



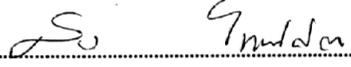
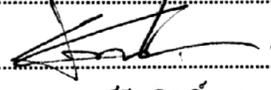
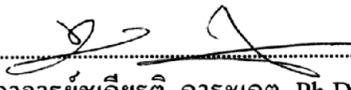
ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า
เรื่อง ขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาและการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

Iris Recognition Algorithm and Biometric System Software Development

นามผู้วิจัย นายกิตติพล โหราพงศ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ ( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิพงศ์ อารีกุล, Ph.D.)
กรรมการ ( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหญิง ไทยนิมิต, Ph.D.)
กรรมการ ( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม, Ph.D.)
หัวหน้าภาควิชา ( อาจารย์ชูเกียรติ การะเกตุ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A.)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 5 เดือน เมษายน พ.ศ. 2549

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาและการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

Iris Recognition Algorithm and Biometric System Software Development

โดย

นายกิตติพล โหระวงศ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อขอความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-1380-6

กิตติพล โหระพงศ์ 2549: ขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาและการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก ปรินต์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ปรินต์โครงการที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิพงษ์ อารีกุล, Ph.D. 111 หน้า
ISBN 974-16-1380-6

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก โดยส่วนแรกจะเป็นงานวิจัยขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา และส่วนที่สองจะเป็นงานพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกเพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบบุคคล

สำหรับงานวิทยานิพนธ์ส่วนแรก เกี่ยวกับการวิจัยขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาที่คิดค้นขึ้นใหม่ โดยได้วิเคราะห์ส่วนสำคัญของลายม่านตาในพิกัดเชิงขั้วแทนที่จะใช้พิกัดมุมฉากเหมือนกับขั้นตอนวิธีอื่น ทั้งนี้ได้ตั้งสมมุติฐานขึ้นว่า การวิเคราะห์ส่วนสำคัญของลายม่านตาในพิกัดเชิงขั้วจะให้คุณภาพของส่วนสำคัญในลายม่านตาได้ดีกว่าการวิเคราะห์ในพิกัดมุมฉาก เนื่องจากม่านตามีลักษณะเป็นวงกลมตามธรรมชาติ การแปลงภาพวงกลมของม่านตาให้เป็นพิกัดมุมฉากซึ่งเป็นที่ยอมรับกันนั้น มีข้อดีคือความซับซ้อนในการคำนวณต่ำ แต่ทำให้ส่วนสำคัญในลายม่านตาผิดเพี้ยนไป เป็นผลให้ความผิดพลาดในการรู้จำสูงขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบสมมุติฐานดังกล่าว ซึ่งแสดงผลของการวิเคราะห์ลายม่านตาในพิกัดเชิงขั้วที่ดีกว่า โดยให้ค่าความผิดพลาดในการรู้จำม่านตาประมาณ 2% จากการทดสอบโดยใช้ฐานข้อมูลม่านตาของจีนที่ชื่อ CASIA v.1 และ 4% จากการทดสอบโดยใช้ฐานข้อมูลม่านตาของไทยที่ชื่อ KSIP DB01R

สำหรับงานวิทยานิพนธ์อีกส่วนหนึ่งคือ การพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกที่ใช้งานบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพื่อควบคุมการผ่านเข้าออกประตูด้วยการตรวจสอบม่านตาหรือลายนิ้วมือ โดยระบบสามารถทำงานตรวจสอบบุคคลได้ 2 แบบคือ ระบบที่ใช้รหัสเรียกฐานข้อมูลมาเปรียบเทียบแบบหนึ่งต่อหนึ่ง และระบบที่เปรียบเทียบในฐานข้อมูลทั้งหมด นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกยังทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการจัดการระบบของหน่วยตรวจสอบไบโอเมตริกย่อยผ่านเครือข่าย และทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการเก็บฐานข้อมูลส่วนบุคคลหลักของระบบ


ลายมือชื่อนิสิต


ลายมือชื่อประธานกรรมการ

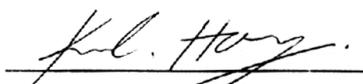
3 / เม.ย. / 2549

Kittipol Horapong 2006: Iris Recognition Algorithm and Biometric System Software Development. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Vutipong Areekul, Ph.D. 111 pages.
ISBN 974-16-1380-6

This thesis is composed of two parts. The first part states a new iris recognition algorithm and the second part expresses a procedure about development of biometric system software for personal authentication.

The first part proposes a new method for analyzing iris details on polar plane. This method is different from the prior work that generally acts on rectangular plane. An important reason for the proposed method came from physical structure of an iris as circular shape. Therefore, this iris recognition algorithm was developed underling the hypothesis that operation on polar plane should provide more conscious and precious iris details than operation on rectangular plane. In conventional scheme of rectangular operation, circular shape will be mapped onto rectangular shape before analyzing iris patterns. This conventional method has low computational complexity but provides more distorted iris details. The distortion causes error recognition rate rising. The hypothesis was investigated in this thesis. Finally, the analysis results of polar operation preserved more important iris details than of rectangular operation. In addition, the recognition results of polar operation demonstrated error rate about 2% and 4% on Chinese and Thai iris database test set, named CASIA v.1 and KSIP DB01R respectively.

The second part of this thesis is the development of biometric system software on personal computer for access control application. This software not only match an iris or fingerprint against biometric database in either verification or identification mode but also play the important role of a center access control unit to handling and managing personal databases of remote access units via network.


Student's signature


Thesis Advisor's signature

3 / Apr / 2006

กิตติกรรมประกาศ

อันดับแรกข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพงศ์ อารีกุล ประธานกรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมหญิง ไทยนิมิต กรรมการวิชาเอก ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องเพื่อให้วิทยานิพนธ์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ดี

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิริสิทธิ์ เกษตรเกษม กรรมการวิชาการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พันธุ์ปิติ เปี่ยมสง่า ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการแนะนำและตรวจวิทยานิพนธ์

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าได้รับกำลังใจและความร่วมมืออย่างดีจากครอบครัว ซึ่งมีคุณพ่อสมชาย โหราพงศ์ และคุณแม่เนติยา โหราพงศ์ สนับสนุนให้ข้าพเจ้าทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบคุณคณะผู้ร่วมทำการวิจัยทั้งหมดในห้องปฏิบัติการประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์ สำหรับความช่วยเหลือและคำชี้แนะต่าง ๆ ที่มีค่ายิ่ง ตลอดจนเพื่อนและมิตรสหายทุกท่านที่มีส่วนช่วยผลักดันให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้พัฒนางานเป็นรูปเล่มถึงปัจจุบัน

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณต่อห้องปฏิบัติการประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ทำการวิจัย และขอขอบพระคุณทางศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ได้มอบทุนสำหรับโครงการวิจัยระบบไบโอเมตริกและฮาร์ดแวร์ประมวลภาพดิจิทัล โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้ถือเป็นส่วนหนึ่งจากผลการวิจัยในโครงการดังกล่าว และขอขอบพระคุณทางบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้มอบทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ปี 2547 แก่ข้าพเจ้า

อนึ่งหากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีข้อบกพร่อง ข้าพเจ้าขอน้อมรับคำติและขออภัยเป็นอย่างยิ่ง และหวังว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์และให้ความรู้ต่อบุคคลทั่วไปได้เป็นอย่างดี

กิตติพล โหราพงศ์

มีนาคม 2549

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อที่ใช้ในสมการ และคำอธิบายอักษรย่อ	(8)
คำนำ	1
การตรวจเอกสาร	3
รูปแบบโครงสร้างของลายม่านตา	3
ระบบการรับภาพม่านตา	8
ขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา	10
ซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก	13
อุปกรณ์และวิธีการ	15
อุปกรณ์การพัฒนาระบบขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา	15
วิธีการพัฒนาระบบขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา	15
วิธีการระบุตำแหน่งม่านตา	17
หลักการกระจายรายละเอียดแบบแบ่งแยกได้เชิงขั้วด้วยชุดตัวกรองเวฟเล็ต	29
วิธีการดึงลักษณะเฉพาะของม่านตา	48
วิธีการแทนและเข้ารหัสลักษณะเฉพาะของม่านตา	50
วิธีการเปรียบเทียบม่านตา	56
อุปกรณ์การพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก	59
วิธีการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก	59
ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของระบบไบโอเมตริก	59
หลักการทำงานของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก	64
วิธีการเขียนโปรแกรมของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก	66
วิธีการเขียนโปรแกรมของการสื่อสารในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก	83
การจัดการฐานข้อมูลในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก	89
ผลและวิจารณ์	94
ผลการพัฒนาระบบขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา	94
วิจารณ์ผลการพัฒนาระบบขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา	101

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ผลการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไปโอเมตริก	102
วิจารณ์ผลการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไปโอเมตริก	106
สรุป	107
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	108

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สรุปรูปแบบย่อยภายในลายม่านตาทั้งหมดที่สามารถเป็นส่วนประกอบของลายม่านตา	7
2	สรุปขั้นตอนวิธีของการหาขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านใน	22
3	สรุปขั้นตอนวิธีของการหาขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านนอก	27
4	สรุปขั้นตอนวิธีของการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว	46
5	ค่าสัมประสิทธิ์ของชุดตัวกรองวิเคราะห์แบบ Daubechies's 9-7 biorthogonal filters	50
6	สรุปขั้นตอนวิธีของการหาสายเส้นที่สำคัญในภาพรายละเอียดแนวรัศมี	52
7	สรุปขั้นตอนวิธีของการเข้ารหัสตำแหน่งพิกัดของลายเส้นแนวรัศมี	55
8	สรุปขั้นตอนวิธีของการเปรียบเทียบตำแหน่งข้อมูลในพิกัดเชิงขั้ว	58
9	การเปรียบเทียบจุดเด่นในด้านต่าง ๆ ของซอฟต์แวร์ที่นิยมใช้พัฒนาโปรแกรมประยุกต์	67
10	ระบบแฟ้มในซอฟต์แวร์ระบบไปโอเมตริก	73
11	ข้อมูลในระดับชั้นต่าง ๆ ของโครงสร้างการติดต่อสื่อสารของระบบไปโอเมตริก	84
12	การกำหนดเลขที่อยู่ในรูปแบบข้อมูลการติดต่อสื่อสารในชั้น Network ให้ HPU และ RAU	85
13	ค่าพารามิเตอร์ของการติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมด้วยโปรโตคอล RS-232 ของ RAU และ DLC กับตัว HPU	86
14	การเก็บข้อมูลประวัติผู้ใช้ในฐานะข้อมูลส่วนบุคคล	90
15	การเก็บข้อมูลสถานะผู้ใช้ในฐานะข้อมูลส่วนบุคคล	91
16	ฐานข้อมูลบันทึกการเข้าออก	93
17	เวลาการประมวลผลระหว่างการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วกับการแปลงเวฟเล็ตแบบเดิม	95
18	ผลความผิดพลาดในการรู้จำม่านตาด้วยการวิเคราะห์รายละเอียดจากการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วกับการแปลงเวฟเล็ตแบบเดิม	99
19	ประสิทธิภาพของผลการรู้จำม่านตา	100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
20	ประสิทธิภาพความเร็วในการประมวลผลเฉลี่ยของขั้นตอนต่าง ๆ ในการรู้จำ ม่านตา	101

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ภาพตัดขวางแสดงอวัยวะภายในของลูกตา	4
2	โครงสร้างของม่านตา (ก) โครงสร้างของชั้นต่าง ๆ ของม่านตา (ข) ส่วนประกอบของเซลล์ต่าง ๆ ในม่านตา	5
3	รายละเอียดของม่านตาเมื่อมองในแนวด้านหน้า	6
4	การวิเคราะห์ส่วนประกอบของรูปแบบลายม่านตากับภาพม่านตาตัวอย่าง	7
5	การจัดวางอุปกรณ์การรับภาพและภาพม่านตาที่ได้จากวิธีต่าง ๆ	9
6	ระบบรักษาความปลอดภัยและลงเวลาการทำงาน โดยการตรวจม่านตา (ก) การตรวจม่านตาเป็นระบบเครือข่าย (ข) เครื่องตรวจม่านตา	14
7	ระบบลงเวลาด้วยลายนิ้วมือ (ก) ระบบเครือข่ายของการตรวจสอบลายนิ้วมือ (ข) เครื่องอ่านลายนิ้วมือ	14
8	ชุดอุปกรณ์รับภาพม่านตาของฐานข้อมูลชื่อ KSIP DB01R	16
9	ผังลำดับขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา	16
10	ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่มีอยู่ภายในภาพม่านตา	18
11	ผลของการหาขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านใน ในขั้นตอนต่าง ๆ	21
12	แผนภาพรวมของขั้นตอนการหาขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านใน	23
13	ความสมมาตรของจุดในรูปวงกลม	26
14	ขั้นตอนวิธีการสร้างเส้นโค้งวงกลมบนจุดภาพดิจิทัล	27
15	แผนภาพรวมของขั้นตอนการหาขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านนอก	28
16	ตัวอย่างของผลการทดสอบการระบุตำแหน่งม่านตา	29
17	รูปสัญญาณ	31
18	การสร้างสัญญาณจากผลรวมของปริภูมีย่อยตามทฤษฎี MRA	33
19	กระบวนการกระจายและประกอบสัญญาณหนึ่งมิติด้วยชุดตัวกรองเวฟเล็ต	36
20	ผลตอบสนองทางความถี่ของคู่ตัวกรองเวฟเล็ต	37
21	โครงสร้างต้นไม้ของชุดตัวกรองวิเคราะห์สำหรับการกระจายสัญญาณในระดับความละเอียดที่ 2	37
22	การแปลงเวฟเล็ตภาพสองมิติด้วยชุดตัวกรองวิเคราะห์	38
23	ผลการแปลงเวฟเล็ตสองมิติในระดับความละเอียดที่ 1	39
24	ผลภาพแสดงผลการแปลงเวฟเล็ต	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	ผลการแปลงเวฟเล็ทสองมิติในระดับความละเอียดที่ 2 และ 3	40
26	ผลการกระจายรายละเอียดด้วยชุดตัวกรองวิเคราะห์ในพิกัดมุมฉากและพิกัดเชิง ขั้ว	41
27	การกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วด้วยชุดตัวกรองวิเคราะห์	42
28	วิธีการกรองเพื่อกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว	45
29	แผนภาพรวมของขั้นตอนการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว	47
30	ผลการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว 3 ระดับกับภาพม่านตา	49
31	ลายเส้นแวนรัสมิที่นำมาใช้เป็นลักษณะเฉพาะของม่านตา	52
32	แผนภาพรวมของขั้นตอนการหาลายเส้นที่สำคัญในภาพรายละเอียดแวนรัสมิ	53
33	แผนภาพรวมของขั้นตอนการเข้ารหัสตำแหน่งพิกัดของลายเส้นแวนรัสมิ	55
34	แผนภาพรวมของขั้นตอนการเปรียบเทียบตำแหน่งข้อมูลในพิกัดเชิงขั้ว	58
35	โครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่างฮาร์ดแวร์ทั้งหมดภายในระบบไบโอเมตริก	60
36	โครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่างฮาร์ดแวร์ของหน่วยประมวลผลกลาง	61
37	เครื่องอ่านม่านตาและเครื่องอ่านลายนิ้วมือที่เชื่อมต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ภายใน หน่วยประมวลผลกลาง	61
38	เครือข่ายระบบไบโอเมตริกที่มี HPU เป็นศูนย์กลางการจัดการของระบบและมี RAU เป็นหน่วยตรวจสอบไบโอเมตริกย่อย	62
39	โครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่างฮาร์ดแวร์ของหน่วยเข้าถึงย่อย	63
40	โครงสร้างของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกแบบเป็นระดับชั้น	65
41	กลุ่มข้อมูลสถานะของโปรแกรม	69
42	แผนภาพการตรวจสอบสถานะของโปรแกรมก่อนเริ่มใช้งาน	71
43	กลุ่มข้อมูลสถานะของการประมวลผลไบโอเมตริก	74
44	กลุ่มข้อมูลสถานะของการจัดการรับลำดับภาพต่อเนื่อง	76
45	กลุ่มข้อมูลสถานะของการจัดการรับภาพแบบขัดจังหวะ	77
46	กลุ่มข้อมูลผู้ใช้สำหรับการเข้าถึงข้อมูลในฐานะข้อมูลส่วนบุคคล	78
47	กลุ่มข้อมูลบันทึกการเข้าออกสำหรับการเข้าถึงข้อมูลในฐานะข้อมูลส่วนบุคคล	79
48	ชั้นการติดต่อสื่อสาร	80
49	โครงสร้างการติดต่อสื่อสารของระบบไบโอเมตริก	83

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	รูปแบบข้อมูลการติดต่อสื่อสารในระดับชั้น Transport	84
51	รูปแบบข้อมูลการติดต่อสื่อสารในระดับชั้น Network Access	85
52	โครงสร้างการส่งข้อมูลของ HPU	87
53	กลุ่มข้อมูลของบัฟเฟอร์ข้อความสำรอง	88
54	โครงสร้างการรับข้อมูลของ HPU	88
55	การเชื่อมโยงระหว่างซอฟต์แวร์กับชุดเครื่องมือในการติดต่อกับฐานข้อมูล	89
56	โครงสร้างการจัดเก็บฐานข้อมูลส่วนบุคคล	90
57	แผนภาพของขั้นตอนการเปรียบเทียบระหว่างการรายละเอียดแบบเชิงขั้วกับ การแปลงเวฟเล็ทแบบเดิม	95
58	ผลการกระจายรายละเอียดด้วยการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วและการ แปลงเวฟเล็ทกับภาพม่านตา	96
59	แผนภาพรวมของการเข้ารหัสด้วยการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว	98
60	แผนภาพรวมของการเปรียบเทียบรหัสข้อมูลม่านตา	99
61	ผลความผิดพลาดในการตัดสินใจที่ค่าระดับคะแนนต่าง ๆ	100
62	ระบบไบโอเมตริกเต็มรูปแบบกับซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก	102
63	ซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกสำหรับการตรวจสอบม่านตาและลายนิ้วมือ	103
64	โครงสร้างหน้าต่างภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก	104
65	การจัดการฐานข้อมูลส่วนบุคคลในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก	105

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในสมการ

$g(x)$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเกาส์เซียน ที่ตำแหน่ง x
μ	=	ค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันเกาส์เซียน
σ	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันเกาส์เซียน
(x, y)	=	ตำแหน่งจุดภาพ
(x_c, y_c, r)	=	จุดศูนย์กลางและรัศมีของวงกลม
$N_i(x, y)$	=	ค่าสีระดับเทาของแต่ละจุดภาพหลังผ่านการนอร์แมลไลซ์
$I(x, y)$	=	ค่าสีระดับเทาของแต่ละจุดภาพก่อนผ่านการนอร์แมลไลซ์
M_o	=	ค่าเฉลี่ยของภาพที่ต้องการ
V_o	=	ค่าความแปรปรวนของภาพที่ต้องการ
M_i	=	ค่าเฉลี่ยของภาพก่อนการทำนอร์แมลไลซ์
V_i	=	ค่าความแปรปรวนของภาพก่อนการทำนอร์แมลไลซ์
p_k	=	จุดทดสอบที่ตำแหน่ง $x_k + 1$
$\psi(t)$	=	ฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่
$W(u, s)$	=	ผลการแปลงของฟังก์ชันมูลฐานหรือฟังก์ชันเวฟเล็ต
$\psi(\omega)$	=	ผลการแปลงฟูรีเยร์ของฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่
$f(n)$	=	สัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องที่มีความยาว N
V_i	=	ปริภูมิย่อยของสัญญาณค่าประมาณ ณ ระดับความละเอียดที่ i
W_i	=	ปริภูมิย่อยของสัญญาณรายละเอียด ณ ระดับความละเอียดที่ i
\oplus	=	เครื่องหมายผลบวกโดยตรง
$\varphi_{j_0, k}(n)$	=	ฟังก์ชัน Scaling function ที่ระดับความละเอียดต่ำสุด
$\psi_{j, k}(n)$	=	ฟังก์ชันเวฟเล็ตที่ระดับความละเอียด j ที่สูงขึ้น
$V_\varphi(j_0, k)$	=	ผลการแปลงเวฟเล็ตของฟังก์ชัน Scaling function
$W_\psi(j, k)$	=	ผลการแปลงเวฟเล็ตของฟังก์ชันเวฟเล็ต
M	=	แฟลคเตอร์นอร์แมลไลซ์
$h_\varphi(n)$	=	ตัวกรองความถี่ต่ำสำหรับสัญญาณประมาณ
$h_\psi(n)$	=	ตัวกรองความถี่สูงผ่านสำหรับสัญญาณรายละเอียด
c_{j+1}	=	ผลการคอนโวลูชันแบบหนึ่งมิติของค่าสัญญาณประมาณ
w_{j+1}	=	ผลการคอนโวลูชันแบบหนึ่งมิติของค่าสัญญาณรายละเอียด
j	=	ระดับความละเอียด

$\Delta\theta$	=	ระยะห่างระหว่างคู่จุดภาพที่ติดกันตามแนวแกนมุม
Δr	=	ระยะห่างระหว่างคู่จุดภาพที่ติดกันตามแนวแกนรัศมี

คำอธิบายอักษรย่อ

NIR	=	Near Infrared
GLPF	=	Gaussian Low Pass Filter
MRA	=	Multi Resolution Analysis
DWT	=	Discrete Wavelet Transform
FAR	=	False Accept Rate
FRR	=	False Reject Rate
EER	=	Equal Error Rate
CRR	=	Correct Recognition Rate
HPU	=	Host Processing Unit
RAU	=	Remote Access Unit
DLC	=	Door Lock Controller
FVHP	=	Fingerprint Verification Hardware Prototype
DSP	=	Digital Signal Processor
OOP	=	Object-oriented Programming
RAD	=	Rapid Application Development
DLL	=	Dynamic Link Library
USB	=	Universal Serial Bus
HID	=	Human Interface Device
PIN	=	Personal Identification Number
RS-232	=	Recommended Standard number 232
RS-422	=	Recommended Standard number 422
TCP/IP	=	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
LAN	=	Local Area Network
BDE	=	Borland Database Engine

ขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาและการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

Iris Recognition Algorithm and Biometric System Software Development

คำนำ

การตรวจสอบบุคคลในปัจจุบันนิยมใช้บัตรประจำตัวหรือรหัสผ่านซึ่งสามารถสูญหาย ถูกขโมย และลืมได้ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการคิดค้นเทคโนโลยีไบโอเมตริกมาใช้ทดแทนการพกพาบัตรประจำตัวหรือจดจำรหัสผ่านแบบเดิม เนื่องจากเทคโนโลยีไบโอเมตริกเป็นการนำอัตลักษณ์ที่มีอยู่ภายในตัวบุคคลมาใช้เพื่อตรวจสอบ จึงนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในงานอย่างแพร่หลายของเทคโนโลยีไบโอเมตริก เช่น การรักษาความปลอดภัยในการผ่านเข้าออกสถานที่ (Access Control) การลงบันทึกเวลาทำงาน (Time Stamp) การทำธุรกรรมทางอินเทอร์เน็ต (e-Commerce) การนำไปใช้กับระบบทะเบียนราษฎร์ของหน่วยราชการ (Civil Identity) เป็นต้น

จากข้อได้เปรียบของการตรวจสอบบุคคลด้วยไบโอเมตริก ทำให้มีความพยายามนำอัตลักษณ์หลากหลายรูปแบบมาใช้ตรวจสอบบุคคลในระบบไบโอเมตริก เช่น ลักษณะทางกายภาพ อาทิ ลายนิ้วมือ ใบหน้า ม่านตา รูปทรงของมือ รูปทรงของใบหู เส้นเลือดบนมือ เรตินา ดีเอ็นเอ กลิ่นตัว เป็นต้น และลักษณะทางพฤติกรรม อาทิ เสียงพูด ลายเซ็น ท่าทางการเดิน การเคลื่อนไหวของริมฝีปากขณะพูด เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าอัตลักษณ์ที่เลือกนำมาใช้มีลักษณะเฉพาะบุคคลและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะทำให้ประสิทธิภาพของการตรวจสอบบุคคลจะมีความน่าเชื่อถือเป็นอย่างยิ่ง แต่ถึงอย่างไรอัตลักษณ์ที่เหมาะสมในการนำมาใช้จำเป็นต้องคำนึงถึงความสะดวกของผู้ใช้งานเป็นหลักด้วย

หนึ่งในวิธีของการตรวจสอบบุคคลที่เหมาะสมจะนำมาใช้ในระบบไบโอเมตริกก็คือ การตรวจสอบม่านตา เนื่องจากมีจุดเด่นหลายประการ ทั้งลักษณะเฉพาะบุคคลที่เกิดขึ้นของลายม่านตาซึ่งไม่มีความเกี่ยวเนื่องกันกับความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมแม้กระทั่งในฝาแฝดและรายละเอียดของลายม่านตาที่มีความเป็นเอกลักษณ์สูง จากที่ระบุในผลงานวิจัยของ John Daugman (Daugman, 1993) สามารถให้ค่าความผิดพลาดในการระบุตัวบุคคลต่ำมากเพียง 1 ใน 131,000 คน นอกจากนี้ลักษณะสำคัญที่ม่านตาเป็นอวัยวะภายในลูกตา ทำให้สามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงต่อลายม่านตาจากสิ่งต่าง ๆ และยังทำให้การใช้งานตรวจสอบบุคคลไม่จำเป็นที่ผู้ใช้ต้องสัมผัสอุปกรณ์ใด ๆ สามารถสร้างความสะดวกมั่นใจต่อผู้ใช้งานได้เป็นอย่างดี

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจึงเป็นที่มาของการวิจัยและพัฒนาระบบไบโอเมตริกที่เน้นการตรวจสอบบุคคลโดยใช้ม่านตา ครอบคลุมในส่วนของ การคิดค้นขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาขึ้นใหม่และการพัฒนาซอฟต์แวร์ของระบบไบโอเมตริกโดยมุ่งเน้นให้ระบบทำงานควบคุมการเปิดปิดประตูอัตโนมัติ เพื่อช่วยและเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการพัฒนาไปสู่การสร้างผลิตภัณฑ์ในระดับอุตสาหกรรมในอนาคตอันใกล้ได้

