in medicine, Peter A. Rinck (Ed.), Blackwell Scientific Publications, 3th edition, 1993'
2. Diagnostic imaging, Peter Armstrong and Martin L. Wastie, Blackwell Scientific Publications.
3. Magnetic resonance imaging: physical and biological principles, Stewart C. Bushong, The C. V. Mosby Company, 1989.
4. Brain imaging and brain function, association for research in nervous and mental desease, vol. 63, Louis Sokoloff (Ed.), Reven Press Books, Ltd., 1985.
5. H. Hadwiger, Vorlesungen uber Inhalt, Oberflache und Isoperimetrie. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1957.
6. Kirsch, R. A., et al., "Experiments in Processing Pictorial Information with a Digital Computer," Proceeding of the Eastern Joint Computer Conference, 1957, pp. 221-229.
7. G. Matheron, Random Sets and Integral Geometry. New York: Wiley, 1975.
8. J. Serra, Image Analysis and Mathematical Morphology. New York: Academic, 1982.
9. Stemberg, S. R., "Cellular Computers and Biomedical Image Processing," Biomedical Images and Computers, J. Sklansky and J. C. Bisconte (eds.), Springer-Verlag, Berlin, 1982, pp. 294-319.
10. Haralick, R. M., S. R. Sternberg, and X. Zhuang, "Image Analysis Using Mathematical Morphology," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, 1987, pp. 523-550.
11. Dougherty, E. R., and C. R. Giardina, "Morphology on Umbra Matrices," International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Vol. 2, 1988, pp. 367-385.
12. Computer and robot vision, Robert M. Haralick, Linda G. Shapiro, vol. 1, Addison-Wesley, 1992.