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้จะแบ่งการนำเสนอออกเป็นสองส่วนคือ การพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาแบบใหม่ และการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกเพื่อใช้ในการควบคุมการผ่านเข้าออกประตู โดยในส่วนของขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาจะใช้วิธีการประมวลผลภาพดิจิทัลเพื่อหาลักษณะเด่นเฉพาะของรายละเอียดที่เกิดขึ้นบนม่านตา จากภาพม่านตาที่รับได้ด้วยเครื่องอ่านม่านตาต้นแบบของห้องปฏิบัติการประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์ (Kasetsart Signal and Image Processing Laboratory, KSIP Lab) ซึ่งวิธีการประมวลผลภาพม่านตาสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้ดังนี้คือ ขั้นตอนการระบุตำแหน่งม่านตาภายในภาพม่านตา ขั้นตอนการดึงลักษณะเฉพาะของม่านตา ขั้นตอนการแทนและเข้ารหัสลักษณะเฉพาะของม่านตา และขั้นตอนการเปรียบเทียบข้อมูลม่านตา โดยรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนจะกล่าวอยู่ในหัวข้อของวิธีการพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาต่อไป

สำหรับในส่วนของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกจะออกแบบและพัฒนาให้มีความสามารถในการทำงานควบคุมการผ่านเข้าออกประตู พร้อมทั้งจัดการระบบผ่านเครือข่ายไปยังหน่วยตรวจสอบไบโอเมตริกย่อยต่าง ๆ ที่ติดอยู่ตามประตู และซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกยังทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการจัดเก็บฐานข้อมูลส่วนบุคคลหลักของระบบ ซึ่งจะเป็นการบริหารและสำรองฐานข้อมูลจากหน่วยตรวจสอบไบโอเมตริกย่อยต่าง ๆ โดยขั้นตอนของการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายส่วนประกอบด้วย ขั้นตอนการจัดการระบบโดยทั่วไปภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก ขั้นตอนการเชื่อมต่อกับเครื่องอ่านอัตลักษณ์ไบโอเมตริกแบบต่าง ๆ ขั้นตอนการสื่อสารผ่านเครือข่ายในระบบไบโอเมตริก และขั้นตอนการจัดการฐานข้อมูลส่วนบุคคล โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะกล่าวในหัวข้อของวิธีการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกต่อไป

การตรวจเอกสาร

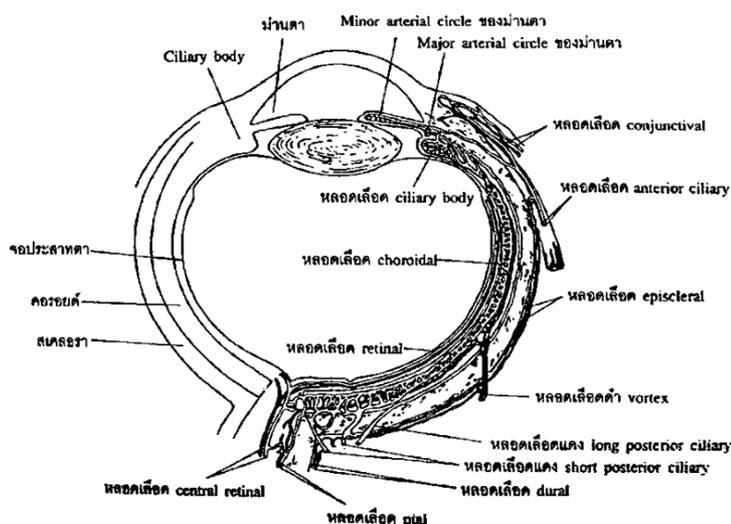
ขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาและการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก ปัจจุบันได้มีนักวิจัยเกี่ยวกับการประมวลผลภาพดิจิทัลและนักพัฒนาซอฟต์แวร์เกี่ยวกับระบบไบโอเมตริกรู้จำม่านตาได้นำเสนอผลงานชิ้นมามากมาย ทั้งที่เป็นผลงานที่มีการตีพิมพ์และเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด แต่ทว่าผลงานส่วนใหญ่ยังคงเป็นผลงานที่มาจากความคิดค้นและพัฒนาขึ้นจากต่างชาติแทบทั้งสิ้น ดังนั้นในการตรวจเอกสารจึงได้มีการศึกษาและรวบรวมเอกสารผลงานต่าง ๆ มานำเสนอ โดยสามารถแบ่งหัวข้อของการศึกษาออกเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้คือ

1. การศึกษารูปแบบ โครงสร้างของลายม่านตา เพื่อใช้เป็นความรู้พื้นฐานของการวิเคราะห์ลายม่านตาสำหรับพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาแบบใหม่
2. การรวบรวมผลงานการพัฒนาอุปกรณ์การรับภาพม่านตา เพื่อศึกษาระบบการรับภาพและปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อภาพม่านตาสำหรับพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาแบบใหม่
3. การรวบรวมผลงานการพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา เพื่อศึกษาและเป็นแนวทางในการคิดค้นขั้นตอนวิธีของการรู้จำม่านตาแบบใหม่
4. ตัวอย่างของระบบไบโอเมตริกที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

โดยรายละเอียดของหัวข้อต่าง ๆ จะกล่าวอยู่ในหัวข้อย่อยต่อไป

1. รูปแบบโครงสร้างของลายม่านตา (Basic Structure of Iris Pattern)

ม่านตา (Iris) เป็นอวัยวะภายในลูกตา (Eye ball) ที่มีรูปร่างเป็นแผ่นกลม มีรูซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดได้อยู่ตรงกลางเรียกว่า รูม่านตา (Pupil) และม่านตามีหน้าที่หลักเป็นควบคุมปริมาณแสงที่จะผ่านเข้าไปยังเรตินาด้วยการขยายหรือหดขนาดของม่านตา โดยแผ่นนี้จะวางตัวอยู่ด้านหน้าแก้วตา (Lens) และด้านหลังกระจกตา (Cornea) และมีน้ำหล่อเลี้ยง (Aqueous Humour) ลักษณะเป็นน้ำใสที่สร้างจาก Ciliary body ไหลหล่อเลี้ยงในช่องหลังม่านตา ผ่านรูม่านตาเข้าสู่ช่องหน้าลูกตา แล้วระบายออกทางมุมช่องหน้าม่านตา (ภิญโญिता, 2540) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ภาพตัดขวางแสดงอวัยวะภายในของลูกตา

ที่มา: ภิญญินิตา (2540)

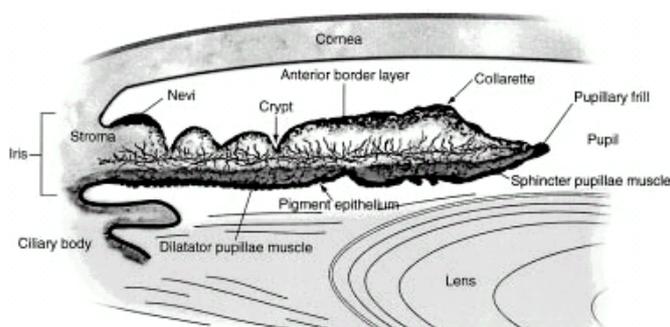
โครงสร้างม่านตาประกอบด้วยชั้นต่าง ๆ ของเนื้อเยื่อม่านตา 4 ชั้น ดังแสดงในภาพที่ 2 คือ

1. ชั้นพื้นผิวด้านบนสุด (Anterior border layer) เป็นชั้นที่มีเซลล์สร้างเม็ดสี (Melanocytes) แทรกตัวอยู่จำนวนมากและไม่มีหลอดเลือดอยู่เลย ซึ่งส่วนใหญ่จะมี Chromatophores ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีรงควัตถุ (Pigment) สีเหลืองน้ำตาลอยู่ภายในเป็นส่วนประกอบ ความหนาและความแน่นของเซลล์ที่มีรงควัตถุในชั้นนี้จะเป็นตัวกำหนดสีของม่านตา ถ้าจำนวนเซลล์ที่มีรงควัตถุมีมากจะทำให้สามารถสังเกตเห็นสีของม่านตาเป็นสีน้ำตาล แต่ถ้าชั้นพื้นผิวด้านบนสุดมีจำนวนเซลล์ที่มีรงควัตถุอยู่ไม่มากจะทำให้แสงสามารถตกลงและสะท้อนขึ้นมาจากชั้นหลังสุดของม่านตาได้และจะปรากฏให้เห็นม่านตาเป็นสีฟ้า โดยรูปแบบของลายม่านตาที่เกิดขึ้นในชั้นนี้จะมีลักษณะเฉพาะบุคคลขึ้นอยู่กับรูปแบบการรวมตัวกันของเซลล์ที่มีรงควัตถุหรือร่องต่าง ๆ ที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อเยื่อภายใน ดังแสดงในภาพที่ 2 (ก)

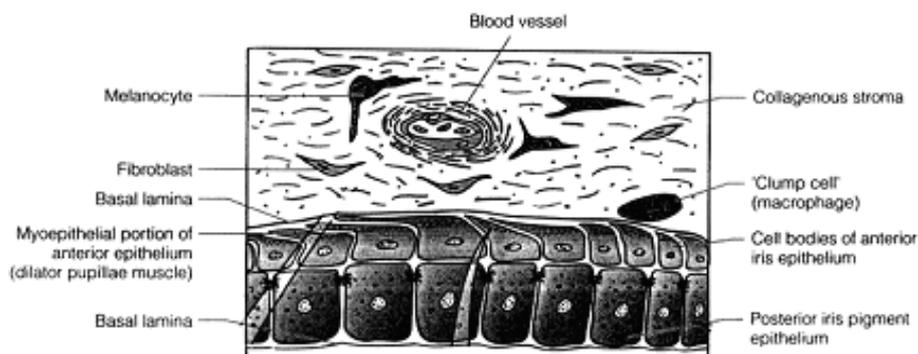
2. ชั้นสโตรมา (Stroma) ภายในมีหลอดเลือด เส้นประสาท กลุ่มก้อนของเซลล์ที่มีสีเข้ม (Macrophages or Clump cells) และพบกล้ามเนื้อที่ทำหน้าที่หดม่านตา (Sphincter pupillae muscle) เรียงตัวอยู่ในแนววงรอบ (Circular) รุม่านตาด้วย

3. ชั้นกล้ามเนื้อขยายม่านตา (Dilator pupillae muscle) เป็นชั้นบาง ๆ ที่มีกล้ามเนื้อที่ทำหน้าที่ขยายม่านตาวางเรียงตัวในแนวตามยาว (Longitudinal)

4. ชั้นพื้นผิวด้านหลังสุด (Posterior pigment epithelium) เป็นส่วนที่ต่อมาจาก Pigmented Epithelium ใน Ciliary body โดยประกอบด้วยเซลล์เยื่อบุผิวที่มีสีเข้มจำนวนมาก (Heavily pigmented epithelium)



(ก) โครงสร้างของชั้นต่าง ๆ ของม่านตา



(ข) ส่วนประกอบของเซลล์ต่าง ๆ ในม่านตา

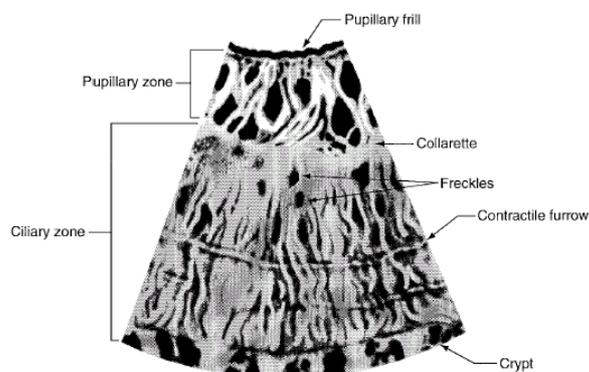
ภาพที่ 2 โครงสร้างของม่านตา (ก) โครงสร้างของชั้นต่าง ๆ ของม่านตา (ข) ส่วนประกอบของเซลล์ต่าง ๆ ในม่านตา

ที่มา: Wildes (1997); Forrester *et al.* (2002)

สำหรับรูปแบบลายม่านตาจะพัฒนาจากการก่อตัวของรงควัตถุ โดยเริ่มก่อตัวขึ้นในช่วงสามเดือนแรกของการตั้งครรภ์และเสร็จสมบูรณ์ในช่วงเวลาแปดเดือนของการตั้งครรภ์ แต่การพัฒนาของรงควัตถุนี้อาจมีต่อไปจนถึงระยะขวบปีแรกหลังจากกำเนิดและรูปแบบของลายม่านตาที่ได้จะคงที่ไปตลอดอายุขัย โดยทั่วไปลายบนม่านตานี้จะสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่หารูปแบบลายบนม่านตาสามารถมีการเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากการขยายหรือหดขนาดของม่านตาตามปริมาณของแสงที่ได้รับ โดยปกติม่านตาจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 1-8 มม. และขนาดของม่านตาจะมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 12 มม. (Wildes, 1997; Muron and Pospisil, 2000; Forrester *et al.*, 2002)

รูปแบบที่ปรากฏของลายม่านตาส่วนใหญ่เกิดอยู่บนชั้นพื้นผิวด้านบนสุด อาทิ รอยต่อระหว่างพื้นที่สองส่วนของม่านตา คือ พื้นที่ส่วนบริเวณที่อยู่ใกล้รูม่านตา (Pupillary zone) ที่มีลักษณะเป็นส่วนที่เรียบ และบริเวณที่อยู่ใกล้ด้านฐานของม่านตา (Ciliary zone) ที่มีลักษณะเป็นสันและร่องจำนวนมาก โดยรอยต่อระหว่างสองพื้นที่นี้จะคดเคี้ยวอยู่เป็นวงรอบรูม่านตาซึ่งถือได้ว่าเป็นลักษณะของรูปแบบย่อยภายในลายม่านตาหนึ่งที่เราเรียกว่า Collarette นอกจากนี้ยังมีรูปแบบย่อยภายในลายม่านตาลักษณะอื่นที่ปรากฏอยู่บนชั้นนี้อีก คือ Nevi เกิดจากการรวมตัวกันของเซลล์สร้างเม็ดสีที่มีสีเข้ม (Heavily pigmented melanocytes) จำนวนมากจึงทำให้เห็นเด่นชัดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2 (ก) แต่สำหรับกรณีที่มีบริเวณนั้นเป็นสีดำจะเรียกรูปแบบย่อยของลายม่านตานี้ว่า Freckles นอกเหนือจากนี้ยังมีรูปแบบย่อยภายในลายม่านตาที่มีลักษณะเป็นร่องที่เกิดจากการขยายและหดของรูม่านตาเรียกว่า Furrow ซึ่งในรูปแบบนี้สามารถแบ่งย่อยออกเป็นสองลักษณะคือ ลักษณะร่องที่เกิดในแนวรัศมีเรียกว่า Radially furrow พบมากในพื้นที่ส่วนบริเวณรอบรูม่านตา และอีกลักษณะคือ Contractile furrow เป็นลักษณะร่องที่เกิดในแนวเส้นรอบวงพบมากในโซนกลางของพื้นที่ส่วนกล้ามเนื้อปรับเลนส์ตา และอีกรูปแบบย่อยของลายม่านตา คือ Crypt เป็นลักษณะที่เกิดจากการไม่มีเนื้อเยื่อของชั้นพื้นผิวด้านบนสุดในบริเวณนั้น ทำให้ปรากฏเป็นลักษณะหลุมลึกลงไปจนสามารถสังเกตเห็นสีของชั้นสโตรมา (Stroma) ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยลักษณะที่พบส่วนใหญ่แล้วจะมีสองแบบคือ แบบเส้นที่พุ่งออกแนวรัศมีจากรูม่านตา ซึ่งเส้นนี้สามารถที่จะวางเรียงตัวตั้งแต่รูม่านตาจนถึงขอบนอกของม่านตา และแบบรอยแถมที่สามารถพบได้บริเวณโซนด้านนอกของพื้นที่กล้ามเนื้อปรับเลนส์ตา

ส่วนรูปแบบย่อยภายในลายม่านตาที่เกิดจากโครงสร้างในชั้นอื่น ๆ ของม่านตามีเพียงแต่ Pigment frill ที่เป็นผลจากสีของชั้นพื้นผิวด้านหลังสุดที่ยื่นออกมาในบริเวณวงรอบใกล้กับรูม่านตา (Pupillary margin) ดังแสดงในภาพที่ 3

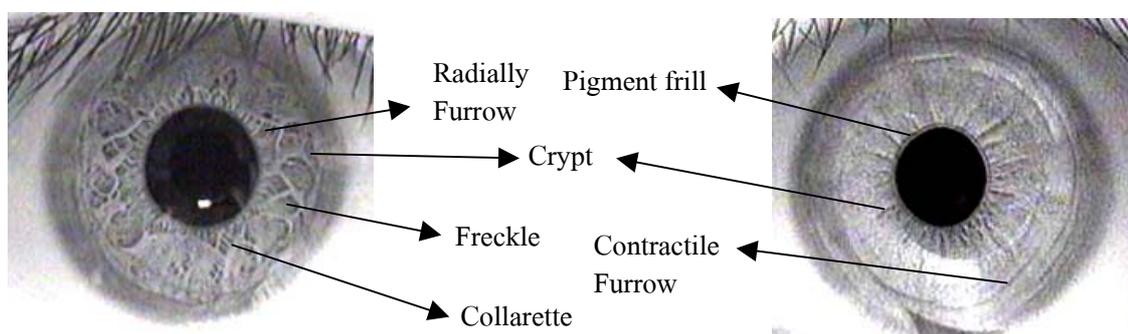


ภาพที่ 3 รายละเอียดของม่านตาเมื่อมองในแนวด้านหน้า
ที่มา: Wildes (1997)

จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าลายม่านตาเกิดจากการรวมกันของรูปแบบย่อยภายในลายม่านตาในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งรูปแบบย่อยภายในลายม่านตาทั้งหมดได้นำมาสรุปและแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยจะอธิบายถึงลักษณะที่สามารถพบ และบริเวณที่จะพบรูปแบบย่อยภายในลายม่านตานี้ อีกทั้งยังแสดงส่วนประกอบของลายม่านตาจากรูปแบบย่อยที่ได้กล่าวมากับภาพม่านตาในภาพที่ 4

ตารางที่ 1 สรุปรูปแบบย่อยภายในลายม่านตาทั้งหมดที่สามารถเป็นส่วนประกอบของลายม่านตา

รูปแบบย่อยภายในลายม่านตา	ลักษณะที่พบ	บริเวณที่พบ
Crypt	เส้นในแนวรัศมี รอยแฉับ	ตั้งแต่รูม่านตาจนถึงขอบนอกของม่านตา ใกล้เคียง Collarette หรือรอบนอกของม่านตา
Freckles	จุด หรือ รอยแฉับ	พบได้ทั่วไป
Radially furrow	เส้นเล็ก ๆ ในแนวรัศมี	รอบ ๆ รูม่านตาจนถึง Collarette
Contractile furrow	ร่องในแนวเส้นรอบวง	ใกล้เคียงขอบนอกของม่านตา
Collarette	เส้นขอบคดเคี้ยวเป็นวงรอบ	รอยต่อระหว่างพื้นที่ส่วนบริเวณรอบรูม่านตากับพื้นที่ส่วนกล้ามเนื้อปรับเลนส์ตา
Pigment frill	เส้นทึบเป็นวงรอบรูม่านตา	บริเวณวงรอบใกล้เคียงรูม่านตา



ภาพที่ 4 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของรูปแบบลายม่านตากับภาพม่านตาตัวอย่าง

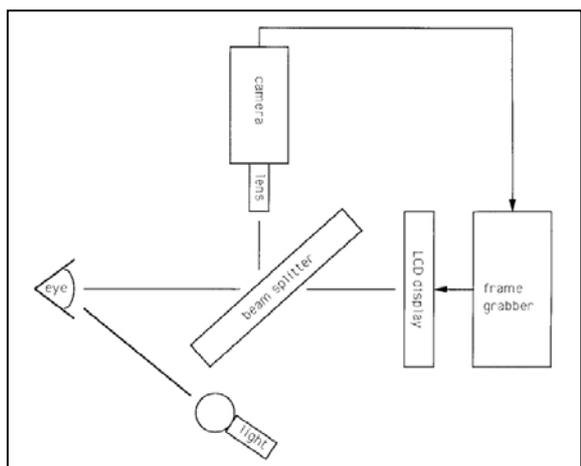
2. ระบบการรับภาพม่านตา (Iris Image Acquisition System)

ในการออกแบบและพัฒนาระบบการรับภาพม่านตาจะต้องมีการคำนึงถึงปัจจัยด้านความละเอียดและความคมชัดของลายม่านตาในภาพ เนื่องจากม่านตามีลักษณะเป็นวงแหวนที่มีขนาดเล็ก (ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 มม.) ทำให้ผลของความสว่างจากแสงที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อรายละเอียดของลายม่านตาในภาพลดลง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยในส่วนของการจับภาพของตัวกล้องภายในเครื่องอ่านม่านตาที่ควรถูกกำหนดให้เหมาะสมและเร็วพอที่จะไม่เกิดการพริ้วของภาพเมื่อดวงตามีการเคลื่อนไหว ทั้งนี้ความครบถ้วนของพื้นที่วงแหวนม่านตาภายในภาพถือเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งด้วย เพราะจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการรู้จำม่านตาได้ ซึ่งระบบการรับภาพม่านตาต่าง ๆ ที่ได้มีการพัฒนาขึ้นจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ทั้งสิ้น ดังจะกล่าวต่อไป

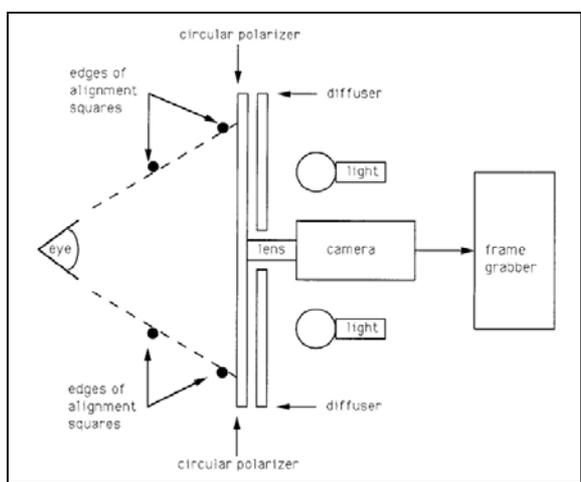
ระบบการรับภาพม่านตาของ Daugman (Wildes, 1997) ได้ออกแบบอุปกรณ์เพื่อรับภาพม่านตาให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของม่านตาประมาณ 100 ถึง 200 จุติภาพ โดยใช้เลนส์ขนาด 330 มม. มีระยะการรับภาพห่าง 15-46 ซม. จากตัวกล้องที่สามารถรับภาพในย่านใกล้แสงอินฟราเรด (Near Infrared) ที่มีความยาวคลื่น 700-900 นาโนเมตรได้และให้ภาพระดับเทา ดังแสดงในภาพที่ 5 (ก) นอกจากนี้ยังป้อนกลับภาพที่รับได้กลับมาให้ผู้ใช้งาน เพื่อให้ผู้ใช้สามารถปรับตำแหน่งม่านตาเข้าไปอยู่ในกรอบของภาพได้ (Self-positioning) เป็นการป้องกันตำแหน่งม่านตาออกนอกภาพ

ส่วน Wildes (1997) ได้ออกแบบอุปกรณ์รับภาพม่านตาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของม่านตาประมาณ 256 จุติภาพ โดยใช้เลนส์ขนาด 80 มม. ที่ระยะห่างการรับภาพเท่ากับ 20 ซม. ซึ่งจะใช้ภาพระดับเทาเช่นเดียวกับของ Daugman ดังแสดงในภาพที่ 5 (ข) สำหรับระบบช่วยผู้ใช้งานป้องกันตำแหน่งม่านตาออกนอกขอบเขตของภาพ Wildes ได้สร้างกรอบสี่เหลี่ยมที่มีลายเส้นไขว้หมายวัตถุไว้ที่หน้าเลนส์ของกล้อง เพื่อให้ผู้ใช้ปรับตำแหน่งม่านตามาอยู่ที่กึ่งกลางของเลนส์กล้องได้

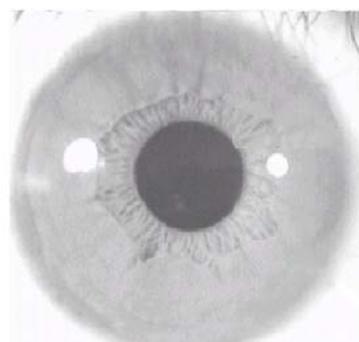
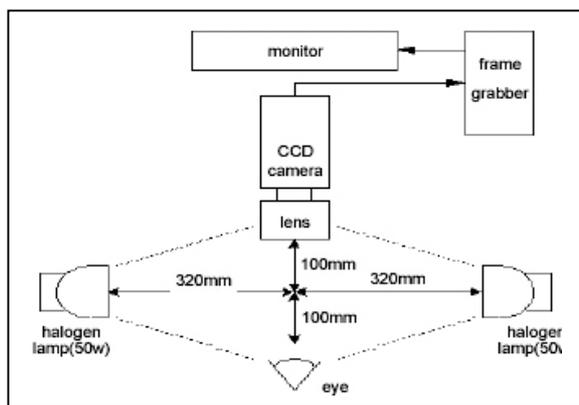
นอกจากนี้ระบบการรับภาพที่ออกแบบโดย Lim *et al.* (2001) จะใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นโคมไฟฮาโลเจน (Halogen Lamp) ขนาด 50 วัตต์ จำนวนสองดวง ซึ่งระบบนี้จะค่อนข้างมีปัญหาในเรื่องแสงรบกวนมากกว่าระบบของ Daugman และ Wildes จากการสะท้อนของแสงไฟบนม่านตา โดยระบบนี้จะใช้มาโครเลนส์ขนาด 55 มม. เพื่อจับภาพม่านตาของผู้ใช้งานขนาด 320×240 จุติภาพ ที่ระยะห่างการรับภาพ 20 ซม. ด้วยกล้องวิดีโอที่รับภาพระดับเทาในโหมดการถ่ายปกติ ดังแสดงในภาพที่ 5 (ค)



(ก) ระบบการรับภาพและภาพม่านตาที่ได้จากวิธีของ Daugman



(ข) ระบบการรับภาพและภาพม่านตาที่ได้จากวิธีของ Wildes



(ค) ระบบการรับภาพและภาพม่านตาที่ได้จากวิธีของ Lim et al.

ภาพที่ 5 การจัดวางอุปกรณ์การรับภาพและภาพม่านตาที่ได้จากวิธีต่าง ๆ

ที่มา: Wildes (1997); Lim et al. (2001)

3. ขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา (Iris Recognition Algorithm)

ทฤษฎีการประมวลสัญญาณดิจิทัลและการประมวลภาพดิจิทัลได้ถูกนำมาประยุกต์เพื่อใช้วิเคราะห์และเปรียบเทียบภาพม่านตา ซึ่งโดยทั่วไปการรู้จำม่านตาสามารถแบ่งขั้นตอนหลักออกได้เป็น 4 ส่วน คือ ขั้นตอนการระบุตำแหน่งของม่านตา (Iris Localization) ขั้นตอนการปรับขนาดม่านตาให้เป็นมาตรฐาน (Iris Normalization) ขั้นตอนการดึงลักษณะเฉพาะของม่านตา (Iris Feature Extraction) และขั้นตอนการเปรียบเทียบข้อมูลม่านตา (Iris Matching) โดยเฉพาะในขั้นตอนการดึงลักษณะเฉพาะของม่านตานี้ถือว่าเป็นส่วนหลักที่มีความสำคัญยิ่งต่องานวิจัย เพราะเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ที่มีความสำคัญในการรู้จำแบบรูป (Pattern Recognition) โดยทั่วไป

การใช้ม่านตาสำหรับการระบุและตรวจสอบบุคคลถูกนำเสนอขึ้นครั้งแรกโดย Flom and Safir (1987) ต่อมา Daugman ได้ทำการพัฒนาระบบการรู้จำม่านตาขึ้นและได้ตีพิมพ์ผลงานครั้งแรกในปี ค.ศ. 1992 (Daugman, 1992) ซึ่งผลงานของ Daugman เป็นที่โดดเด่นและถูกอ้างอิงถึงมาก เนื่องจากมีการอ้างอิงค่าความถูกต้องของระบบอย่างเป็นทางการ โดยระบบที่ได้จะให้ค่าจำนวน Binary degree of freedom ของรหัสม่านตาสูงถึง 173 บิต จาก 2048 บิต หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าโอกาสที่จะสุ่มรหัสม่านตาของบุคคลหนึ่งถูกต้องมีค่า 1 ใน 2^{173} ครั้ง (Daugman, 1993) อีกทั้งผลงานดังกล่าวยังได้นำไปจดสิทธิบัตรระบบการรู้จำม่านตาในปี ค.ศ. 1994 (Daugman, 1994) โดยระบบนี้ให้ความผิดพลาดในการระบุตัวบุคคลที่ต่ำมาก

ภายหลังผลงานของ Daugman ได้มีการคิดค้นและวิจัยขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาใหม่ ๆ ออกมาเป็นจำนวนมาก โดยผลงานเหล่านั้นได้เสนอวิธีต่าง ๆ ในการวิเคราะห์รูปแบบลายม่านตาเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการรู้จำม่านตา อาทิ Wildes (1997); Boles and Boashah (1998); Noh *et al.* (2002); Ma *et al.* (2003); Tisse *et al.* (2002); Horapong *et al.* (2004); Lee and Ewe (2004); Thoosenggam *et al.* (2005, 2006); Sun *et al.* (2004) ทั้งนี้รายละเอียดขั้นตอนวิธีต่าง ๆ สามารถอธิบายโดยสรุปได้ ดังนี้

Daugman (1992, 1993, 2004) นำเสนอการรู้จำม่านตาทั้งระบบ เริ่มต้นจากการประเมินหาคุณภาพลายม่านตาที่ชัดเจนจากชุดลำดับภาพต่อเนื่องของกล้องวิดีโอที่สนับ โดยใช้การคอนโวลูชันกับตัวกรองที่ได้สร้างขึ้นเพื่อคำนวณหาค่าพลังงานความถี่สูงที่ปรากฏในภาพ สำหรับใช้เป็นตัวกำหนดคุณภาพของลายม่านตาและคัดเลือกมาใช้เป็นภาพม่านตา เมื่อทำการคัดเลือกภาพม่านตาได้แล้วจะทำการระบุตำแหน่งจุดศูนย์กลาง ขอบเขตรัศมีวงแหวนม่านตาด้านในและด้านนอก โดยใช้

Integro-differential operator เพื่อจะแปลงพื้นที่ม่านตาจากที่อยู่บนพิกัดมุมฉากตามแนวแกนนอน และแกนตั้งของภาพให้อยู่ในพิกัดเชิงขั้วเป็นพื้นที่ม่านตารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขันต่อมาจะสร้างรหัสม่านตาขึ้นด้วยการควอนไทซ์เฉพาะค่าเฟสที่เกิดจากการกรองด้วยตัวกรองกาบอร์สองมิติเชิงซ้อน (Complex 2-D Gabor filter) หลังจากนั้นนำรหัสม่านตาที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบด้วยการคำนวณหาค่าระยะห่าง Hamming แบบนอร์แมลไลซ์ (Normalized Hamming distance) โดยการคำนวณจะใช้เป็นวิธีการเปรียบเทียบในระดับบิตด้วยตัวดำเนินการแบบ Exclusive-OR เพื่อความเร็วในการเปรียบเทียบรหัส

Wildes (1997) ใช้การแปลงฮิวจ์ (Hough Transform) กับขอบภาพสองระดับเพื่อหาตำแหน่งจุดศูนย์กลาง ขอบเขตรัศมีวงแหวนม่านตาด้านในและด้านนอก โดยขอบภาพสร้างจากการกรองภาพม่านตาด้วยตัวกรองเกรเดียนต์ของเกาส์เซียนที่มีการถ่วงน้ำหนักในแต่ละทิศทางเพื่อใช้เลือกขอบในทิศทางที่ต้องการ โดยขอบเขตของม่านตาสามารถหาได้จากการแทนสมการวงกลมเข้าไปในการแปลงฮิวจ์เพื่อกระทำกับขอบภาพในแนวตั้ง (90°) นอกจากนี้ Wildes ได้ใช้สมการพาราโบลาเพื่อหาขอบเขตของเปลือกตาเพิ่มขึ้นด้วย ขณะที่ระบบของ Daugman นั้นไม่มีการหาขอบเขตของเปลือกตา แต่ทว่า Daugman จะไม่พิจารณาพื้นที่ด้านบนและล่างของม่านตาแทนเพื่อป้องกันปัญหาจากการบดบังของเปลือกตา เมื่อได้ตำแหน่งที่สมบูรณ์ของม่านตาแล้ว Wildes จะตัดเฉพาะส่วนพื้นที่ม่านตาจากขอบเขตที่หาได้ ก่อนทำ Laplacian Pyramid เพื่อแบ่งรายละเอียดข้อมูลเฉพาะของลายม่านตาออกมาพิจารณาในแต่ละช่วงแถบความถี่ (Bandpass decomposition) ด้วยระดับความละเอียด (Resolution Level) 4 ระดับ จากนั้นนำภาพที่ได้ไปหมุนและเลื่อนตำแหน่ง (Geometrically warping) ให้ตำแหน่งม่านตาสองภาพตรงกัน ก่อนคำนวณค่าสหสัมพันธ์แบบนอร์แมลไลซ์ (Normalized correlation) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

Boles and Boashah (1998) ได้กำหนดจุดศูนย์กลางถ่วงของขอบรูม่านตาเป็นจุดอ้างอิงสำหรับนำข้อมูลม่านตาออกมาในแนวเส้นรอบวงเป็นสัญญาณหนึ่งมิติ จากเส้นรอบวงในรัศมีต่าง ๆ ที่กำหนดแต่ละเส้นและจะได้จำนวนสัญญาณหนึ่งมิติออกมาจำนวนหนึ่ง ซึ่งแต่ละสัญญาณที่ได้จะนำไปทำการแปลงเวฟเลตแบบ Dyadic wavelet transform ที่ค่าระดับความละเอียดต่าง ๆ ก่อนจะเข้ารหัสด้วยการแทนสัญญาณเป็นแบบ Zero-crossing representation ซึ่งข้อมูลม่านตาที่ได้จะมีคุณสมบัติความทนทานต่อการหมุน การเคลื่อนที่ และการปรับขนาดของม่านตา ในส่วนของการเปรียบเทียบจะทำการคำนวณค่าคะแนนความต่างกันจากการเปรียบเทียบสัญญาณหนึ่งมิติด้วย Dissimilarity function ที่กำหนดขึ้น

Ma *et al.* (2003) เสนอระบบการรู้จำม่านตา โดยเริ่มตั้งแต่การประเมินหาคุณภาพลายม่านตาที่ชัดเจนจากชุดลำดับภาพต่อเนื่อง ซึ่งในแต่ละภาพจากชุดลำดับจะนำมาหาพื้นที่ม่านตาด้วยวิธีอย่างง่าย โดยใช้การรวมค่าระดับเทาของทุกจุดภาพในแนวแกนลงไปยังแกนนอนและแกนตั้งของภาพ และหาจุดต่ำสุดของค่าระดับเทาจากกราฟทั้งสองเป็นจุดศูนย์กลางของรูม่านตาเริ่มต้นอย่างหยาบ ๆ ก่อน เนื่องจากความเร็วของการคัดเลือกคุณภาพลายม่านตาจะต้องมากกว่าอัตราการจับภาพของกล้องเพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้แบบเวลาจริง จากนั้นจึงคำนวณค่าความถึบนพื้นที่ม่านตาโดยใช้การวิเคราะห์จากสเปกตรัมของฟูริเยร์ (Fourier spectrum) เพื่อคัดเลือกคุณภาพลายม่านตามาใช้เป็นภาพม่านตา ภาพม่านตาที่ผ่านการคัดเลือกจะทำการหาตำแหน่งจุดศูนย์กลาง ขอบเขตรัศมีวงแหวนม่านตาด้านในและด้านนอกที่แม่นยำขึ้นต่อไป โดยใช้การแปลงฮิวจ์กับขอบภาพสองระดับ เพื่อเป็นขอบเขตอ้างอิงของการแปลงพื้นที่ม่านตาให้อยู่ในรูปแบบพิกัดเชิงขั้วเช่นเดียวกับ Daugman ขั้นตอนต่อมาจะทำการปรับคอนทราสต์ (Contrast) ของภาพด้วยการปรับฮิสโตแกรม (Histogram Equalization) และปรับความสว่างของภาพ (Brightness) ด้วยการลบค่าพื้นหลังเฉพาะที่ของภาพออก ก่อนการใช้ตัวกรองสมมาตรแนววงรอบ (Circular symmetric filter) ที่มีฟังก์ชันกาบอร์ (Gabor function) เป็นฟังก์ชันมูลฐาน เป็นตัวกรองดึงลักษณะเฉพาะของม่านตาที่มีความสัมพันธ์ในแนววงรอบกับรัศมีร่วมกันอยู่ และแบ่งพื้นที่ลักษณะเฉพาะของม่านตาที่ได้ออกมาคำนวณค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานภายในพื้นที่ย่อยเพื่อสร้างเป็นเวกเตอร์ข้อมูลม่านตา ในส่วนการเปรียบเทียบจะคำนวณค่าระยะห่างของเวกเตอร์ทั้งสองด้วยวิธีการวัดต่าง ๆ หลายรูปแบบ เช่น Taxicab distance Euclidean distance และ Cosine similarity

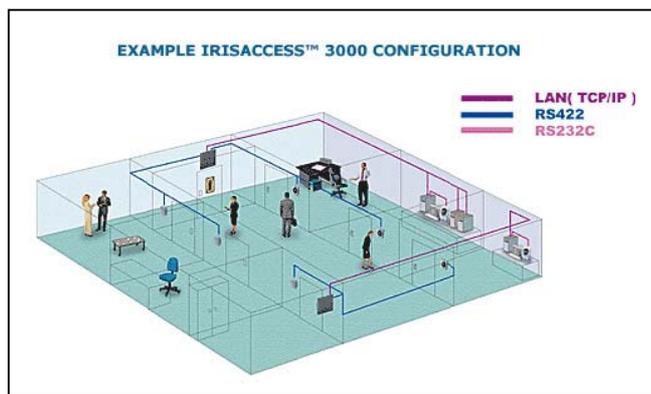
นอกจากนี้แล้วยังมีผู้เสนอวิธีการต่าง ๆ เพื่อใช้วิเคราะห์หารายละเอียดสำคัญของม่านตาอีกได้แก่ Noh *et al.* (2002) ได้นำการวิเคราะห์แบบ Multiresolution Independent Component Analysis (M-ICA) มาประยุกต์ใช้ในการสร้างเซตของฟังก์ชันมูลฐานที่เป็นแบบหลายระดับความละเอียด (Multiresolution) เพื่อให้ผลการแปลงจากเซตของฟังก์ชันมูลฐานมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของม่านตา Tisse *et al.* (2002) ทำการแปลงลายม่านตาด้วยตัวแปลง Hilbert (Hilbert transform) และเข้ารหัสเฟสขณะหนึ่ง (Instantaneous phase) กับความถี่ปรากฏ (Emergent frequency) ของภาพวิเคราะห์ (Analytic image) ที่ได้จากผลการแปลงเป็นข้อมูลม่านตา Horapong *et al.* (2004) เสนอการแปลงลักษณะเชิงขั้วบนพิกัดมุมฉาก ทำให้ไม่จำเป็นต้องแปลงพื้นที่ม่านตาจากพิกัดมุมฉากให้อยู่บนพิกัดเชิงขั้วก่อน ซึ่งลดการเพิ่มสัญญาณรบกวนที่จะเกิดบนลายม่านตากระทั้งมีผลต่อการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

ทั้งนี้ผลงานที่กล่าวมาทั้งหมดใช้เพียงการวิเคราะห์บนโดเมนอวกาศ-ความถี่ (Spatial-frequency Domain) สำหรับวิเคราะห์ลายม่านตา แต่ทว่ายังปรากฏผลงานที่ใช้การวิเคราะห์บนโดเมนอวกาศ (Spatial domain) ของ Lee and Ewe (2004) ที่นำ Fractal Dimension มาประยุกต์หารายละเอียดสำคัญของม่านตา และผลงานของ Thoonsengngam *et al.* (2005, 2006) ที่ได้สกัดเฉพาะลายเส้นบนม่านตาออกมาโดยใช้การตัดค่าระดับสีเทาแบบสัดส่วน (Quotient thresholding) จาก การปรับฮิสโตแกรมเฉพาะที่ (Local histogram equalization)

อย่างไรก็ตามแนวความคิดที่ใช้การแปลงบนโดเมนอวกาศ-ความถี่ มาช่วยหารายละเอียดเฉพาะเพื่อวิเคราะห์ม่านตาในโดเมนอวกาศได้มีผู้นำเสนอขึ้นมา (Sun *et al.*, 2004) ด้วยการหาตำแหน่งของจุดตัดค่าศูนย์ของการแปลงเวฟเล็ต (Zero-crossing of wavelet transform) จากนั้นจะเชื่อมจุดตัดดังกล่าวและรวมเข้าเป็นพื้นที่ที่ปิด โดยในแต่ละพื้นที่ที่ปิดจะคำนวณหาค่าจุดศูนย์กลางวงพื้นที่ และ Central moment เก็บเป็นข้อมูลม่านตา

4. ซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก (Biometric System Software)

ในปัจจุบันได้มีการผลิตระบบไบโอเมตริกทั้งแบบเครือข่ายขนาดใหญ่ที่สามารถควบคุมการเข้าออกได้ทั้งอาคารรวมถึงแบบระบบย่อยที่ใช้ควบคุมการเข้าถึงส่วนบุคคลหรือการเข้าออกเฉพาะที่ อาทิเช่น ผลิตภัณฑ์ของบริษัท LG ที่เป็นระบบรักษาความปลอดภัยและลดเวลาการทำงาน โดยการตรวจม่านตาซึ่งผลิตภัณฑ์นี้ถือเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความแม่นยำสูงสุดติดอันดับโลก ด้วยการสแกนม่านตาเพียง 1 วินาที ในระยะห่างประมาณ 3 – 10 นิ้ว สามารถควบคุมการเข้าออกภายในเฉพาะกลุ่ม โดยมีฮาร์ดแวร์ย่อยติดตามทางเข้าออกต่าง ๆ ซึ่งสามารถทำงานได้ในตัวเอง และยังมี ความสามารถต่อพ่วงเป็นระบบเครือข่ายได้มากถึง 128 ประตู ผ่านทาง RS232 RS422 และ TCP/IP ดังแสดงในภาพที่ 6



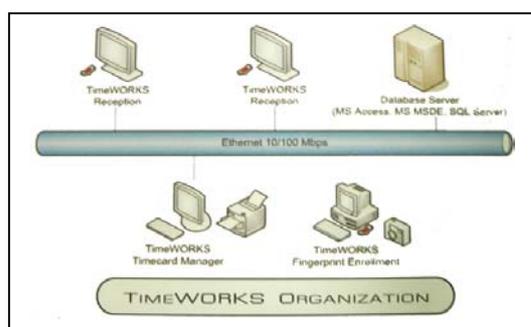
(ก) การตรวจม่านตาเป็นระบบเครือข่าย



(ข) เครื่องตรวจม่านตา

ภาพที่ 6 ระบบรักษาความปลอดภัยและลงเวลาการทำงาน โดยการตรวจม่านตา (ก) การตรวจม่านตาเป็นระบบเครือข่าย (ข) เครื่องตรวจม่านตา
ที่มา: บริษัท LG Electronics

นอกจากนี้ยังมีการใช้งานไบโอเมตริกชนิดอื่นเพื่อควบคุมการผ่านเข้าออกประตู หรือการลงเวลาการทำงาน ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ระบบลงเวลาด้วยลายนิ้วมือ TimeWORKS ของบริษัท IT WORKS ซึ่งเป็นบริษัทที่ถือได้ว่าเป็นผู้นำทางด้านผลิตภัณฑ์ลายนิ้วมืออันดับต้น ๆ ของประเทศไทย โดยผลิตภัณฑ์ที่วางจำหน่ายมีความสามารถและแม่นยำสูง สามารถค้นหาลายนิ้วมือจำนวน 1000 คนได้ในเวลา 0.4 วินาที มีค่าความผิดพลาดในการยืนยันผิด (FAR) น้อยกว่า 0.001% และค่าความผิดพลาดที่เจ้าของถูกยืนยันผิด (FRR) น้อยกว่า 0.01% แต่ทว่ายังต้องใช้งานกับคอมพิวเตอร์เท่านั้น ไม่มีฮาร์ดแวร์ประมวลผลย่อยทำงานติดตามประตูต่าง ๆ ได้ ดังแสดงในภาพที่ 7



(ก) ระบบเครือข่ายของการตรวจสอบลายนิ้วมือ



(ข) เครื่องอ่านลายนิ้วมือ

ภาพที่ 7 ระบบลงเวลาด้วยลายนิ้วมือ (ก) ระบบเครือข่ายของการตรวจสอบลายนิ้วมือ (ข) เครื่องอ่านลายนิ้วมือ
ที่มา: บริษัท IT WORKS

อุปกรณ์และวิธีการ

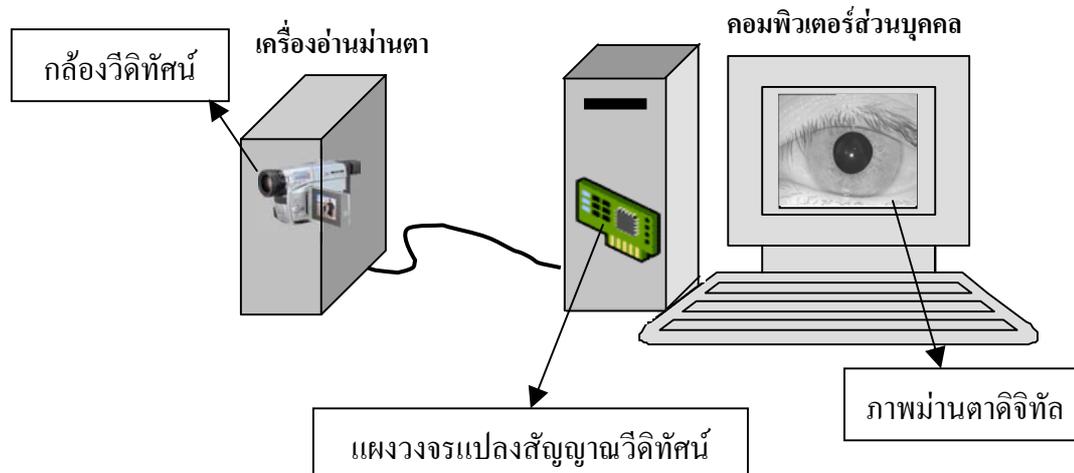
อุปกรณ์การพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา

วัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับดำเนินการวิจัยและพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา ประกอบด้วย

1. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Pentium IV 1.8 GHz RAM 256 Mbytes	1	เครื่อง
2. โปรแกรมประมวลผลภาพเกษตรศาสตร์ (KIP Program) เขียนด้วยภาษา C++	1	ชุด
3. ฐานข้อมูลภาพม่านตาทดสอบ ประกอบด้วย		
3.1 ฐานข้อมูลม่านตาของจีนชื่อ CASIA v.1	1	ชุด
3.2 ฐานข้อมูลม่านตาของไทยชื่อ KSIP DB01R	1	ชุด
4. ซอฟต์แวร์เขียนโปรแกรม Microsoft Visual C++ รุ่นที่ 6.0	1	ชุด

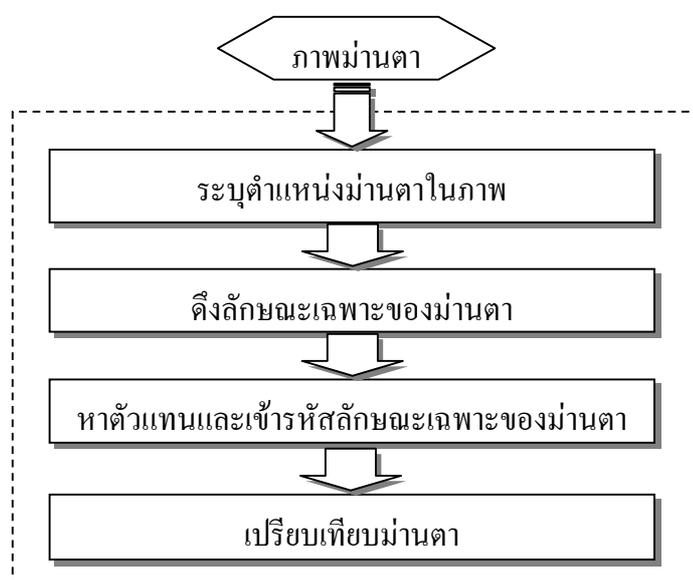
วิธีการพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา

การวิจัยและพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาได้แบ่งส่วนของการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วนคือ การคิดค้นและเขียนโปรแกรมขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาเพื่อหาวิธีการวิเคราะห์ม่านตาที่ใช้ในการรู้จำ และการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่ได้คิดค้นขึ้น ซึ่งในส่วนที่สองนี้จะกล่าวอยู่ในหัวข้อของผลการพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาต่อไป โดยฐานข้อมูลที่น่ามาใช้ทั้งในการคิดค้นและเขียนโปรแกรมกับฐานข้อมูลที่น่ามาใช้ในการทดสอบ จะใช้ฐานข้อมูลภาพม่านตาแบบดิจิทัลของจีนและของไทย ซึ่งได้รับความร่วมมือจาก Institute of Automation, Chinese Academy of Science อนุญาตให้นำฐานข้อมูลของจีนชื่อ CASIA v.1 มาทำการวิจัย นอกจากนี้ในส่วนฐานข้อมูลม่านตาของไทยชื่อ KSIP DB01R ซึ่งห้องปฏิบัติการประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นผู้อนุญาตให้นำมาทดสอบกับงานวิจัยนี้อีกส่วนหนึ่ง โดยฐานข้อมูลม่านตา KSIP DB01R ใช้อุปกรณ์รับภาพม่านตาต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้นเองของห้องปฏิบัติการประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์ เป็นตัวเก็บข้อมูลประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ต่อเข้ากับกล้องวิดีโอแบบแอนะล็อกที่สามารถรับภาพในย่านใกล้แสงอินฟราเรด (Near Infrared) ได้ ผ่านแผงวงจรแปลงสัญญาณวิดีโอแบบแอนะล็อกเป็นข้อมูลทางดิจิทัล เพื่อให้ได้ภาพม่านตาแบบดิจิทัล ดังแสดงการเชื่อมต่อทางฮาร์ดแวร์ในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ชุดอุปกรณ์รับภาพม่านตาของฐานข้อมูลชื่อ KSIP DB01R

สำหรับในส่วนของการวิเคราะห์ภาพม่านตาได้แบ่งการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอนวิธีย่อยที่สำคัญตามภาพที่ 9 ดังนี้



ภาพที่ 9 ผังลำดับขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา

1. การระบุตำแหน่งม่านตา (Iris Localization) เป็นการหาและตัดเฉพาะส่วนบริเวณม่านตาออกจากภาพดวงตาเพื่อจำกัดพื้นที่สำหรับการวิเคราะห์ต่อไป เนื่องจากภาพม่านตาที่รับมานั้นประกอบไปด้วยหลายส่วน เช่น ขนตา เปลือกตา ตาขาว รูม่านตา และม่านตา

2. การดึงลักษณะเฉพาะของม่านตา (Iris Feature Extraction) เป็นการหาลักษณะเฉพาะบนพื้นที่ม่านตาที่ได้ระบุตำแหน่งไว้แล้วเพื่อที่จะนำไปใช้ในการรู้จำม่านตาต่อไป โดยวิธีการดึงลักษณะเฉพาะในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์จากบนโดเมนอวกาศร่วมกับการวิเคราะห์จากบนโดเมนอวกาศ-ความถี่ ซึ่งงานในขั้นตอนนี้ถือได้ว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากจากขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาทั้งหมดและเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา อีกทั้งจะบอกถึงความแตกต่างของขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตานี้จากขั้นตอนวิธีอื่น ๆ

3. การแทนและเข้ารหัสลักษณะเฉพาะของม่านตา (Iris Feature Representation and Encoding) เป็นการเลือกลักษณะเฉพาะที่สำคัญ เพื่อเป็นตัวแทนของลักษณะเฉพาะของม่านตาทั้งหมด และทำการเข้ารหัสข้อมูลที่ได้เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

4. การเปรียบเทียบม่านตา (Iris Matching) เป็นการนำรหัสม่านตาที่ได้มาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล เพื่อจะตัดสินใจและระบุตัวบุคคล

รายละเอียดของหัวข้อต่าง ๆ จะกล่าวอยู่ในหัวข้อย่อยต่อไป

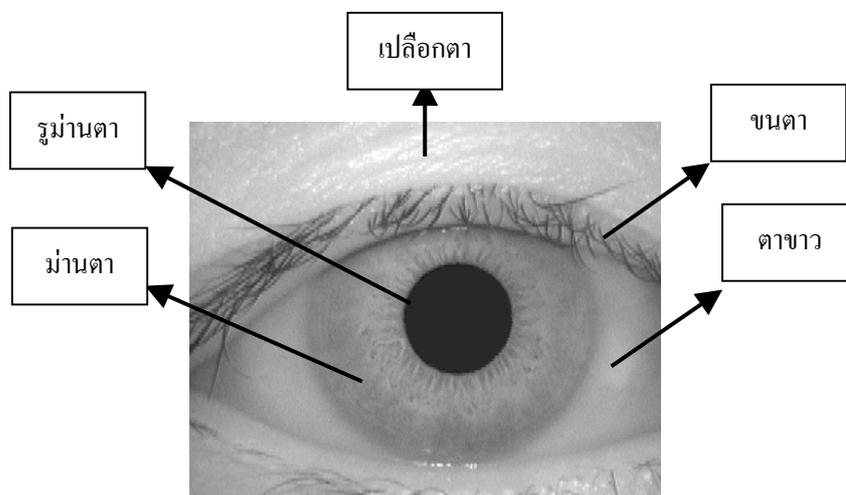
1. วิธีการระบุตำแหน่งม่านตา (Iris Localization Method)

ภาพม่านตาประกอบด้วยหลายส่วนทั้งม่านตา รูม่านตา ตาขาว เปลือกตา และขนตา ดังแสดงในภาพที่ 10 การหาค่าตำแหน่งของม่านตาก่อนเริ่มทำการวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะต่อไปจึงมีความจำเป็น

1.1 ที่มาและสมมติฐาน

เนื่องจากม่านตามีลักษณะเป็นรูปวงแหวนที่อยู่ระหว่างรูม่านตาและส่วนของตาขาว ทำให้การใช้ระบบพิกัดเชิงขั้วสำหรับอ้างอิงขอบเขตของม่านตานั้นมีความเหมาะสม โดยขอบเขตของม่านตาจะอ้างอิงจากจุดศูนย์กลางของวงแหวนที่มีรัศมีของรูม่านตาเป็นรัศมีของขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านใน และรัศมีของการเปลี่ยนแปลงจากม่านตาไปสู่ส่วนของตาขาวเป็นรัศมีของขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านนอก โดยในงานวิจัยนี้ทั้งรัศมีของขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านในและด้านนอกใช้จุดศูนย์กลางร่วมกัน ด้วยเหตุนี้ขั้นตอนการระบุขอบเขตของม่านตาจึงเริ่มจากการหาจุดศูนย์กลางของวงแหวน ซึ่งในที่นี้จะใช้การหาจุดศูนย์กลางของรูม่านตาแทน ต่อจากนั้นทำการหา

ค่ารัศมีของขอบเขตวงแหวนม่านตาด้วยการอ้างอิงจากจุดศูนย์กลางที่ได้ รายละเอียดในขั้นตอนต่าง ๆ จะกล่าวอยู่ในหัวข้อย่อต่อไป



ภาพที่ 10 ส่วนประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ภายในภาพม่านตา

1.2 ขั้นตอนวิธีการหาขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านใน

จากสมมติฐานของจุดศูนย์กลางรูม่านตาและจุดศูนย์กลางของวงแหวนม่านตาเป็นจุดที่อยู่ร่วมกัน และรัศมีขอบเขตของรูม่านตาเป็นรัศมีเดียวกันกับรัศมีของวงแหวนม่านตาด้านใน ทำให้การหาขอบเขตม่านตาสามารถใช้จุดศูนย์กลางของรูม่านตาเป็นจุดศูนย์กลางอ้างอิง และรัศมีขอบเขตของรูม่านตาเป็นรัศมีของวงแหวนม่านตาด้านในได้ ซึ่งวิธีการหาจุดศูนย์กลางและรัศมีของขอบเขตรูม่านตาจะเริ่มจากการหาดำแหน่งของรูม่านตาก่อนด้วยวิธีการตัดค่าระดับสี (Thresholding) เพื่อแยกกลุ่มจุดภาพของรูม่านตาออกมาจากภาพม่านตา เนื่องจากรูม่านตามีสีที่ค่อนข้างดำและเกาะกลุ่มกันอย่างโดดเด่นในภาพม่านตาจึงสามารถใช้วิธีการพื้นฐานนี้ได้ จากนั้นนำขอบของรูม่านตาที่ได้ประมาณด้วยสมการวงกลมเพื่อให้ได้ตัวแทนจุดศูนย์กลางและรัศมีวงกลมของขอบเขตรูม่านตาออกมา ซึ่งขั้นตอนของการหาตัวแทนจุดศูนย์กลางและรัศมีของรูม่านตามีรายละเอียดดังนี้

1.2.1 ทำการปรับภาพม่านตาด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเกาส์เซียน (Gaussian Low-pass Filter, GLPF) ตามสมการที่ (1) เพื่อทำให้ค่าระดับสีในภาพมีความสม่ำเสมอและเป็นการลดสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากขนตาและลายม่านตาที่มีค่าระดับสีใกล้เคียงกับค่าระดับสีของรูม่านตา นอกจากนั้นยังเป็นการเตรียมภาพสำหรับตัดค่าระดับสี ในที่นี้ได้เลือกใช้ตัว

กรองความถี่ต่ำผ่านแบบเกาส์เซียนที่มีความยาวเป็น 13 จุดภาพ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันเกาส์เซียนเท่ากับ 5 โดยผลการกรองภาพมาตามแสดงไว้ในภาพที่ 11 (ข) โดยสมการตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเกาส์เซียนเป็นดังต่อไปนี้

$$g(x) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{ \frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \right) \quad (1)$$

ซึ่ง $g(x)$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเกาส์เซียน ที่ตำแหน่ง x
 μ เป็นค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันเกาส์เซียน
 σ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันเกาส์เซียน

1.2.2 หาฮิสโตแกรมของค่าระดับสีทั้งภาพมาตามตา เพื่อใช้หาค่าระดับขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) สำหรับตัดค่าระดับสี ดังแสดงในภาพที่ 11 (ค)

1.2.3 ปรับฮิสโตแกรมให้เรียบขึ้นด้วยการเฉลี่ยค่ากับจุดด้านข้างทางด้านซ้ายและขวาออกไปยาว 2 จุด รวมทั้งหมดเป็นการเฉลี่ยด้วย 5 จุด ดังแสดงผลของฮิสโตแกรมในภาพที่ 11 (ง) เพื่อที่จะลดการแกว่งของฮิสโตแกรมซึ่งจะมีผลต่อการหาจุดเปลี่ยนความชันภายหลัง

1.2.4 หาความชันของฮิสโตแกรมด้วยการหาค่าผลต่างของจุดด้านข้างซ้ายและขวาที่ห่างออกไป 2 จุด เพื่อไว้ใช้จับการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล ซึ่งรูปความชันของฮิสโตแกรมได้แสดงไว้ดังภาพที่ 11 (จ)

1.2.5 หาค่าระดับขีดเริ่มเปลี่ยนเพื่อตัดค่าระดับสีจากกราฟความชันของฮิสโตแกรม โดยพิจารณาจุดที่มีค่าความชันมากกว่าหนึ่งจุดแรกหลังจากค่าความชันได้ตกไปถึงค่าติดลบแล้ว ซึ่งการหาจุดดังกล่าวจะเริ่มต้นมาจากค่าระดับสีที่ศูนย์ของฮิสโตแกรม

1.2.6 ทำการตัดค่าระดับสีด้วยค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่เลือกจากฮิสโตแกรมในข้อ 1.2.5 และทำการหาขอบภาพด้วยตัวกรอง Sobel พร้อมทั้งทำขอบภาพให้บางเหลือ 1 จุดภาพด้วย Thinning Algorithm (Gonzalez and Woods, 2001) เพื่อเตรียมขอบของภาพไว้ใช้ในการประมาณสมการวงกลม ดังแสดงในภาพที่ 11 (ข)

1.2.7 ผลจากการตัดค่าระดับสีที่อาจมีสัญญาณรบกวนซึ่งไม่ใช่รูปร่างตาติออกมา ทำให้จำเป็นต้องมีการเลือกขอบของวัตถุทั้งหมดที่มีอยู่ในภาพก่อน ด้วยการอาศัยลักษณะขอบของรูปร่างตาที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นถ้าขอบของวัตถุที่อยู่ในภาพมีลักษณะไม่ตรงกับลักษณะของขอบรูปร่างตาจะถูกลบทิ้ง โดยลักษณะขอบที่จะถูกเลือกเป็นขอบของรูปร่างตาจะต้องมีความยาวเส้นรอบรูปมากกว่า 169 จุดภาพ และมีขนาดความกว้างกับความยาวต่างกันไม่เกิน 30 จุดภาพ ดังแสดงผลการเลือกในภาพที่ 11 (ซ)

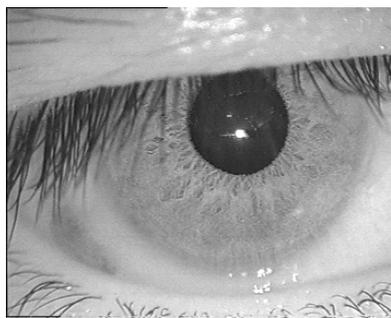
1.2.8 ทำการประมาณขอบของรูปร่างตาด้วยสมการวงกลม โดยการนำจุดสามจุดของขอบรูปร่างตาเข้าไปแทนในสมการวงกลม (2) เพื่อให้ได้จุดศูนย์กลางและรัศมีออกมา ดังนั้นเมื่อแทนจนครบทุกจุดของขอบรูปร่างตาแล้วจะทำให้เกิดชุดของจุดศูนย์กลางและรัศมีออกมา ทำให้ต้องหาตัวแทนในชุดดังกล่าว ในที่นี้จะใช้การหาค่าเฉลี่ยภายในชุดข้อมูลนั้นเป็นตัวแทนทั้งจุดศูนย์กลางและรัศมี ผลการประมาณด้วยสมการวงกลมได้แสดงเป็นเส้นสีเทาในภาพที่ 11 (ฅ)

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r^2 \quad (2)$$

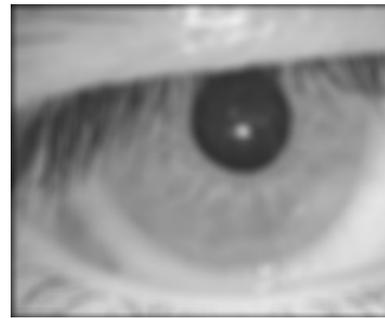
ซึ่ง (x, y) เป็นจุดภาพของขอบรูปร่างตาที่จะประมาณด้วยสมการวงกลม
 (x_c, y_c, r) เป็นตำแหน่งจุดศูนย์กลางและรัศมีของวงกลมที่ได้จากสมการวงกลม

1.2.9 ทำการลดความคลาดเคลื่อนจากผลการประมาณขอบของรูปร่างตาด้วยสมการวงกลมโดยการเลื่อนจุดศูนย์กลางและขยายขนาดรัศมี กรณีที่ขอบรูปร่างตาที่ได้มีลักษณะเป็นวงกลมจะเลื่อนจุดศูนย์กลางของวงกลมทางด้านซ้าย-ขวา และด้านบน-ล่าง จนกระทั่งขอบวงกลมสมมูลกับขอบรูปร่างตาแล้วจึงขยายขนาดรัศมีให้วงกลมครอบคลุมขอบรูปร่างตา แต่สำหรับกรณีขอบรูปร่างตาไม่เป็นวงกลมจะเลื่อนจุดศูนย์กลางเฉพาะทางด้านซ้าย-ขวาให้ขอบวงกลมสมมูลแล้วขยายขนาดรัศมีให้คลุมขอบรูปร่างตา จากนั้นจึงวางขอบล่างของวงกลมซ้อนขอบล่างของรูปร่างตา ดังแสดงผลในภาพที่ 11 (ญ)

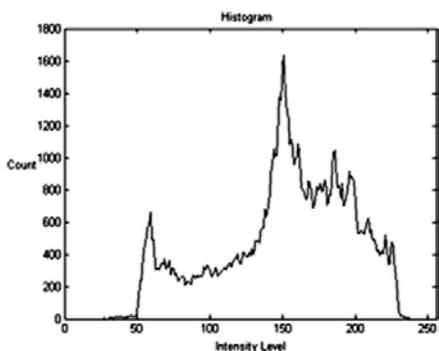
โดยขั้นตอนวิธีการหาขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านในทั้งหมดจะสรุปไว้ในตารางที่ 2 และแสดงแผนภาพรวมของขั้นตอนวิธีดังภาพที่ 12



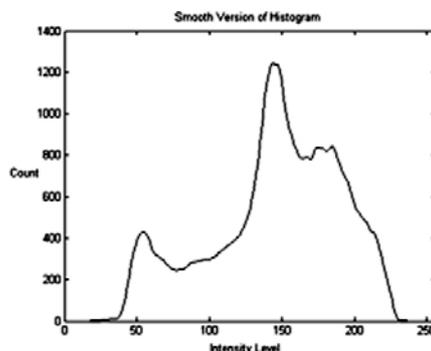
(ก) ภาพต้นฉบับ 088_0_001_4 ในฐานข้อมูล KSIP_DB01R



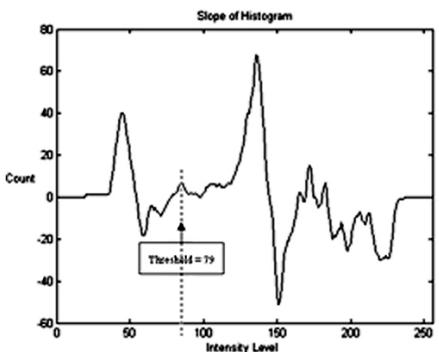
(ข) ภาพที่ผ่านการกรองด้วย GLPF



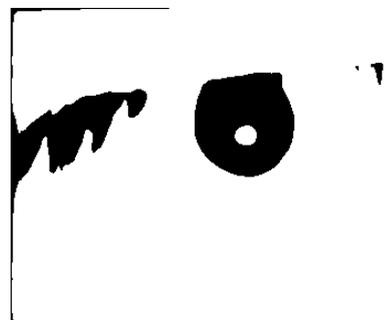
(ค) ฮิสโตแกรมของภาพ (ข)



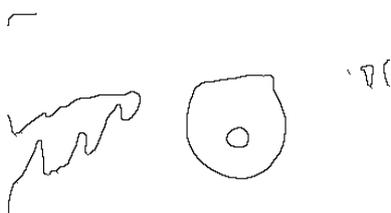
(ง) ผลการปรับฮิสโตแกรมให้เรียบ



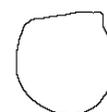
(จ) ความชันของฮิสโตแกรม



(ฉ) ภาพหลังจากการตัดค่าระดับสี

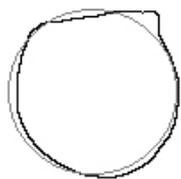


(ช) ภาพจากการหาขอบและทำขอบภาพให้บาง

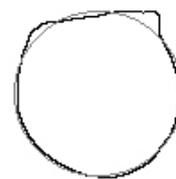


(ซ) กลุ่มข้อมูลที่ถูกเลือกเป็นรูม่านตา

ภาพที่ 11 ผลของการหาขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านใน ในขั้นตอนต่าง ๆ



(ฉ) ผลการประมาณขอบด้วยสมการวงกลม



(ญ) ผลการลดความเคลื่อนจากการประมาณด้วยสมการวงกลม

ภาพที่ 11 (ต่อ)

ตารางที่ 2 สรุปขั้นตอนวิธีของการหาขอบเขตวงแหวนม่านตาในด้านใน

สรุปขั้นตอนวิธี การหาขอบเขตวงแหวนม่านตาในด้านใน

1: หาฮิสโตแกรมของภาพม่านตา

1.1 ปรับภาพม่านตาให้เรียบขึ้นด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเกาส์เซียน (GLPF)

1.2 หาฮิสโตแกรมของค่าระดับสีในทั้งภาพ

2: ตัดค่าระดับสีเพื่อหารูม่านตา

2.1 ปรับฮิสโตแกรมให้มีความเรียบขึ้น ด้วยการเฉลี่ยค่ากับจุดด้านข้างซ้ายขวาออกไป 2 จุด

2.2 หาความชันของฮิสโตแกรม ด้วยการหาค่าผลต่างของจุดด้านข้างซ้ายและขวาที่ห่างออกไป 2 จุด

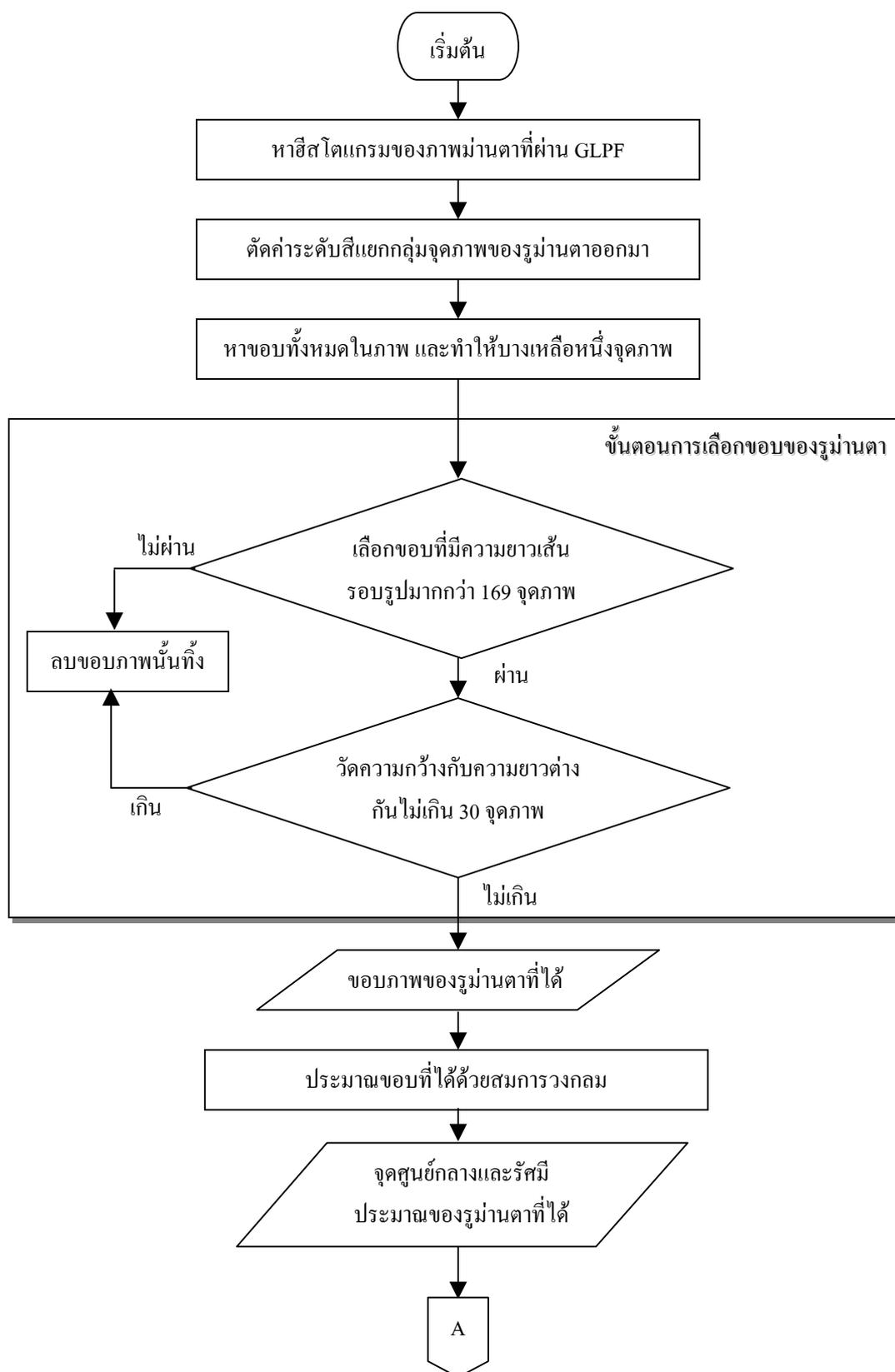
2.3 หาจุดที่มีค่าความชันมากกว่าหนึ่งจุดแรก หลังจากค่าความชันได้ตกไปถึงค่าติดลบ และกำหนดให้เป็นค่าระดับขีดเริ่มเปลี่ยนเพื่อตัดค่าระดับสี

3: ทำการหาขอบภาพด้วยตัวกรอง Sobel และทำขอบภาพให้บางด้วย Thinning Algorithm

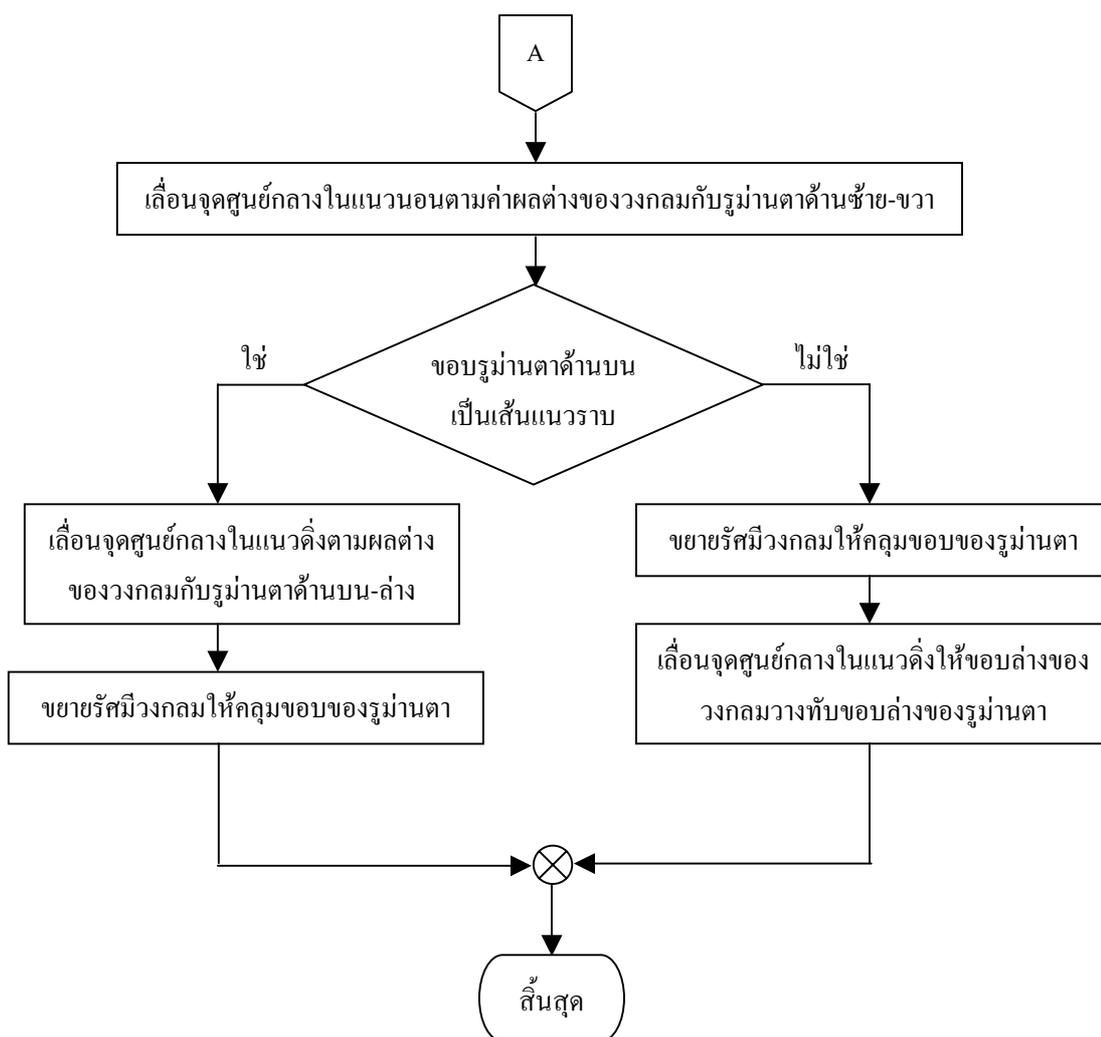
4: เลือกหาขอบของรูม่านตาโดยวัดความยาวเส้นรอบรูปที่มากกว่า 169 จุดภาพ และวัดขนาดความกว้างกับความยาวของวัตถุต่างกันไม่เกิน 30 จุดภาพ

5: ประมาณขอบของรูม่านตาที่ได้ด้วยสมการวงกลม

6: ลดความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางที่ได้จากการประมาณ ด้วยการปรับให้มีความสมดุลระหว่างขอบของวงกลมที่ได้กับขอบของรูม่านตาทั้งแนวซ้าย-ขวา และ/หรือแนวบน-ล่าง พร้อมขยายวงกลมให้คลุมขอบของรูม่านตา



ภาพที่ 12 แผนภาพรวมของขั้นตอนการหาขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านใน



ภาพที่ 12 (ต่อ)

1.3 ขั้นตอนวิธีการหาขอบเขตวงแหวนด้านนอก

จุดศูนย์กลางและรัศมีขอบเขตวงแหวนด้านนอกที่ได้จากการประมาณขอบของรูปร่างด้วยสมการวงกลม จะถูกนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงเพื่อหารัศมีขอบเขตวงแหวนด้านนอกต่อไป โดยอาศัยการหารัศมีที่ออกจากจุดศูนย์กลางที่มีความแตกต่างของค่าระดับสีเปลี่ยนแปลงจากพื้นที่ด้านใน (มีสีค่อนข้างเทา) ไปเป็นส่วนของด้านนอก (มีสีค่อนข้างขาว) ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนวิธีจะกล่าวในหัวข้อต่อไป และสรุปขั้นตอนวิธีจะแสดงอยู่ในตารางที่ 3 พร้อมแผนภาพรวมของขั้นตอนวิธีในภาพที่ 15 โดยมีขั้นตอนรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.3.1 เพิ่มความแตกต่างของค่าระดับสีระหว่างพื้นที่ม่านตากับส่วนของตาขาวให้เด่นชัดขึ้น ด้วยการนอแมลไลซ์ค่าระดับสีทั้งภาพให้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 106 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ 9000 ตามสมการที่ (3)

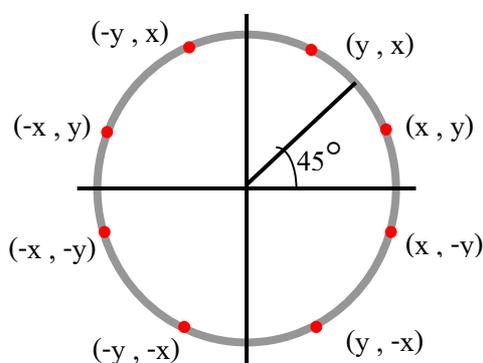
$$N_i(x, y) = \begin{cases} M_o + \sqrt{\frac{V_o \times (I(x, y) - M_i)^2}{V_i}} & , \text{ ถ้า } I(x, y) > M_i \\ M_o - \sqrt{\frac{V_o \times (I(x, y) - M_i)^2}{V_i}} & , \text{ ในกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (3)$$

โดยที่ $N_i(x, y)$ คือ ค่าสีระดับเทาของแต่ละจุดภาพหลังการนอแมลไลซ์
 $I(x, y)$ คือ ค่าสีระดับเทาของแต่ละจุดภาพก่อนการนอแมลไลซ์
 M_o คือ ค่าเฉลี่ยของภาพที่ต้องการ
 V_o คือ ค่าความแปรปรวนของภาพที่ต้องการ
 M_i คือ ค่าเฉลี่ยของภาพก่อนการทำนอแมลไลซ์
 V_i คือ ค่าความแปรปรวนของภาพก่อนการทำนอแมลไลซ์

1.3.2 ทำการปรับภาพด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเกาส์เซียนเช่นเดียวกันกับข้อ 1.2.1 เพื่อลดสัญญาณรบกวนต่าง ๆ

1.3.3 หาวิธีที่มีความแตกต่างของค่าระดับสีจากสีเทา (ม่านตา) เป็นสีขาว (ส่วนของตาขาว) โดยจะพิจารณาค่าระดับสีเฉพาะส่วนโค้งวงกลมที่ 0 ถึง -45 องศา เทียบกับแนวระดับ ซึ่งวิธีเริ่มต้นที่พิจารณาเป็นวิธีที่ตัดออกจากวิธีขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านในไป 32 ค่า จากนั้นเริ่มทำการหาค่าระดับสีเฉลี่ยจากรัศมีเริ่มต้นดังกล่าวออกไป 8 ค่า และเก็บเป็นค่าเฉลี่ยรวมเริ่มต้น แล้วจึงเริ่มขั้นตอนการตรวจจับด้วยการหาค่าผลต่างของค่าระดับสีเฉลี่ยของจุดภาพที่รัศมีตัดออกไปเทียบกับรัศมีเดิม ถ้ามีค่าแตกต่างน้อยกว่า 16 ให้รวมค่าเฉลี่ยเข้ากับค่าเฉลี่ยรวมแล้วพิจารณารัศมีถัดไป แต่ถ้าค่าผลต่างมีค่ามากกว่า 16 จะกำหนดให้เป็นรัศมีขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านนอกและจบการทำงาน

สำหรับจุดภาพในส่วนโค้งวงกลมจะประยุกต์วิธีการสร้างเส้นโค้งวงกลมด้วยขั้นตอนวิธีของ Bresenham (Bresenham, 1977) ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและมีความรวดเร็วเนื่องจากภาพดิจิทัลประกอบด้วยจุดภาพที่มีลักษณะสี่เหลี่ยม การสร้างเส้นรอบวงที่จะให้มีลักษณะเป็นวงปิดจะต้องเกิดการประมาณตำแหน่งขึ้น โดยขั้นตอนวิธีนี้จะใช้วิธีการทดสอบจุดกึ่งกลางระหว่างจุดภาพใกล้เคียงกันที่มีสิทธิเป็นส่วนโค้งของวงกลมและกำหนดจุดที่ถูกเลือกจากการทดสอบเป็นจุดภาพที่อยู่บนส่วนโค้งวงกลม ซึ่งการสร้างวงกลมจะสร้างขึ้นเฉพาะในส่วนของมุม 0 ถึง 45 องศา กรณีจุดภาพที่อยู่นอกเหนือจากส่วนนี้จะใช้การอ้างอิงตำแหน่งด้วยคุณสมบัติความสมมาตรของวงกลมดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ความสมมาตรของจุดในรูปวงกลม

จากฟังก์ชันของวงกลมเมื่อจุดศูนย์กลางของวงกลมอยู่ที่ $(0,0)$

$$f_{circle}(x, y) = x^2 + y^2 - r^2 \quad (4)$$

โดยที่ (x, y) คือ ตำแหน่งของจุดภาพ

r คือ รัศมีของวงกลมที่กำหนด

ดังนั้นจะได้

$$f_{circle} \begin{cases} < 0, \text{ เมื่อจุด } (x, y) \text{ อยู่ในขอบเขตของวงกลม} \\ = 0, \text{ เมื่อจุด } (x, y) \text{ อยู่บนขอบเขตของวงกลม} \\ > 0, \text{ เมื่อจุด } (x, y) \text{ อยู่ภายนอกขอบเขตของวงกลม} \end{cases}$$

ทำให้การตัดสินใจเลือกตำแหน่งของจุดภาพ $(x_k + 1, y_k)$ กับ $(x_k + 1, y_k - 1)$ ว่าจุดไหนเป็นจุดบนเส้นรอบวงนั้นจะพิจารณาที่จุดกึ่งกลางของทั้งสองว่าอยู่ที่ขอบเขตไหนของวงกลม (พิจารณา f_{circle})

$$p_k = (x_k + 1)^2 + (y_k - \frac{1}{2})^2 - r^2 \quad (5)$$

โดยที่ p_k คือ จุดทดสอบที่ตำแหน่ง $x_k + 1$

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างจุดทดสอบจะได้

$$p_{k+1} = p_k + 2(x_k + 1) + (y_{k+1}^2 + y_k^2) - (y_{k+1} + y_k) + 1 \quad (6)$$

ซึ่งทำให้ได้ขั้นตอนวิธีการสร้างเส้นรอบวงดังแสดงในภาพที่ 14

```

Set p0 = 5/4 - r; x=0; y=r;
While(x < y) :
    If (p_k < 0) : p_{k+1} = p_k + 2 x_{k+1} + 1;
                    Plot(x_k+1, y_k);
    If (p_k ≥ 0) : p_{k+1} = p_k + 2 x_{k+1} + 1 - 2 y_{k+1};
                    Plot(x_k+1, y_k-1);

```

ภาพที่ 14 ขั้นตอนวิธีการสร้างเส้นโค้งวงกลมบนจุดภาพดิจิทัล

ตารางที่ 3 สรุปขั้นตอนวิธีการหาขอบเขตวงแหวนม่านตาภายนอก

สรุปขั้นตอนวิธี การหาขอบเขตวงแหวนม่านตาภายนอก

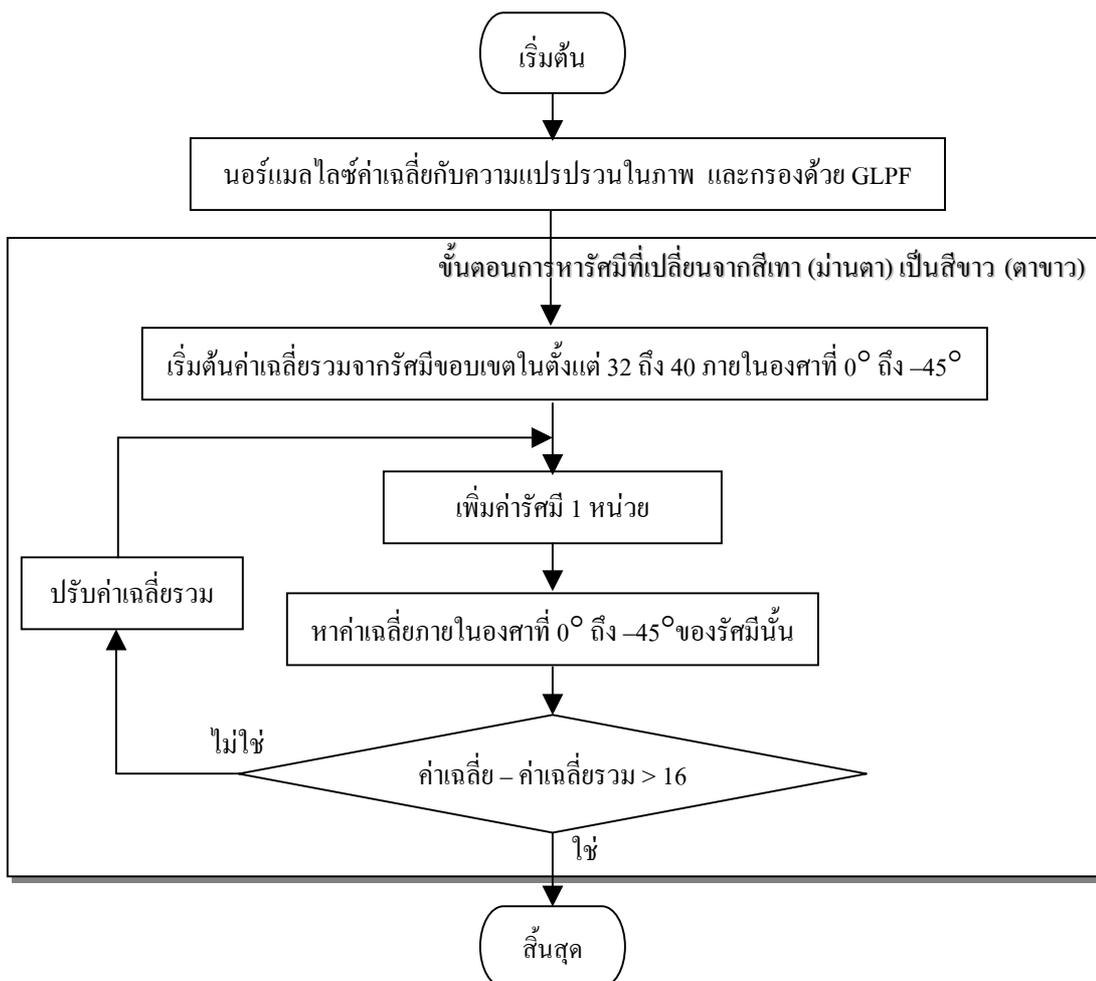
1: ปรับปรุงภาพม่านตา

1.1 เพิ่มความแตกต่างของค่าระดับสีระหว่างพื้นที่ม่านตากับส่วนของตาขาวให้เด่นชัดขึ้น ด้วยการนอแมลไลซ์ค่าระดับสีทั้งภาพให้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 106 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ 9000

1.2 ปรับภาพม่านตาให้เรียบขึ้นด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเกาส์เซียน

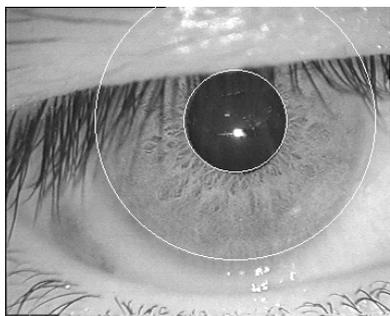
ตารางที่ 3 (ต่อ)

- 2: หรัศมีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของค่าระดับสีจากสีเทา (ม่านตา) เป็นสีขาว (ตาขาว)
- 2.1 หาค่าเฉลี่ยเริ่มต้นจากรัศมีตั้งแต่ (รัศมีขอบเขตใน+32) ถึง (รัศมีขอบเขตใน+40) เฉพาะ ส่วนของม่านตาในองศาที่ 0° ถึง -45°
 - 2.2 เริ่มการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่รัศมี (รัศมีขอบเขตใน+40)
 - 2.3 เพิ่มค่ารัศมีออกไปหนึ่งหน่วยและหาค่าเฉลี่ยเฉพาะในรัศมีนั้น ในองศาที่ 0° ถึง -45°
 - 2.4 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของรัศมีที่พิจารณากับค่าเฉลี่ยเดิม ถ้ามีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยเดิมถึง 16 ให้ออกจากกระบวนการตรวจจับ โดยให้ที่รัศมีนั้นเป็นรัศมีขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านนอก แต่ถ้ามีค่าไม่มากกว่าค่าเฉลี่ยเดิมถึง 16 ให้ปรับค่าเฉลี่ยเดิมโดยรวมค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นนี้เข้าไปและย้อนกลับ (2.3)

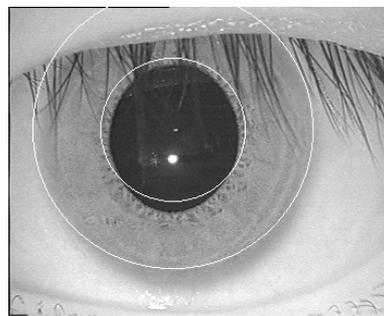


ภาพที่ 15 แผนภาพรวมของขั้นตอนการหาขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านนอก

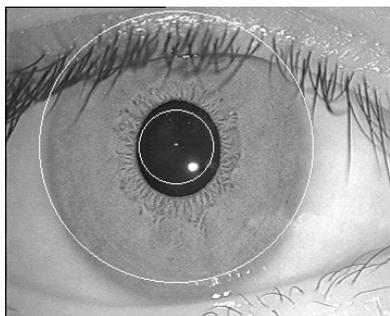
ผลการระบุตำแหน่งม่านตาโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงความเข้ม ได้แสดงในภาพที่ 16 ประกอบด้วยภาพที่สามารถระบุตำแหน่งได้ถูกต้อง และภาพที่แสดงความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ทั้งการระบุจุดศูนย์กลางที่ผิดพลาด การระบุรัศมีขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านในและด้านนอกผิดพลาด



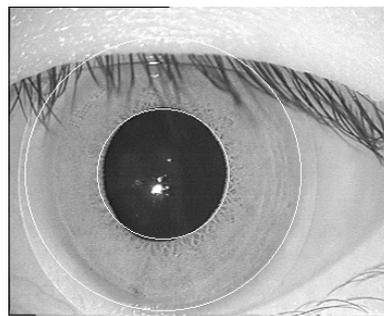
(ก) การระบุตำแหน่งม่านตาประสบความสำเร็จ



(ข) การระบุจุดศูนย์กลางผิดพลาด



(ค) การระบุขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านในผิดพลาด



(ง) การระบุขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านนอกผิดพลาด

ภาพที่ 16 ตัวอย่างของผลการทดสอบการระบุตำแหน่งม่านตา

2. หลักการกระจายรายละเอียดแบบแบ่งแยกได้เชิงขั้วด้วยชุดตัวกรองเวฟเล็ต (Polar-Based Separable Decomposition Using Wavelet Filter Banks)

โดยทั่วไปการกระจายสัญญาณภาพสองมิติออกเป็นช่วงแถบความถี่ย่อยด้วยการแปลงเวฟเล็ตจะให้รายละเอียดของสัญญาณแบ่งแยกออกมาตามแนวแกนและหลักของภาพ แต่สำหรับกรณีของรายละเอียดส่วนใหญ่ของสัญญาณมีอยู่ในแนวแกนอื่นที่ไม่ใช่แนวแกนและแนวหลักของภาพวิธีการกระจายรายละเอียดด้วยการแปลงเวฟเล็ตแบบเดิมจะไม่สามารถรักษาทิศทางส่วนใหญ่ของรายละเอียดของสัญญาณได้ แต่จะแบ่งรายละเอียดของสัญญาณกระจายอยู่ตามแนวแกนและแนวหลักของภาพ ดังนั้นแนวความคิดของการกระจายรายละเอียดของสัญญาณสองมิติในแนวแกนเชิงขั้วจึงถูกเสนอขึ้น เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่รายละเอียดส่วนใหญ่มีทิศทางตามแนวแกนพิกัดเชิงขั้ว

2.1 ทฤษฎีการแปลงเวฟเล็ทและบทประยุกต์ด้วยชุดตัวกรอง (Discrete Wavelet Transform and Relationship to Filter Banks)

การแปลงเวฟเล็ท (Continuous wavelet transform, CWT) ของสัญญาณต่อเนื่อง $f(t)$ กับฟังก์ชันเวฟเล็ทแม่ (Mother wavelet) $\psi(t)$ ในปริภูมิ $L^2(\mathbb{R})$ ซึ่งเป็นปริภูมิเวกเตอร์เชิงเส้น (Linear vector space) ที่ฟังก์ชันภายในปริภูมิมีคุณสมบัติพลังงานจำกัด (Square integrable function) สามารถนิยามการแปลงได้ด้วยผลคูณภายใน (Inner product) ระหว่างสัญญาณกับชุดของฟังก์ชันในรูปแบบการเลื่อนและการยืดขยายของเวฟเล็ทแม่ (Mallat 1999) ตามสมการที่ (7)

$$W(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (7)$$

ซึ่ง $\psi \left(\frac{t-u}{s} \right)$ เป็นชุดของฟังก์ชันเวฟเล็ทแม่ที่เลื่อนตำแหน่งด้วยค่าจำนวนจริง u และยืด

ขยายด้วยค่าจำนวนจริง s

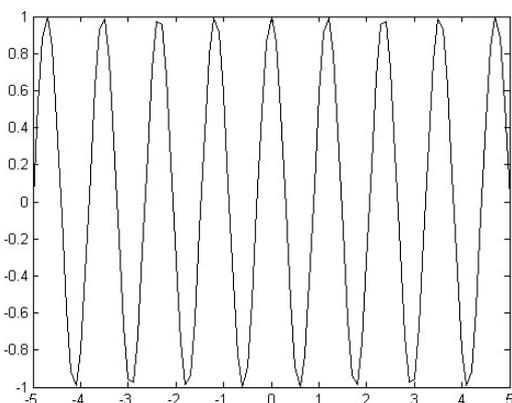
$W(u, s)$ เป็นผลการแปลงของฟังก์ชันมูลฐานหรือฟังก์ชันเวฟเล็ทที่เลื่อนตำแหน่งด้วยค่า u และยืดขยายด้วยค่า s

* แทนการคอนจูเกต (Conjugate)

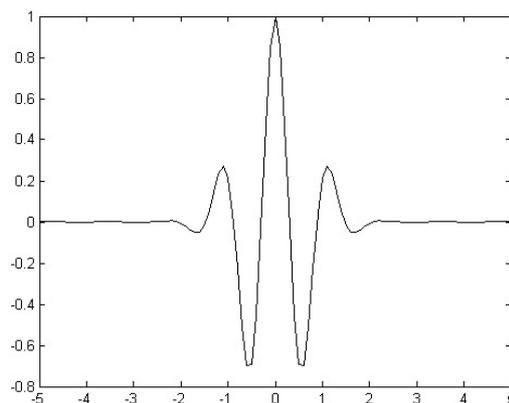
รูปสัญญาณของฟังก์ชันเวฟเล็ทมีลักษณะมาจากฟังก์ชันคลื่นที่ถูกจำกัดทางเวลาดังแสดงในภาพที่ 17 (ข) โดยฟังก์ชันที่สามารถนำมาใช้เป็นฟังก์ชันมูลฐานของการแปลงเวฟเล็ทได้จะต้องประกอบด้วยคุณสมบัติสองข้อคือ คุณสมบัติที่ 1. มีความเป็นคลื่น กล่าวคือ ฟังก์ชันมีการแกว่งตัวโดยเมื่ออินทิเกรตค่าของฟังก์ชันแล้วจะมีค่าเป็นศูนย์ดังแสดงในสมการที่ (8) ดังนั้นจากคุณสมบัตินี้ฟังก์ชันเวฟเล็ทจึงเป็นฟังก์ชันแถบความถี่ผ่าน (Band-limited function) เพราะค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ คุณสมบัติที่ 2. มีพลังงานจำกัด กล่าวคือ ผลรวมหรือผลอินทิเกรตค่าฟังก์ชันยกกำลังสองสามารถที่จะหาค่าได้ตามสมการที่ (9) (Rao and Bopardikar 1998)

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (8)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (9)$$



(ก) ฟังก์ชันคลื่น



(ข) ฟังก์ชันเวฟเล็ต

ภาพที่ 17 รูปสัญญาณ (ก) ฟังก์ชันคลื่น (ข) ฟังก์ชันเวฟเล็ตของ Morlet $\psi(t) = e^{-t^2} \cos\left(\pi\sqrt{\frac{2}{\ln 2}}t\right)$

จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า การแปลงเวฟเล็ตเป็นการส่ง (Mapping) จากสัญญาณหนึ่งมิติไปยังตัวแปรของพื้นที่สองมิติ u และ s โดย u จะเป็นตัวแปรทำให้เกิดการเลื่อนตำแหน่ง และ s เป็นตัวแปรด้านความถี่ ดังนั้นการแปลงเวฟเล็ตจึงเป็นการวิเคราะห์สัญญาณบนโดเมนอวกาศ-ความถี่ กล่าวคือ สัญญาณจะถูกวิเคราะห์ทางด้านความถี่พร้อมกับตำแหน่งได้ (Spatial-Frequency Analysis) ซึ่งเมื่อฟังก์ชันเวฟเล็ตมีพื้นที่ของรูปสัญญาณทางเวลาหรืออวกาศที่แคบจะให้ผลของการนำไปใช้เป็นฟังก์ชันมูลฐานของการแปลงเวฟเล็ตเพื่อการวิเคราะห์ความถี่ที่มีผลที่ดี และในทางกลับกันเมื่อฟังก์ชันเวฟเล็ตมีพื้นที่ของรูปสัญญาณที่กว้างจะให้ผลของการวิเคราะห์ทางด้านความถี่ที่ไม่ดีนัก

สำหรับการแปลงกลับของเวฟเล็ตสามารถกระทำได้ดังแสดงในสมการที่ (10) ถ้าเวฟเล็ตแม่เป็นไปตามเงื่อนไขในสมการที่ (11)

$$f(t) = \frac{1}{C} \int_{u=-\infty}^{\infty} \int_{s=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|S|^2} W(u, s) \psi(t) du ds \quad (10)$$

$$C = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega, \quad 0 < C < \infty \quad (11)$$

ซึ่ง $\psi(\omega)$ เป็นผลการแปลงฟูริเยร์ของฟังก์ชันเวฟเล็ตแม่

นอกจากนี้การแปลงเวฟเล็ทสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปผลของการคอนโวลูชันได้ดังสมการที่ (12) และจากความสัมพันธ์ของระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรผันตามเวลาที่มีอินพุตและเอาต์พุตเดียว (Single-input single-output linear time invariant system) ทำให้การแปลงเวฟเล็ทสามารถใช้ชุดของตัวกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter) ที่ขนาดความถี่ต่าง ๆ แทนได้ โดยผลการแปลงจะเป็นค่าของสัญญาณที่ผ่านแต่ละตัวกรองออกมา ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งานในทางปฏิบัติจริง

$$W(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt = \langle f(t), \psi_{u,s}(t) \rangle = f(t) * \psi_{0,s}^*(-t) \quad (12)$$

ซึ่ง $\langle \cdot, \cdot \rangle$ แทนผลคูณภายใน และ $*$ แทนการคอนโวลูชัน

$$\psi_{u,s}(t) \text{ ถูกกำหนดให้เป็นตัวแทนของ } \psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi \left(\frac{t-u}{s} \right)$$

สำหรับกรณีที่กำลังการเลื่อนตำแหน่งและการยืดขยายของเวฟเล็ทมีค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ทำให้ $u = a^j l$ และ $s = a^j$ โดยที่ j และ l มีค่าเป็นจำนวนเต็ม การแปลงเวฟเล็ทจากสมการที่ (1) จะเป็น Discrete wavelet transform (DWT) ดังแสดงได้ในสมการที่ (13) ถ้าค่าการสุ่ม a มีค่าเท่ากับ 2 จะเรียกค่าการสุ่มนี้ว่า Dyadic sampling

$$W[l, j] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|a^j|}} \psi^*(a^{-j}t - l) dt \quad (13)$$

จากสมการที่ (13) การแปลงเวฟเล็ทดังกล่าวมีค่าการเลื่อนตำแหน่งและการยืดขยายของเวฟเล็ทเป็นแบบไม่ต่อเนื่องแต่ทว่าสัญญาณยังคงเป็นแบบต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามการแปลงเวฟเล็ทกับสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องสามารถกระทำได้ด้วยอนุกรมของชุดผลคูณภายในไม่ต่อเนื่องดังสมการที่ (14) ซึ่งจะเรียกการแปลงเวฟเล็ทแบบนี้ว่า Discrete-time wavelet transform (DTWT)

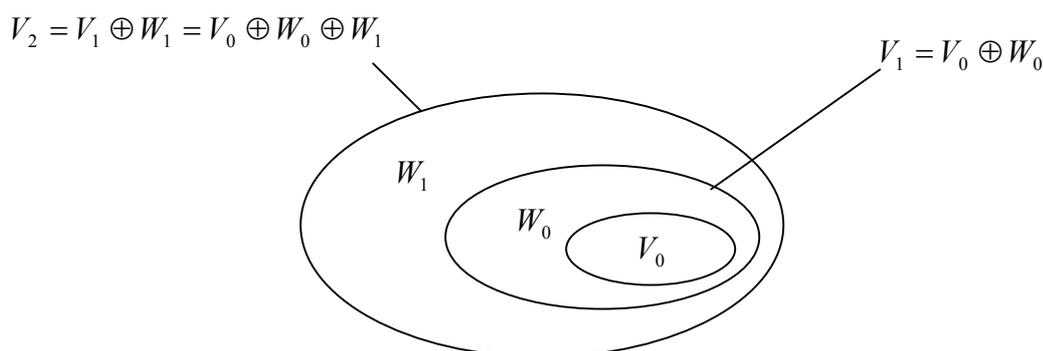
$$W[l, j] = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \frac{1}{\sqrt{|a^j|}} \psi^*(a^{-j}n - l) \quad (14)$$

ซึ่ง $f(n)$ เป็นสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องที่มีความยาว N

ในการสร้างสัญญาณกลับด้วยผลการแปลงเวฟเล็ทเพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะทำการสร้างสัญญาณกลับได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากฟังก์ชันเวฟเล็ทมีลักษณะเป็นเพียงฟังก์ชันแถบความถี่ผ่าน ดังนั้นโดยทั่วไปจึงนำสัญญาณในปริภูมิย่อยที่เกิดจากค่าประมาณหรือสัญญาณความถี่ต่ำมารวมเข้ากับสัญญาณจากผลการแปลงเวฟเล็ทที่ค่าระดับความละเอียดต่าง ๆ เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณกลับอย่างสมบูรณ์ตามทฤษฎีของการวิเคราะห์สัญญาณจากหลายระดับความละเอียด (Multiresolution Analysis, MRA) (Mallat 1989) ซึ่งเป็นการนำสัญญาณค่าประมาณ (signal's approximation) หรือสัญญาณความถี่ต่ำมารวมกับสัญญาณรายละเอียด (Signal's detail) หรือสัญญาณแถบความถี่สูงที่ระดับความละเอียดต่าง ๆ ด้วยการใช้ผลบวกโดยตรง (Direct sum) ตามสมการที่ 15 และแสดงภาพของการรวมสัญญาณในภาพที่ 18 โดยที่ปริภูมิของสัญญาณต่าง ๆ เหล่านี้มีคุณสมบัติที่ตั้งฉากต่อกันทั้งหมด

$$V_N = W_{N-1} \oplus W_{N-2} \oplus \dots \oplus W_1 \oplus V_1 \quad (15)$$

- ซึ่ง V_i เป็นปริภูมิย่อยของสัญญาณค่าประมาณ (Subspace of signal's approximation) ณ ระดับความละเอียดที่ i
 W_i เป็นปริภูมิย่อยของสัญญาณรายละเอียด (Subspace of signal's detail) ณ ระดับความละเอียดที่ i
 \oplus แทนเครื่องหมายผลบวกโดยตรง (Direct sum) ของสัญญาณจากสองปริภูมิย่อย



ภาพที่ 18 การสร้างสัญญาณจากผลรวมของปริภูมิย่อยตามทฤษฎี MRA

ในการวิเคราะห์สัญญาณตามทฤษฎี MRA สัญญาณในปริภูมิย่อยของสัญญาณค่าประมาณสามารถสร้างได้จากผลคูณภายในระหว่างสัญญาณเข้ากับฟังก์ชัน Scaling, $\phi(t)$ และ

สำหรับการสร้างสัญญาณในปริภูมิย่อยของสัญญาณรายละเอียดสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชัน Detail, $\psi(t)$ ซึ่งฟังก์ชันที่สามารถใช้เป็นฟังก์ชัน Scaling ได้จะต้องเป็นไปตามคุณสมบัติดังนี้

คุณสมบัติที่ 1. ฟังก์ชัน Scaling ต้องมีค่าเฉลี่ยเท่ากับหนึ่ง

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) dt = 1 \quad (16)$$

คุณสมบัติที่ 2. พลังงานของฟังก์ชัน Scaling มีค่าเท่ากับหนึ่ง

$$\|\phi(t)\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\phi(t)|^2 dt = 1 \quad (17)$$

คุณสมบัติที่ 3. ฟังก์ชัน Scaling ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ต้องตั้งฉากกัน

$$\langle \phi(t), \phi(t-n) \rangle = \delta(n) \quad (18)$$

จากคุณสมบัติข้อ 1 และ 2 ของฟังก์ชัน Scaling พบว่ารูปแบบของฟังก์ชันที่ได้จะต้องเป็นฟังก์ชันแถบความถี่ต่ำ (Low-frequency function) นอกจากนี้คุณสมบัติของฟังก์ชันที่ใช้เป็นฟังก์ชัน Detail จะต้องเข้ากับข้อกำหนดต่าง ๆ ตามสมการดังต่อไปนี้

คุณสมบัติที่ 1. ฟังก์ชัน Detail ต้องมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (19)$$

คุณสมบัติที่ 2. พลังงานของฟังก์ชัน Detail มีค่าเท่ากับหนึ่ง

$$\|\psi(t)\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1 \quad (20)$$

คุณสมบัติที่ 3. ฟังก์ชัน Detail ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ต้องตั้งฉากกัน

$$\langle \psi(t), \psi(t-n) \rangle = \delta(n) \quad (21)$$

คุณสมบัติที่ 4. ฟังก์ชัน Detail กับฟังก์ชัน Scaling ที่ตำแหน่งไม่ตรงกันต้องตั้งฉากกัน

$$\langle \psi(t), \phi(t-n) \rangle = \delta(n) \quad (22)$$

จากทฤษฎี MRA เมื่อพิจารณากลับไปยังทฤษฎีของฟังก์ชันเวฟเล็ท จะพบว่าสามารถที่จะนำฟังก์ชันเวฟเล็ทมาใช้เป็นฟังก์ชัน Detail ดังนั้นจึงทำให้การวิเคราะห์สัญญาณอยู่ในรูปของฟังก์ชันเวฟเล็ทและฟังก์ชัน Scaling โดยสามารถเขียนสมการของการแปลงด้วยการกระจายสัญญาณและการสร้างสัญญาณกลับ ตามสมการที่ (23) ถึง (25)

$$V_\varphi(j_0, k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_n f(n) \varphi_{j_0, k}(n) \quad (23)$$

$$W_\psi(j, k) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_n f(n) \psi_{j, k}(n) \quad (24)$$

สำหรับ $j \geq j_0$ และ

$$f(n) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_k V_\varphi(j_0, k) \varphi_{j_0, k}(n) + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_k W_\psi(j, k) \psi_{j, k}(n) \quad (25)$$

โดยที่ $\varphi_{j_0, k}(n)$ เป็นฟังก์ชัน Scaling ที่ระดับความละเอียดต่ำสุด (j_0)

$\psi_{j, k}(n)$ เป็นฟังก์ชันเวฟเล็ทที่ระดับความละเอียด j ที่สูงขึ้น (เมื่อ $j \geq j_0$)

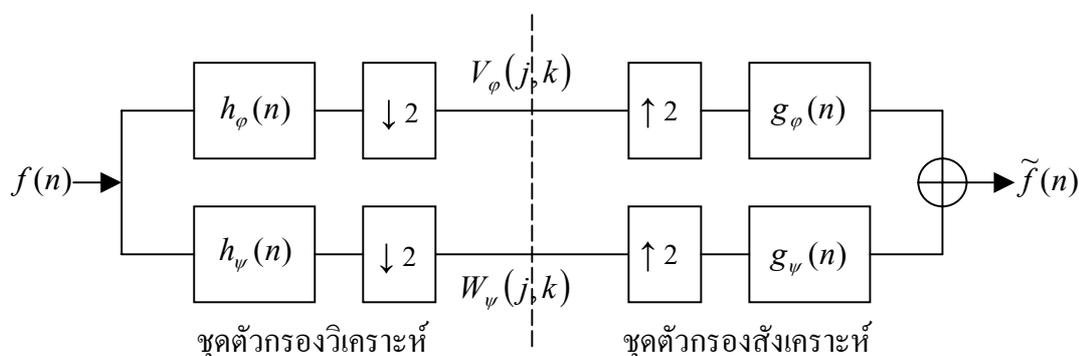
$V_\varphi(j_0, k)$ เป็นผลการแปลงเวฟเล็ทของฟังก์ชัน Scaling, $\varphi_{j_0, k}(n)$

$W_\psi(j, k)$ เป็นผลการแปลงเวฟเล็ทของฟังก์ชันเวฟเล็ท, $\psi_{j, k}(n)$

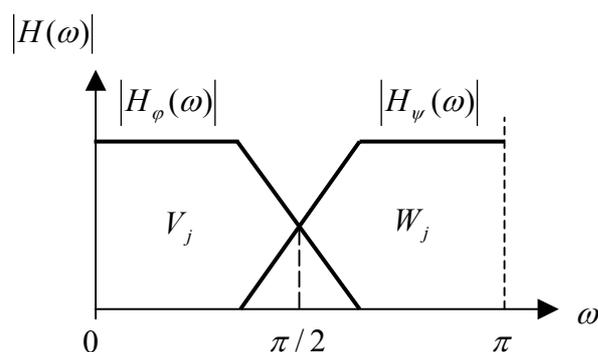
M เป็นแฟคเตอร์นอร์มัลไลซ์

สำหรับกรณีที่ฟังก์ชันมูลฐานของการแปลงในสมการ (23) และ (24) ไม่ตั้งฉากกัน แต่มีคุณสมบัติที่เป็นคู่ตั้งฉาก (Biorthogonal) ฟังก์ชันมูลฐานของการแปลงในสมการจะถูกแทนด้วยฟังก์ชัน Dual function เป็น $\tilde{\varphi}$ และ $\tilde{\psi}$ โดยรายละเอียดของฟังก์ชันมูลฐานของการแปลงแบบ Dual function นี้มีอยู่ในหนังสือของ Mallat (1999)

วิธีหนึ่งที่ใช้ในทางปฏิบัติสำหรับการแปลงเวฟเล็ตก็คือ การกระจายสัญญาณแถบความถี่ย่อย (Subband decomposition) ซึ่งจะเป็นการพิจารณาสัญญาณแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแถบความถี่ต่ำ (Low-frequency component) และส่วนแถบความถี่สูง (High-frequency component) โดยวิธีการกระจายสัญญาณในรูปแบบดังกล่าวจะใช้ชุดตัวกรองวิเคราะห์ (Analysis filters) สำหรับกระจายสัญญาณและจะใช้ชุดตัวกรองสังเคราะห์ (Synthesis filters) เพื่อประกอบสัญญาณกลับ ดังกระบวนการที่แสดงในภาพที่ 19 ทั้งนี้ชุดตัวกรองวิเคราะห์จะประกอบด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) และตัวกรองความถี่สูงผ่าน (High-pass filter) ซึ่งเป็นตัวกรองแบบ FIR (Finite Impulse Response) ที่มีผลตอบสนองความถี่เป็นลักษณะครึ่งแถบความถี่ (Half-band digital filter) ดังแสดงในภาพที่ 20 เมื่อ $h_\varphi(n)$ เป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับสัญญาณประมาณและ $h_\psi(n)$ เป็นตัวกรองความถี่สูงผ่านสำหรับสัญญาณรายละเอียด โดยที่คู่ของชุดตัวกรองเหล่านี้ได้มีผู้นำเสนอด้วยกันหลายชนิด เช่น Johnston, Smith-Barnwell, Daubechies, Vaidyanathan-Hoang, Le Gall เป็นต้น โดยที่ตัวกรองเวฟเล็ตทั้งหมดนี้จะแตกต่างกันด้วยค่าสัมประสิทธิ์และขนาดความยาวของตัวกรอง ซึ่งจะมีเงื่อนไขคุณลักษณะของตัวกรองที่ออกแบบมาต่าง ๆ อาทิ Linear phase, FIR, Real coefficient, Orthonormal/ Biorthogonal/ QMF (Quadrature Mirror Filters) / CQF (Conjugate Quadrature Filters) และเงื่อนไขที่ต้องสามารถสร้างสัญญาณกลับได้ (Invertible) อย่างสมบูรณ์ (Perfect Reconstruction) นอกจากนี้ชุดตัวกรองวิเคราะห์ก็ยังมี ส่วนของการชักตัวอย่างออก (Subsample) เพื่อเป็นการรักษาจำนวนข้อมูลให้เท่าเดิมระหว่างก่อนและหลังการแปลงและเรียกการแปลงนี้ว่า Decimated Wavelet Transform (Starck *et al.*, 2004)

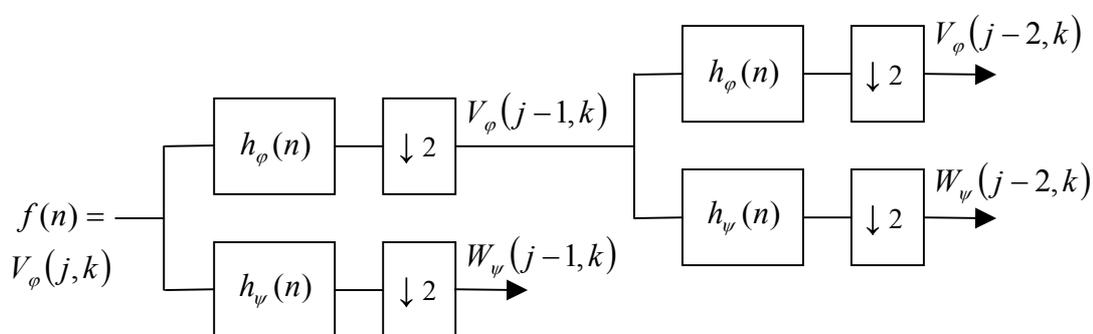


ภาพที่ 19 กระบวนการกระจายและประกอบสัญญาณหนึ่งมิติด้วยชุดตัวกรองเวฟเล็ต



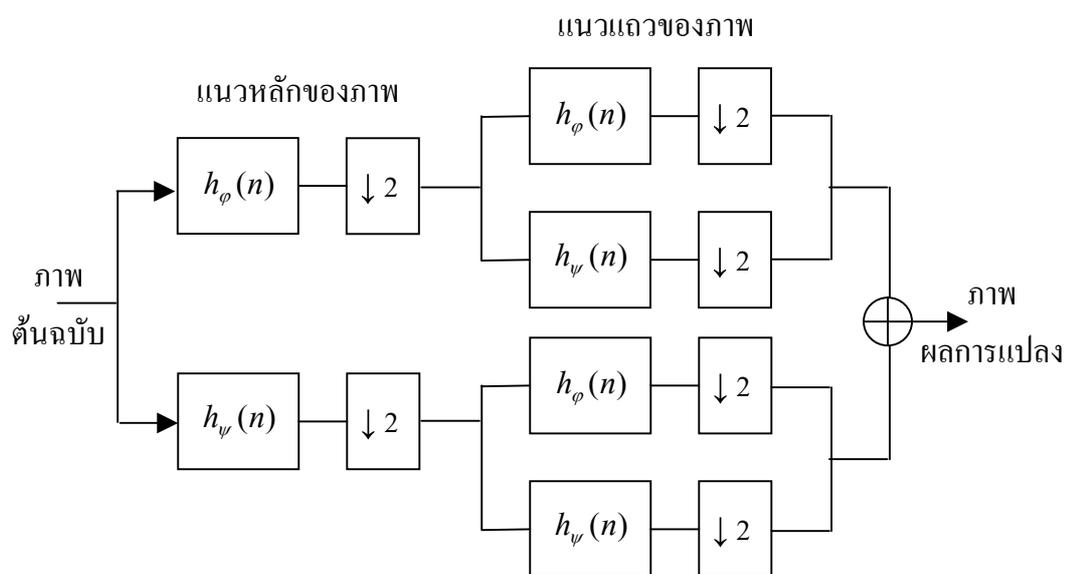
ภาพที่ 20 ผลตอบสนองทางความถี่ของคู่ตัวกรองเวฟเล็ท

การกระจายสัญญาณแถบความถี่ย่อยในระดับความละเอียดที่ต่ำกว่าจะใช้การวนซ้ำ โดยนำสัญญาณประมาณจากระดับความละเอียดที่ผ่านการวิเคราะห์มากระจายสัญญาณผ่านชุดตัวกรองวิเคราะห์อีกครั้ง คล้ายลักษณะ โครงสร้างต้นไม้ของชุดตัวกรองวิเคราะห์ (Tree structure filter bank) ดังแสดงในภาพที่ 21 เป็นผลให้สัญญาณประมาณเกิดการกระจายสัญญาณอีก ออกเป็นแถบความถี่สองส่วนย่อย ซึ่งเหมาะแก่การใช้วิเคราะห์หารายละเอียดแบบหยาบสู่ละเอียด (Coarse-to-fine)



ภาพที่ 21 โครงสร้างต้นไม้ของชุดตัวกรองวิเคราะห์สำหรับการกระจายสัญญาณในระดับความละเอียดที่ 2

การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ทกับสัญญาณสองมิติหรือภาพ จะใช้คุณสมบัติของการแปลงเวฟเล็ทที่สามารถแบ่งแยกได้ (Separable Transform) โดยเป็นการแปลงเวฟเล็ทกับสัญญาณหนึ่งมิติในแนวแถวและแนวหลักของภาพ โดยแยกกระทำทีละแกน (Gonzalez and Woods 2001) ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 การแปลงเวฟเล็ทภาพสองมิติด้วยชุดตัวกรองวิเคราะห์

จากขั้นตอนการแปลงเวฟเล็ทสองมิติตามภาพที่ 22 ได้ทดสอบผลการแปลงแสดงในภาพที่ 23 ซึ่งภาพผลการแปลงที่ได้หลังจากกระจายสัญญาณเพื่อแยกตัวประกอบทางความถี่จะประกอบไปด้วยภาพประมาณจากภาพต้นฉบับ (Approximation subband, a) และภาพทิศทางของขอบภาพที่เกิดจากผลการกรองด้วยตัวกรองความถี่สูงผ่านในทิศทางตามแนวแกนต่าง ๆ จากภาพต้นฉบับ ซึ่งประกอบขึ้นด้วย ทิศทางของขอบภาพตามแนวแถวของภาพต้นฉบับ (Horizontal detail subband, d^H) ทิศทางของขอบภาพตามแนวหลักของภาพต้นฉบับ (Vertical detail subband, d^V) และทิศทางของขอบภาพตามแนวทแยงมุมของภาพต้นฉบับ (Diagonal detail subband, d^D) แสดงตามโครงสร้างดังภาพที่ 24 (ก) โดยภาพที่ผ่านการแปลงเวฟเล็ทแล้วสามารถที่จะแปลงเวฟเล็ทต่อได้อีก เพื่อวิเคราะห์และแยกตัวประกอบในช่วงแถบความถี่ย่อย (Subband) ที่ระดับความละเอียดอื่น โดยการแปลงจะเป็นลักษณะโครงสร้างต้นไม้ โดยนำเฉพาะส่วนของสัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำหรือบริเวณแถบความถี่ LL (LL-Band) ซึ่งเป็นแถบความถี่ย่อยที่มีข้อมูลสำคัญ มาวนซ้ำกับชุดตัวกรองวิเคราะห์เดิม ได้ผลภาพแถบความถี่ย่อยดังแสดงตามโครงสร้างในภาพที่ 24 (ข) และทดสอบผลการแปลงระดับความละเอียดที่ 2 และ 3 ไว้ในภาพที่ 25 ทั้งนี้จำนวนครั้งมากที่สุดของระดับความละเอียดที่เป็นไปได้ในการแปลงเวฟเล็ทสองมิติสามารถหาได้จากจำนวนของแถวหรือหลักของภาพตามสมการที่ (26)

$$n = \log_2(\max(\text{Row}, \text{Col})) \quad (26)$$

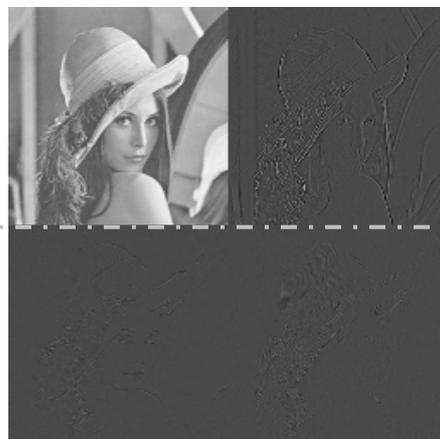
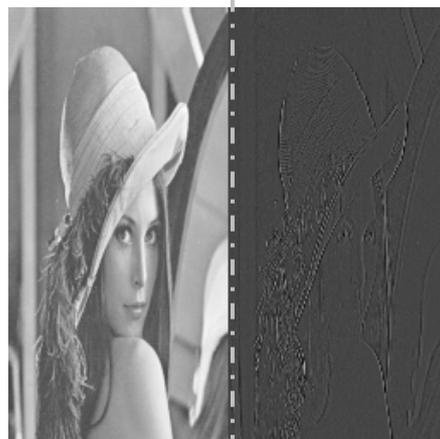
ซึ่ง n คือ จำนวนระดับความละเอียดของการแปลงเวฟเล็กที่สุดที่เป็นไปได้

Row คือ จำนวนแถวของภาพ

Col คือ จำนวนหลักของภาพ



(ก) รูปต้นฉบับ



(ข) ผลการแปลงเวฟเล็กทีละมิติตามขั้นตอน
ในภาพที่ 22

ภาพที่ 23 ผลการแปลงเวฟเล็กสองมิติในระดับความละเอียดที่ 1

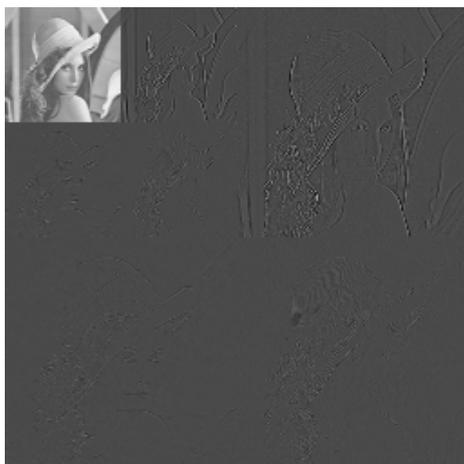
$a(m,n)$	$d^V(m,n)$
$d^H(m,n)$	$d^D(m,n)$

(ก) การแบ่งแยกทิศทางของข้อมูล

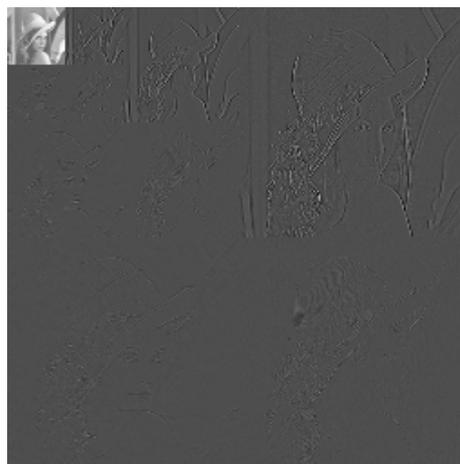
3LL	3HL	2HL	1HL
3LH	3HH		
2LH		2HH	
1LH			1HH

(ข) การแปลงเวฟเล็ทในระดับ
ความละเอียดต่างๆ

ภาพที่ 24 ผลภาพแสดงผลการแปลงเวฟเล็ท



(ก) ผลการแปลงเวฟเล็ทในระดับ
ความละเอียดที่ 2



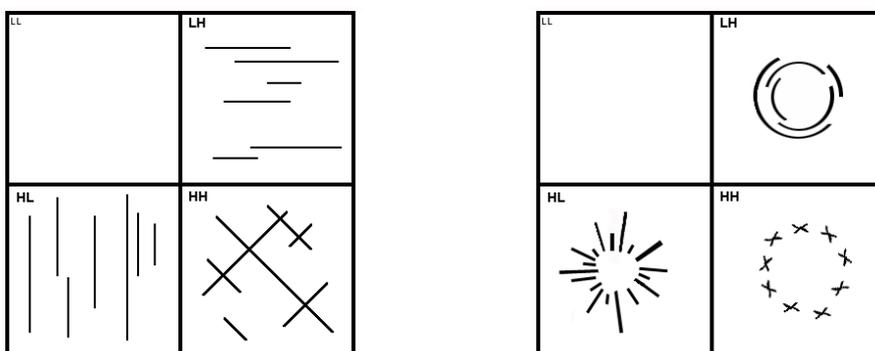
(ข) ผลการแปลงเวฟเล็ทในระดับ
ความละเอียดที่ 3

ภาพที่ 25 ผลการแปลงเวฟเล็ทสองมิติในระดับความละเอียดที่ 2 และ 3

2.2 การกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วด้วยชุดตัวกรองเวฟเล็ท (Polar-Based Separable Decomposition Using Wavelet Filter Banks)

2.2.1 หลักการกระจายสัญญาณสองมิติแบบเชิงขั้ว

ในการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ทแบบเชิงขั้วเพื่อกระจายรายละเอียดของสัญญาณตามแนวแกนรัศมีและแกนมุมของระบบพิกัดเชิงขั้ว จะมีการแบ่งแยกทิศทางของรายละเอียดที่แตกต่างไปจากการแปลงเวฟเล็ทแบบเดิม โดยรายละเอียดแบบเดิมของการแปลงเวฟเล็ทที่ค่าแถบความถี่หนึ่ง ๆ จะถูกแบ่งแยกในทิศทางของแนว (Horizontal Detail Subband) ทิศทางของหลัก (Vertical Detail Subband) และทิศทางทแยงมุม (Diagonal Detail Subband) แต่สำหรับการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วที่อ้างอิงจากจุดศูนย์กลางจะแบ่งแยกรายละเอียดออกในแนว ทิศทางของรัศมี (Radial Detail Subband) ทิศทางของมุม (Angular Detail Subband) และทิศทางที่ไขว้กันกับแกนรัศมีและแกนมุม (Sparse Edge Detail Subband) ดังแสดงผลเปรียบเทียบการกระจายรายละเอียดของวิธีการทั้งสองในภาพที่ 26

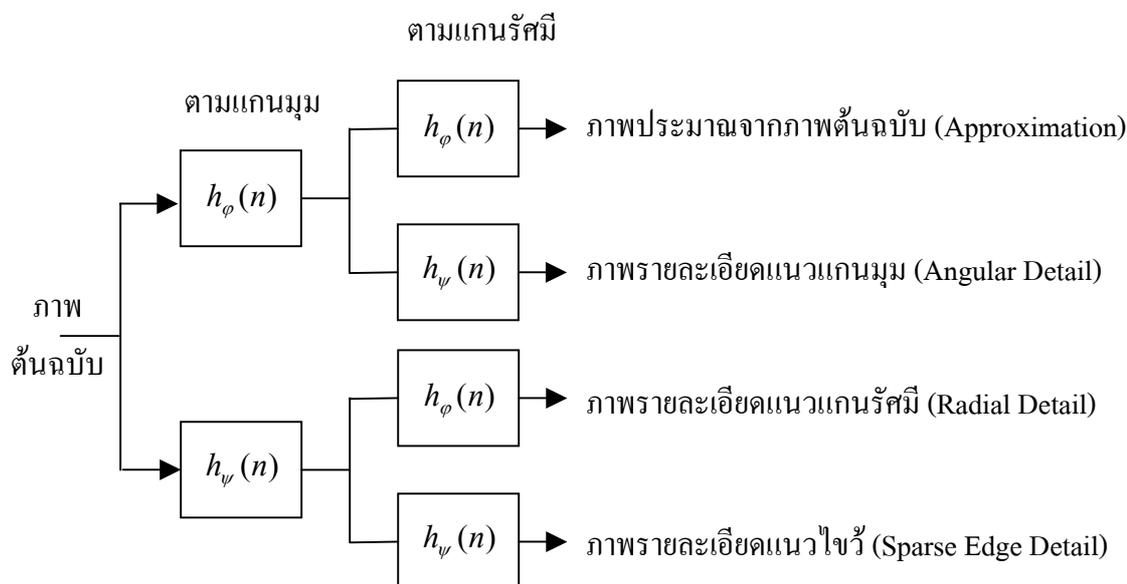


(ก) การกระจายรายละเอียดแบบพิกัดมุมฉาก (ข) การกระจายรายละเอียดแบบพิกัดเชิงขั้ว

ภาพที่ 26 ผลการกระจายรายละเอียดด้วยชุดตัวกรองวิเคราะห์ในพิกัดมุมฉากและพิกัดเชิงขั้ว

จากผลการแปลงเวฟเล็ทของภาพสองมิติด้วยชุดตัวกรองวิเคราะห์ในภาพที่ 22 สำหรับแยกตัวประกอบทางความถี่ของสัญญาณออกเป็นส่วนที่มีความถี่สูงและส่วนที่มีความถี่ต่ำตามทิศทางของแกนในระบบพิกัดมุมฉาก จะใช้ตัวกรองเวฟเล็ทแบบหนึ่งมิติกระทำแบบแบ่งแยกตามแนวแนวและแนวหลักของภาพ ทำให้การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ทแบบพิกัดเชิงขั้วสามารถนำหลักการดังกล่าวมาใช้ได้เช่นเดียวกัน โดยให้การกรองเป็นไปในทิศทางของแนวแกนรัศมีและแกนมุมแทนดังภาพที่ 27 แต่ทว่าการชักตัวอย่างออก (Subsample) ในการประยุกต์การ

แปลงเวฟเล็ทแบบเชิงขั้วนี้ไม่สามารถกระทำได้ เพราะว่าการเรียงตัวของจุดภาพดิจิทัลจะเป็นแบบพิกัดมุมฉากในแนวแถวและแนวหลัก ด้วยเหตุผลนี้การประยุกต์การแปลงเวฟเล็ทแบบเชิงขั้วจึงเป็นการแปลงแบบเพิ่มจำนวนข้อมูล (Undecimated Transform)



ภาพที่ 27 การกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วด้วยชุดตัวกรองวิเคราะห์

สำหรับการวิเคราะห์การแปลงเวฟเล็ทแบบเชิงขั้วในส่วนของระดับความละเอียดที่ต่ำกว่าจะใช้วิธีการยืดขนาดตัวกรองออกไปเพื่อให้ครอบคลุมจุดภาพที่กว้างขึ้นแทนการชักตัวอย่างออกเป็นขั้นตอนวิธีแบบ “à trous” (Starck *et al.*, 2004) ซึ่งเป็นคำในภาษาฝรั่งเศสแปลว่า รู โดยจะหมายถึงการเติมช่องว่างเข้าไประหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง ทั้งนี้การยืดขนาดของ ตัวกรอง ($h^{(j)}$) จากตัวกรองเวฟเล็ท (h) ที่ระดับความละเอียดต่าง ๆ (j) จะเป็นไปตามสมการ (27)

$$h_l^{(j)} = \begin{cases} h_l, & l/2^j \text{ is an integer,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (27)$$

เป็นผลให้การคอนโวลูชันแบบหนึ่งมิติเพื่อหาค่าสัญญาณประมาณหรือสัญญาณความถี่ต่ำ (c_{j+1}) และค่าสัญญาณรายละเอียดหรือสัญญาณแถบความถี่สูง (w_{j+1}) ด้วยตัวกรองเวฟเล็ทที่มีขนาดความยาว k สามารถทำได้ดังสมการที่ (28) และ (29) ตามลำดับ

$$c_{j+1,l} = \left(\bar{h}^{(j)} * c_j \right)_l = \sum_k h_k c_{j,l+2^j k} \quad (28)$$

$$w_{j+1,l} = \left(\bar{g}^{(j)} * c_j \right)_l = \sum_k g_k c_{j,l+2^j k} \quad (29)$$

2.2.2 ขั้นตอนวิธีการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว

จากที่กล่าวมาข้างต้นวิธีการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วจะใช้การกรองแบบแบ่งแยกทิศทางตามแนวแกนรัศมีและแกนมุมที่อ้างอิงกับจุดศูนย์กลาง ซึ่งขั้นตอนของการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วมีรายละเอียดดังหัวข้อย่อต่อไปนี้

2.2.2.1 ทำการสร้างชุดตัวกรองเวฟเล็ตเพื่อนำไปแยกตัวประกอบทางความถี่

- 1) ตัวกรองที่ใช้เพื่อให้ได้ภาพประมาณ จะใช้เป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่านทั้งในทิศทางของการกรองแนวแกนมุมและรัศมี
- 2) ตัวกรองที่ใช้เพื่อให้ได้ภาพรายละเอียดแนวแกนรัศมี จะใช้เป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในทิศทางของการกรองแนวแกนรัศมีและตัวกรองความถี่สูงผ่านในทิศทางของการกรองแนวแกนมุม
- 3) ตัวกรองที่ใช้เพื่อให้ได้ภาพรายละเอียดแนวแกนมุม จะใช้เป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในทิศทางของการกรองแนวแกนมุมและตัวกรองความถี่สูงผ่านในทิศทางของการกรองแนวแกนรัศมี
- 4) ตัวกรองที่ใช้เพื่อให้ได้ภาพรายละเอียด จะใช้เป็นตัวกรองความถี่สูงผ่านทั้งในทิศทางของการกรองแนวแกนมุมและรัศมี

2.2.2.2 ทำการกรองจุดภาพที่ต้องการในทิศทางของแกนมุมและแกนรัศมีที่อ้างอิงจากจุดศูนย์กลาง ดังแสดงในภาพที่ 28

1) ทำการกรอตามแนวแกนมุม โดยเลือกตัวกรอตามข้อ 2.2.2.1 วางจุดกึ่งกลางของตัวกรอไว้บนจุดภาพที่ต้องการ และหาตำแหน่งของจุดภาพที่ตรงกันกับตำแหน่งสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ของตัวกรอ โดยเริ่มหาค่าตำแหน่งออกมาจากจุดศูนย์กลางของตัวกรอด้วยระยะทางตามสมการที่ (30) กรณีตำแหน่งของจุดภาพที่ได้เป็นค่าทศนิยม ไม่อยู่บนภาพให้ใช้การประมาณแบบเชิงเส้นระหว่างจุดรอบตัวที่ใกล้ที่สุด (Nearest neighbor interpolation) เพื่อใช้เป็นค่าระดับสีของจุดภาพนั้นสำหรับการคอนโวลูชันกับสัมประสิทธิ์ของตัวกรอ และทำกระบวนการนี้ซ้ำจนครบทุกจุดภาพรอบ ๆ จุดศูนย์กลาง

$$\Delta\theta = \frac{2^j k}{r} \quad (30)$$

ซึ่ง $\Delta\theta$ คือ ระยะห่างระหว่างคู่จุดภาพที่ติดกันของการกรอตามแนวแกนมุม

j คือ ระดับความละเอียด (Resolution level) ของการกระจายรายละเอียดแบบเชิงจั่ว

k คือ ลำดับของค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอนับออกจากจุดกึ่งกลางของตัวกรอ

r คือ รัศมีของจุดภาพที่ต้องการโดยอ้างอิงจากจุดศูนย์กลาง

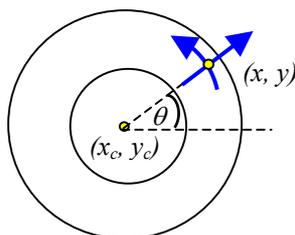
2) ทำการกรอตามแนวแกนรัศมี อีกครั้งจากผลภาพที่ได้จากการกรอตามแนวแกนมุม โดยวางจุดกึ่งกลางของตัวกรอไว้บนจุดภาพที่ต้องการ และหาตำแหน่งของจุดภาพที่ตรงกันกับตำแหน่งสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ของตัวกรอ โดยเริ่มหาค่าตำแหน่งออกมาจากจุดศูนย์กลางของตัวกรอด้วยระยะทางตามสมการที่ (31) กรณีตำแหน่งของจุดภาพที่ได้เป็นค่าทศนิยม ไม่อยู่บนภาพให้ใช้การประมาณแบบเชิงเส้นระหว่างจุดรอบตัวที่ใกล้ที่สุด เพื่อใช้เป็นค่าระดับสีของจุดภาพนั้นสำหรับการคอนโวลูชันกับสัมประสิทธิ์ของตัวกรอ และทำกระบวนการนี้ซ้ำจนครบทุกจุดภาพรอบ ๆ จุดศูนย์กลาง

$$\Delta r = 2^j k \quad (31)$$

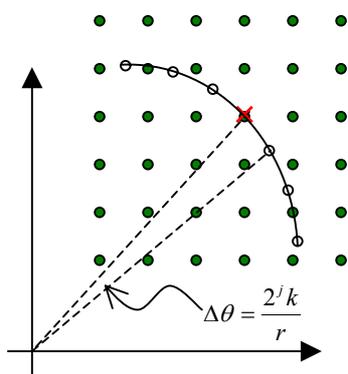
ซึ่ง Δr คือ ระยะห่างระหว่างคู่จุดภาพที่ติดกันของการกรอตามแนวแกนรัศมี

j คือ ระดับความละเอียด (Resolution level) ของการกระจายรายละเอียดแบบเชิงจั่ว

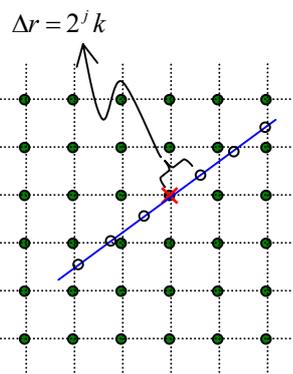
k คือ ลำดับของค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอนับออกจากจุดกึ่งกลางของตัวกรอ



(ก) ทิศทางการกรองบน
จุดภาพที่ต้องการ



(จ) การกรองตามแนวแกนมุม



(ค) การกรองตามแนวแกนรัศมี

ภาพที่ 28 วิธีการกรองเพื่อกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว

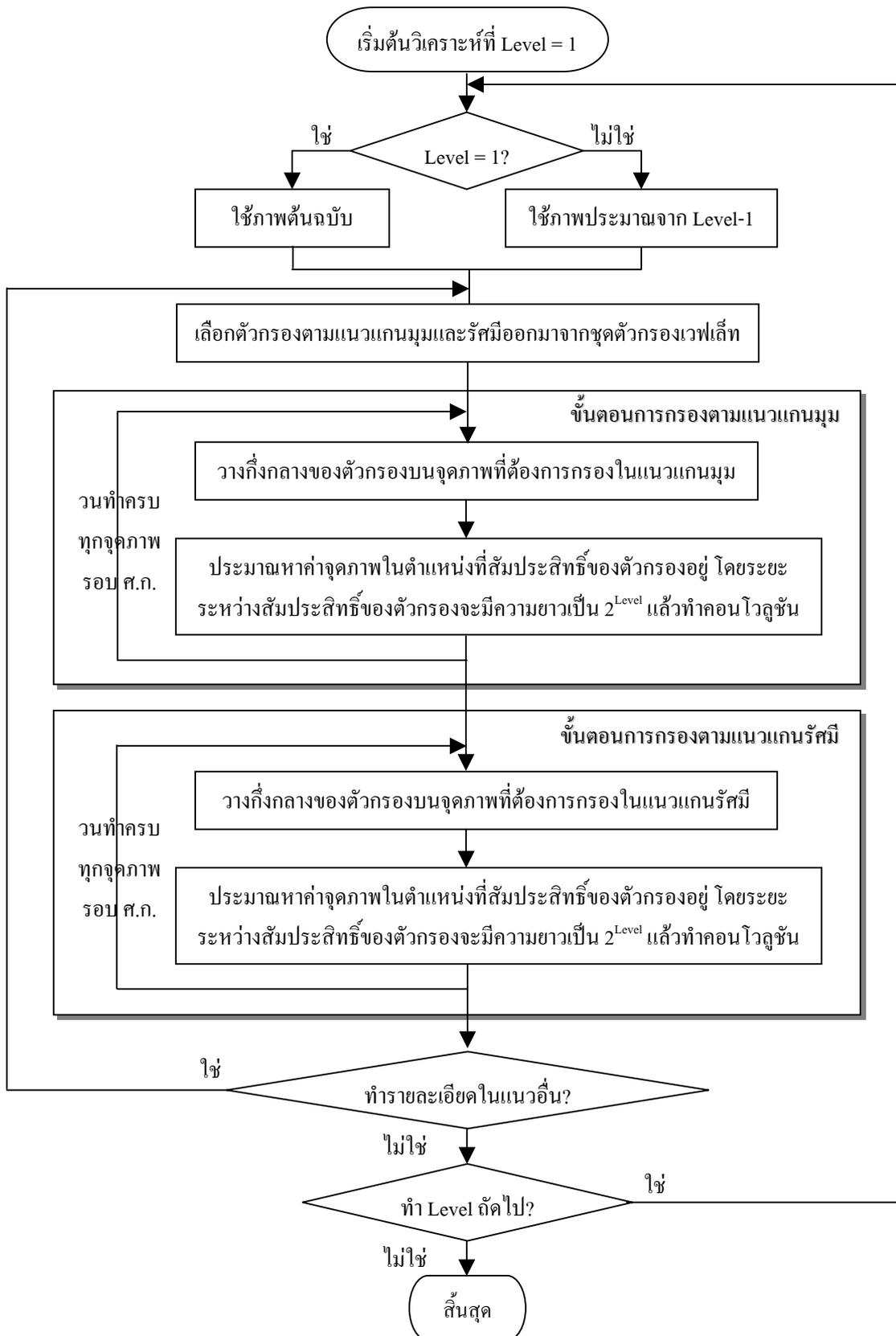
2.2.2.3 กรณีที่ต้องการแบ่งแถบความถี่ย่อย (Subband decomposition) ออกไปอีกเพื่อการวิเคราะห์ ให้นำภาพที่ต้องการแบ่งความถี่ย่อยไปวนซ้ำตามวิธีการในข้อ 2.2.2.2 โดยเพิ่มค่า j ในสมการ (30) และ (31) ขึ้นอีกหนึ่งค่า โดยทั่วไปการวิเคราะห์ในแถบความถี่ย่อยจะนำภาพประมาณจากบริเวณแถบความถี่ต่ำมาเป็นอินพุต

โดยขั้นตอนวิธีการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วทั้งหมดจะสรุปไว้ในตารางที่ 4 และแสดงแผนภาพรวมของขั้นตอนวิธีดังภาพที่ 29

ตารางที่ 4 สรุปขั้นตอนวิธีการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว

สรุปขั้นตอนวิธี การกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว

- 1: สร้างชุดตัวกรองเวฟเล็ตสำหรับแยกตัวประกอบทางความถี่
 - 2: ทำการกรองในทิศทางของแกนมุม และแกนรัศมี ที่อ้างอิงจากจุดศูนย์กลาง
 - 2.1 ทำการกรองตามแนวแกนมุม โดยใช้ตัวกรองตามข้อ 1
 - 2.1.1 หาค่ามุมและรัศมีของจุดภาพที่ต้องการกรอง อ้างอิงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลาง
 - 2.1.2 วางตัวกรองลงบนจุดภาพที่ต้องการในทิศทางแกนมุม โดยให้จุดกึ่งกลางของตัวกรองอยู่ที่ตำแหน่งของจุดภาพที่ต้องการกรอง
 - 2.1.3 ทำการประมาณหาค่าระดับสีของจุดภาพในตำแหน่งที่มีสัมประสิทธิ์ของตัวกรองอยู่
 - 2.1.4 คำนวณผลคอนโวลูชันของจุดภาพที่ต้องการ ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองกับค่าระดับสีของจุดภาพ
 - 2.1.5 วนรอบทำซ้ำจนครบทุกจุดภาพรอบ ๆ จุดศูนย์กลาง
 - 2.2 ทำการกรองอีกครั้งตามแนวแกนรัศมี กับภาพที่ผ่านการกรองในข้อ 2.1
 - 2.2.1 หาค่ามุมและรัศมีของจุดภาพที่ต้องการกรอง อ้างอิงกับตำแหน่งจุดศูนย์กลาง
 - 2.2.2 วางตัวกรองลงบนจุดภาพที่ต้องการในทิศทางแกนรัศมี โดยให้จุดกึ่งกลางของตัวกรองอยู่ที่ตำแหน่งของจุดภาพที่ต้องการกรอง
 - 2.2.3 ทำการประมาณหาค่าของจุดภาพในตำแหน่งที่มีสัมประสิทธิ์ของตัวกรองอยู่
 - 2.2.4 คำนวณผลคอนโวลูชันของจุดภาพที่ต้องการ ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองกับค่าระดับสีของจุดภาพ
 - 2.2.5 วนรอบทำซ้ำจนครบทุกจุดภาพรอบ ๆ จุดศูนย์กลาง
 - 3: วนรอบทำซ้ำเมื่อต้องการแบ่งความถี่จากแถบความถี่ย่อยที่ได้ไปอีกหนึ่งระดับความละเอียด โดยนำภาพที่ต้องการแบ่งแถบความถี่ย่อยไปใช้ในข้อ 2 อีกครั้ง
-



ภาพที่ 29 แผนภาพรวมของขั้นตอนการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว

3. วิธีการดึงลักษณะเฉพาะของม่านตา (Iris Feature Extraction Method)

การดึงลักษณะเฉพาะของม่านตาเป็นขั้นตอนหลักที่มีความสำคัญในการรู้จำม่านตา เพื่อให้จะใช้สร้างข้อมูลม่านตาสำหรับการเปรียบเทียบ ทำให้ประสิทธิภาพของการดึงลักษณะเฉพาะมีผลโดยตรงกับความแม่นยำในการรู้จำม่านตาเป็นอย่างมาก ถ้าลักษณะเฉพาะที่ได้มีความแตกต่างกันในแต่ละบุคคล และมีความคล้ายกันในกลุ่มเดียวกันที่สภาวะต่าง ๆ เช่น ปริมาณแสงของภาพแล้วจะเป็นผลให้ความแม่นยำของการรู้จำมีผลที่ดี ดังจะเห็นได้จากความพยายามหาขั้นตอนวิธีต่าง ๆ ที่จะนำมาวิเคราะห์ทั้งการวิเคราะห์ลักษณะรูปแบบโดยตรงของลายม่านตาบนโดเมนอวกาศ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงบนปริภูมิความถี่ และการวิเคราะห์ด้วยการแปลงต่าง ๆ บนโดเมนอวกาศ-ความถี่

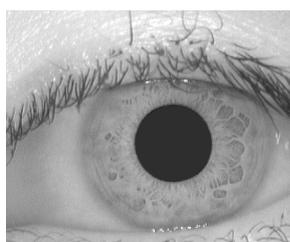
3.1 ที่มาและสมมติฐาน

ลายม่านตานี้มีลักษณะโครงสร้างที่มีรายละเอียดและซับซ้อน โดยรายละเอียดเหล่านี้เกิดขึ้นจากการประกอบกันของชั้นต่าง ๆ ของเนื้อเยื่อม่านตา ซึ่งการยึดกันของเซลล์มีลักษณะวางเรียงในแนวรัศมีและเป็นวงรอบรูม่านตาดังจะเห็นได้ในภาพที่ 3 ด้วยประการนี้ รายละเอียดของลายเส้นบนม่านตาจึงมีทิศทางที่วางเรียงในแนวแกนรัศมีและแนวแกนมุมเป็นส่วนใหญ่ จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้เสนอแนวคิดสำหรับการวิเคราะห์ลายม่านตาบนแกนพิกัดเชิงขั้วเพื่อดึงลักษณะเฉพาะของม่านตาตามแนวแกนรัศมีและแกนมุม โดยใช้วิธีการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วที่ได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อที่ 2

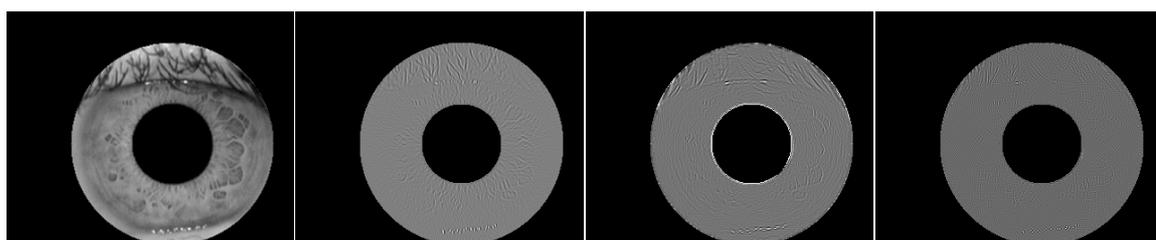
3.2 ขั้นตอนวิธีการดึงลักษณะเฉพาะของม่านตาด้วยการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว

วิธีการกระจายรายละเอียดของม่านตาออกมาตามแนวแกนรัศมีและแกนมุม จะอ้างอิงจุดศูนย์กลางด้วยตำแหน่งจุดศูนย์กลางของรูม่านตา อีกทั้งยังกำหนดพื้นที่ของการกระจายรายละเอียดให้อยู่ระหว่างรัศมีขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านในกระทั่งถึงขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านนอก เต็มพื้นที่วงแหวนของม่านตา ซึ่งผลการทดสอบการกระจายรายละเอียดของลายม่านตาแบบเชิงขั้วด้วยระดับความละเอียด 3 ระดับได้แสดงทุกแถบความถี่ย่อยในภาพที่ 30 โดยเลือกใช้ชุดตัวกรองเวฟเล็ตตามค่าสัมประสิทธิ์ของ Daubechies's 9-7 biorthogonal filters (Antonini *et al.*, 1992) ดังแสดงค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดที่ใช้ในตารางที่ 5

ผลการทดสอบในภาพที่ 30 ได้กำกับตัวอักษร (ข) (ค) และ (ง) เพื่อแทนที่มาของค่าระดับความละเอียดของการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วจากระดับที่ 1 ระดับที่ 2 และระดับที่ 3 นอกจากนี้ในส่วนของหมายเลขที่ตามหลังจะบอกถึงที่มาของแถบความถี่ย่อย กล่าวคือ หมายเลข (1) แทนภาพประมาณ หมายเลข (2) แทนภาพรายละเอียดในแนวรัศมี หมายเลข (3) แทนภาพรายละเอียดในแนวมุม และหมายเลข (4) แทนภาพรายละเอียดในแนวไขว้กับแกนรัศมีและแนวมุม



(ก) ภาพต้นฉบับ 003_1_1 ในฐานข้อมูล CASIA v.1

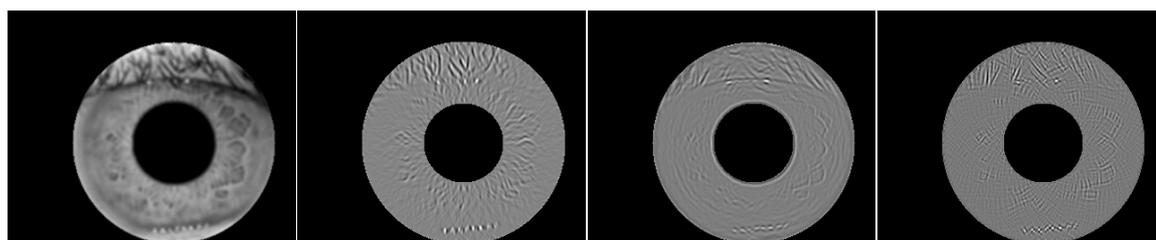


(ข.1)

(ข.2)

(ข.3)

(ข.4)

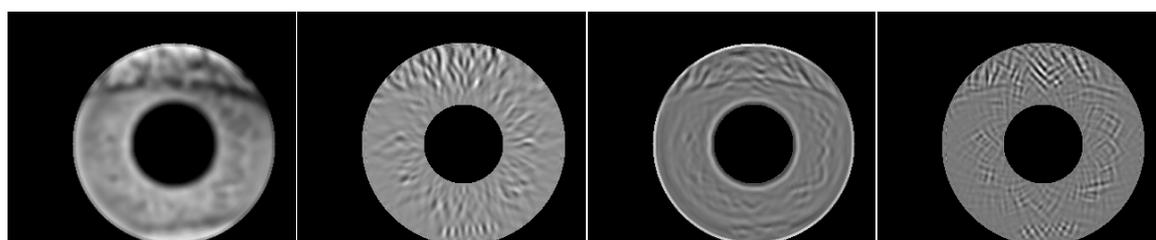


(ค.1)

(ค.2)

(ค.3)

(ค.4)



(ง.1)

(ง.2)

(ง.3)

(ง.4)

ภาพที่ 30 ผลการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว 3 ระดับกับภาพม่านตา

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ของชุดตัวกรองวิเคราะห์แบบ Daubechies's 9-7 biorthogonal filters

n	Lowpass Filter ($h_k[n]$)	Highpass Filter ($g_k[n]$)
0	0.6029490182363579	1.115087052456994
± 1	0.2668641184428723	-0.5912717631142470
± 2	-0.07822326652898785	-0.05754352622849957
± 3	-0.01686411844287495	0.09127176311424948
± 4	0.02674875741080976	

ที่มา: Antonini *et al.* (1992)

4. วิธีการแทนและเข้ารหัสลักษณะเฉพาะของม่านตา (Iris Feature Representation and Encoding Method)

ลักษณะเฉพาะของม่านตาที่วิเคราะห์ได้ออกมาอาจจะมีรายละเอียดมาก ทำให้จำเป็นต้องมีการเลือกเฉพาะค่าที่เด่นชัดและเหมาะสมมาเป็นตัวแทนลักษณะเฉพาะของม่านตา และข้อสำคัญอีกประการหนึ่งของการหาตัวแทนลักษณะเฉพาะคือ การสร้างลักษณะเฉพาะที่มีอยู่ให้เกิดความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งการเลื่อน การหมุน หรือการปรับขนาดของม่านตา นอกจากนี้ในการเข้ารหัสลักษณะเฉพาะของม่านตาจะนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาสร้างรหัสไว้ใช้สำหรับการเปรียบเทียบและเก็บเป็นฐานข้อมูล โดยไม่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลทั้งภาพม่านตาไว้เปรียบเทียบ

4.1 ที่มาและสมมติฐาน

จากภาพรายละเอียดทั้งสามของการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วในหัวข้อที่ 3 เส้นของภาพรายละเอียดแนวรัศมีมีข้อมูลที่สำคัญปรากฏอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นลักษณะโดยทั่วไปของลายม่านตาที่ลายเส้นมักปรากฏอยู่ในแนวแกนรัศมีเมื่อเทียบจุดอ้างอิงจากจุดศูนย์กลางของรูม่านตา และสอดคล้องกันกับผลงานวิจัยของ Ma *et al.* (2003) ที่กล่าวถึงข้อมูลบนโดเมนความถี่ของลายม่านตาส่วนใหญ่จะกระจายอยู่ตามแนวรัศมีภายใน 3 ระดับความละเอียดแรก จึงได้เสนอวิธีการหาลายเส้นเฉพาะที่สำคัญจากภาพรายละเอียดแนวรัศมีในระดับความละเอียดที่ 3 เพื่อเป็นตัวแทนลักษณะเฉพาะของม่านตา และนำตำแหน่งของลายเส้นดังกล่าวมาใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบต่อไป

4.2 ขั้นตอนวิธีการหาลายเส้นที่สำคัญในภาพรายละเอียดแนวรัศมี

การหาลายเส้นแนวรัศมีที่สำคัญในภาพรายละเอียดแนวรัศมีที่ระดับความละเอียดที่ 3 จากการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว จะอาศัยวิธีการเติบโตของขอบเขต (Region Growing) โดยมีวิธีการตามขั้นตอนต่าง ๆ ดังหัวข้อย่อต่อไปนี้

4.2.1 ทำการกระจายรายละเอียดม่านตาแบบเชิงขั้วเพื่อให้ได้ภาพรายละเอียดแนวรัศมีที่ระดับความละเอียดที่ 3 และเลือกเฉพาะจุดที่อยู่บนส่วน $+10^{\circ}$ ถึง -50° ด้านซ้ายและขวาของม่านตาในฐานข้อมูลม่านตาชุด CASIA v.1 และ -10° ถึง -70° ในฐานข้อมูลม่านตาชุด KSIP DB01R มาใช้เป็นลักษณะเฉพาะ ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 31 (ก)

4.2.2 สร้างจุดเริ่มต้น (Seed) เพื่อการหาลายเส้นแนวรัศมีที่สำคัญด้วยวิธีการเติบโตของขอบเขต โดยหาค่าระดับขีดเริ่มเปลี่ยนสำหรับการเลือก Seed จากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในส่วนพื้นที่ม่านตาที่กำหนดจากข้อ 4.2.1 ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 31 (ข)

4.2.3 เพิ่มความเด่นชัดของลายเส้นเพื่อให้ง่ายต่อการทำการเติบโตของขอบเขต (Region growing) ด้วยการปรับฮิสโตแกรมบนพื้นที่ม่านตาให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Histogram Equalization)

4.2.4 หาลายเส้นแนวรัศมีที่สำคัญด้วยวิธีการเติบโตของขอบเขต ซึ่งจะใช้จุดเริ่มต้นที่ได้จากข้อ 4.2.2 และภาพที่จะทำการเติบโตที่ผ่านขั้นตอนในข้อ 4.2.3 โดยเงื่อนไขของการรวมจุดรอบข้างเข้ามาในกลุ่ม จะพิจารณาจากค่าระดับสีของจุดภาพรอบข้างนั้นต้องมีค่าไม่เกินค่าเฉลี่ยของกลุ่มเกิน 15 ดังแสดงตัวอย่างผลของการเติบโตของขอบเขตที่ได้ในภาพที่ 31 (ค)

โดยขั้นตอนวิธีการหาลายเส้นที่สำคัญในภาพรายละเอียดแนวรัศมีทั้งหมดจะสรุปไว้ในตารางที่ 6 และแสดงแผนภาพรวมของขั้นตอนวิธีดังภาพที่ 32

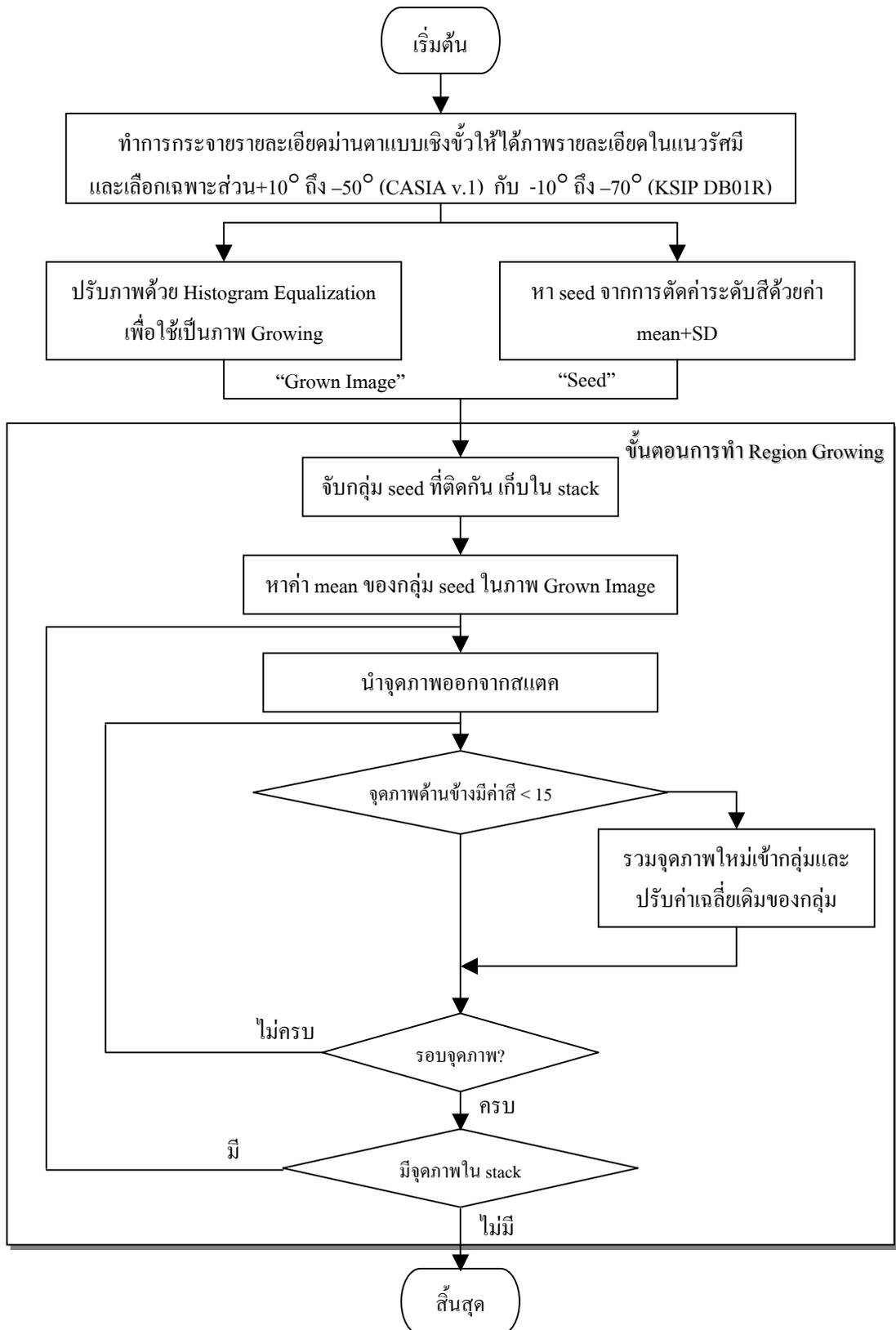


ภาพที่ 31 สายแนวรัศมีที่นำมาใช้เป็นลักษณะเฉพาะของม่านตา

ตารางที่ 6 สรุปขั้นตอนวิธีของการหาสายที่สำคัญในภาพรายละเอียดแนวรัศมี

สรุปขั้นตอนวิธี การหาสายที่สำคัญในภาพรายละเอียดแนวรัศมี

- 1: ทำการกระจายรายละเอียดม่านตาแบบเชิงขั้ว และเลือกเฉพาะจุดที่อยู่บนส่วน $+10^{\circ}$ ถึง -50° ด้านซ้ายและขวาของม่านตาในฐานข้อมูลม่านตาชุด CASIA v.1 และ -10° ถึง -70° ในฐานข้อมูลม่านตาชุด KSIP DB01R มาใช้เป็นลักษณะเฉพาะ
 - 2: หาค่าระดับขีดเริ่มเปลี่ยนสำหรับการเลือกกลุ่มจุดภาพเริ่มต้น (Seed) จากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในส่วนของพื้นที่ม่านตาที่กำหนด
 - 3: ปรับฮิสโตแกรมบนพื้นที่ม่านตาให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ (Histogram Equalization)
 - 4: หาสายแนวรัศมีด้วยวิธีการเติบโตของขอบเขต (Region growing)
 - 4.1 จับกลุ่มจุดเริ่มที่เชื่อมติดกันไว้ในสแตค (Stack) เริ่มต้นเดียวกัน
 - 4.2 หาค่าเฉลี่ยของค่าระดับสีในกลุ่มของสแตค
 - 4.3 นำจุดภาพออกจากสแตคตรวจสอบค่าระดับสีของจุดรอบข้าง ถ้าค่าระดับสีของจุดด้านข้างน้อยกว่าค่าเฉลี่ยเดิมถึง 15 ให้รวมเข้ามาอยู่ในกลุ่ม แต่ถ้ามากกว่าให้หยุดไม่พิจารณา เมื่อทำครบทุกจุดรอบข้างแล้วให้ปรับค่าเฉลี่ยเดิมโดยรวมจุดภาพที่เพิ่มเข้ามาในกลุ่มใหม่ด้วย
 - 4.4 ถ้าจุดภาพในสแตคว่างเปล่าให้กลับไปทำ (4.1) ใหม่เพื่อหากกลุ่มต่อไป แต่ถ้ายังมีจุดภาพเหลืออยู่ให้กลับไปทำ (4.3) เพื่อตรวจสอบจุดรอบข้างเพิ่มเติม
-



ภาพที่ 32 แผนภาพรวมของขั้นตอนการหาเส้นที่สำคัญในภาพรายละเอียดแนวรัศมี

4.3 ขั้นตอนวิธีการเข้ารหัสตำแหน่งพิกัดของลายเส้นแนวรัศมี

การเข้ารหัสลักษณะเฉพาะของม่านตาจะพิจารณาค่าแห่งจุดภาพทั้งหมดของลายเส้นแนวรัศมีที่ได้จากหัวข้อ 4.2 ซึ่งการอ้างอิงตำแหน่งจุดภาพจะใช้จุดศูนย์กลางของรูม่านตาแต่ขอบเขตวงแหวนม่านตาจะเป็นพิกัดขอบเขตมาตรฐานกลาง เพื่อให้การเปรียบเทียบชุดรหัสของตำแหน่งพิกัดเชิงขั้วสามารถกระทำได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องอ้างอิงกับพิกัดขอบเขตเดิมและยังเป็นผลให้สามารถลดเวลาการเปรียบเทียบลง ซึ่งขั้นตอนของการเข้ารหัสตำแหน่งพิกัดมีรายละเอียดดังจะกล่าวในหัวข้อย่อยต่อไป และสรุปขั้นตอนวิธีจะแสดงอยู่ในตารางที่ 7 พร้อมแผนภาพรวมของขั้นตอนวิธีในภาพที่ 33

4.3.1 ทำการหาลายเส้นแนวรัศมีที่เด่นชัดของลายม่านตาตามหัวข้อที่ 4.2

4.3.2 คำนวณพิกัดตำแหน่งของลายเส้นแนวรัศมีโดยอ้างอิงกับจุดศูนย์กลางของรูม่านตาเดิมตามสมการที่ (32)

$$r = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y - y_c}{x - x_c}\right) \quad (32)$$

ซึ่ง (r, θ) คือ ตำแหน่งพิกัดเชิงขั้วของจุดภาพ (x, y)

(x_c, y_c) คือ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของรูม่านตา

4.3.3 ปรับพิกัดรัศมีของจุดภาพให้ไปอ้างอิงบนขอบเขตวงแหวนม่านตามาตรฐาน ตามสมการที่ (33)

$$r_{norm}(\theta) = (r_{inner})_{ref} + \frac{r(\theta) \times [(r_{outer})_{ref} - (r_{inner})_{ref}]}{[r_{outer} - r_{inner}]} \quad (33)$$

ซึ่ง $r_{norm}(\theta)$ คือ พิกัดรัศมีที่อ้างอิงบนขอบเขตวงแหวนม่านตามาตรฐานของพิกัดรัศมี $r(\theta)$ เดิม

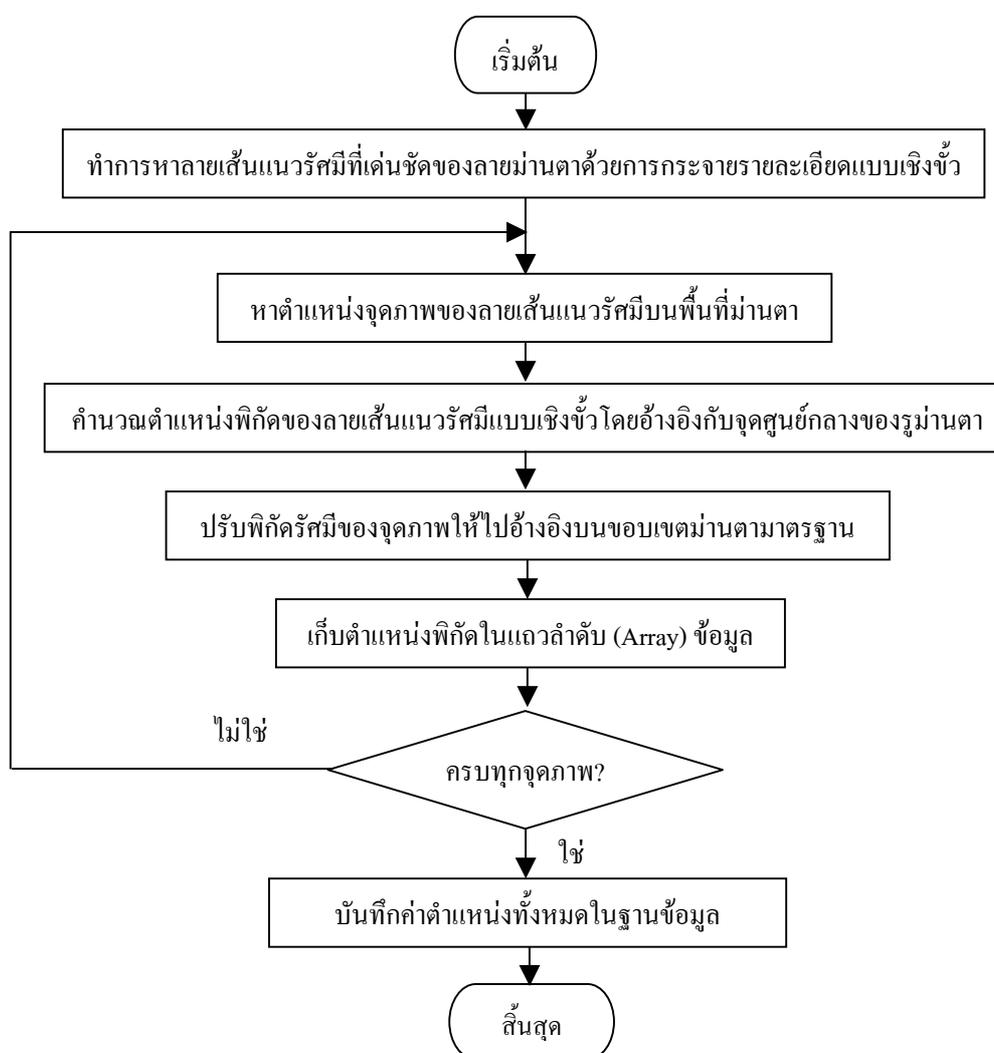
(r_{inner}, r_{outer}) คือ รัศมีขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านในและด้านนอก

$(r_{inner}, r_{outer})_{ref}$ คือ รัศมีอ้างอิงมาตรฐานของขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านในและด้านนอก

ตารางที่ 7 สรุปขั้นตอนวิธีการของการเข้ารหัสตำแหน่งพิกัดของลายเส้นแวนวอร์สมิ

สรุปขั้นตอนวิธี การเข้ารหัสตำแหน่งพิกัดของลายเส้นแวนวอร์สมิ

- 1: ทำการหาลายเส้นแวนวอร์สมิที่เด่นชัดของลายม่านตาด้วยการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว
- 2: คำนวณตำแหน่งพิกัดของลายเส้นแวนวอร์สมิโดยอ้างอิงกับจุดศูนย์กลางของรูม่านตา
- 3: ปรับพิกัดครีสมิของจุดภาพให้ไปอ้างอิงบนขอบเขตม่านตามาตรฐาน
- 4: วนซ้ำข้อ (3) จนครบทุกจุดภาพของลายเส้นแวนวอร์สมิที่แยกออกมาได้บนพื้นที่ม่านตา
- 5: เก็บตำแหน่งพิกัดทั้งหมดที่ได้ในฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ



ภาพที่ 33 แผนภาพรวมของขั้นตอนการเข้ารหัสตำแหน่งพิกัดของลายเส้นแวนวอร์สมิ

5. วิธีการเปรียบเทียบม่านตา (Iris Matching Method)

การเลือกวิธีการเปรียบเทียบข้อมูลม่านตาโดยปกติจะพิจารณาจากลักษณะของข้อมูลที่ได้มาจากการแทนและเข้ารหัสลักษณะเฉพาะ ซึ่งวิธีการเปรียบเทียบข้อมูลสามารถหาทั้งความเข้าคู่กันของข้อมูลเพื่อสร้างคะแนนความเหมือน (Matching score) ขึ้น หรือหาความต่างกันของข้อมูลเพื่อสร้างค่าระยะห่าง (Distance) ระหว่างข้อมูลได้

5.1 ที่มาและสมมติฐาน

ความเข้าคู่กัน โดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้เป็นตัววัดความเหมือนของตำแหน่งของข้อมูล ซึ่งวิธีการนี้ถือได้ว่าเป็นวิธีการทั่วไปที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้เสนอการเปรียบเทียบตำแหน่งพิกัดของลายเส้นแนวรัศมีด้วยการทำสหสัมพันธ์ (Correlation) ของรหัสข้อมูลที่ได้จากการแทนและเข้ารหัสลักษณะเฉพาะ ซึ่งเป็นวิธีการเทียบหาตำแหน่งที่มีความเข้าคู่กันมากที่สุดเพื่อสร้างคะแนนความเหมือนสำหรับตัดสินใจบุคคลได้

5.2 ขั้นตอนวิธีการเปรียบเทียบตำแหน่งข้อมูลในพิกัดเชิงขั้ว

สำหรับการเปรียบเทียบตำแหน่งของข้อมูลด้วยการทำสหสัมพันธ์ เริ่มด้วยการนับตำแหน่งของข้อมูลที่มีอยู่ตรงกันจากชุดรหัสที่ต้องการเปรียบเทียบทั้งสอง เพื่อคำนวณค่าคะแนนความเข้าคู่กันของม่านตาออกมา โดยการคำนวณค่าคะแนนในแต่ละครั้งจะมีตัวแปรของการชดเชยมุมเนื่องมาจากการหมุนของศีรษะรวมอยู่ด้วย ทำให้ก่อนการตัดสินใจบุคคลจะต้องมีการเลือกค่าคะแนนความเข้าคู่มาจากการคำนวณในทุกมุมชดเชยที่ได้พิจารณา ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ จะกล่าวอยู่ในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

5.2.1 สร้างรูปภาพใหม่ขึ้นมา แล้วนำข้อมูลพิกัดในระบบเชิงขั้วจากฐานข้อมูลมาใส่ลงในแต่ละจุดภาพ

5.2.2 นำข้อมูลพิกัดในระบบเชิงขั้วจากภาพที่ต้องการเปรียบเทียบมาคำนวณเพื่อหาตำแหน่งพิกัดในภาพจากฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นตามสมการที่ (34) ถ้ามีข้อมูลที่ตรงกันให้นับจำนวนครั้งเก็บไว้เพื่อคำนวณค่าคะแนนความเหมือนตามสมการที่ (35)

$$\begin{aligned}x &= r \cos \theta \\y &= r \sin \theta\end{aligned}\quad (34)$$

ซึ่ง (x, y) คือ ตำแหน่งจุดภาพในระบบพิกัดมุมฉาก
 (r, θ) คือ ตำแหน่งจุดภาพในระบบพิกัดเชิงขั้ว

$$\%match = \frac{\#same}{Total\#data} \times 100 \quad (35)$$

ซึ่ง $\%match$ คือ คะแนนความเหมือนของการเปรียบเทียบ
 $\#same$ คือ จำนวนตำแหน่งที่ตรงกัน
 $Total\#data$ คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดจากทั้งสองภาพ

5.2.3 วนทำซ้ำ (5.2.2) จนครบทุกการพิจารณามุมชดเชยจากสมการที่ (36)

$$\theta_2 = \theta_1 + \theta_{comp} \quad (36)$$

ซึ่ง θ_1 คือ ค่าพิกัดมุมของเดิม
 θ_2 คือ ค่าพิกัดมุมใหม่ของข้อมูลที่ผ่านการชดเชยด้วยค่า θ_{comp}

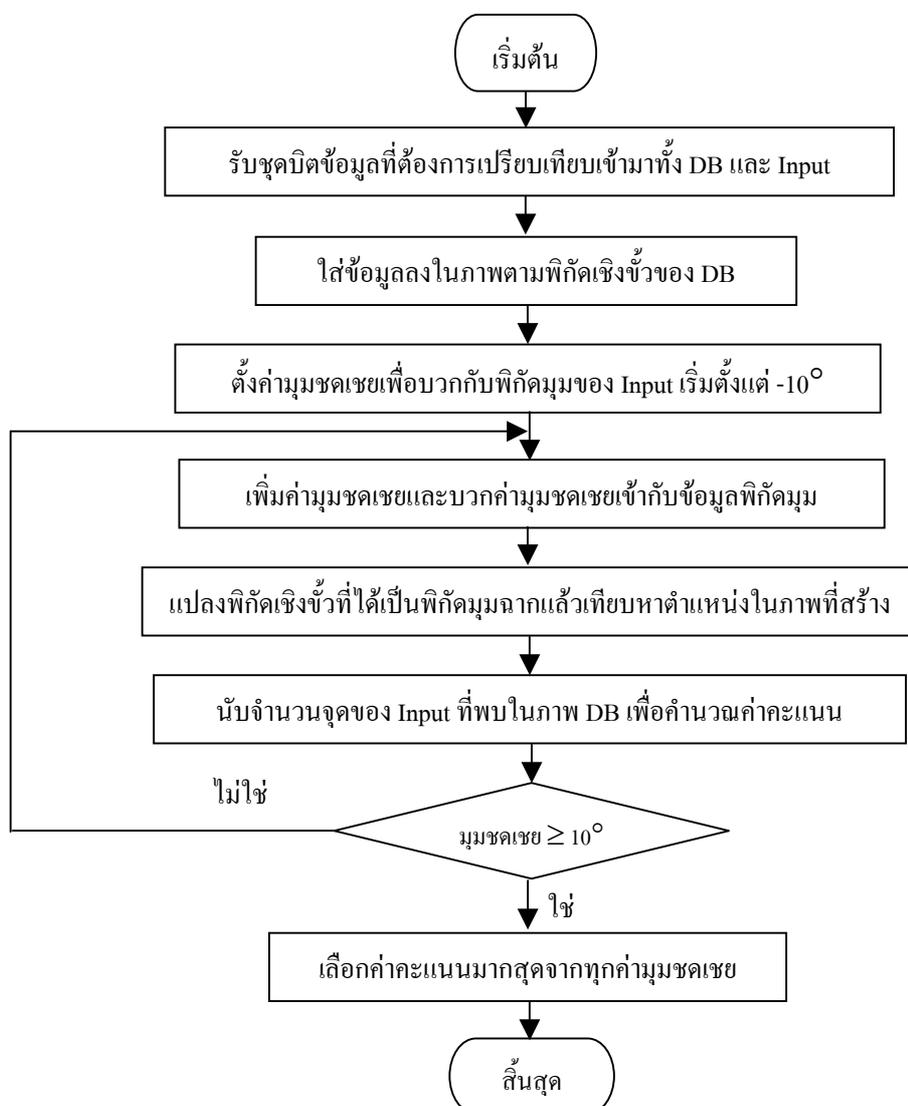
5.2.4 เลือกค่าคะแนนที่มากที่สุดจากทุกมุมชดเชยมาใช้เป็นตัวแทนค่าคะแนนความเหมือนของการเปรียบเทียบคู่ดังกล่าว

โดยขั้นตอนวิธีการเปรียบเทียบตำแหน่งข้อมูลในพิกัดเชิงขั้วทั้งหมดจะสรุปไว้ในตารางที่ 8 และแสดงแผนภาพรวมของขั้นตอนวิธีดังกล่าวที่ 34

ตารางที่ 8 สรุปขั้นตอนวิธีของการเปรียบเทียบตำแหน่งข้อมูลในพิกัดเชิงขั้ว

สรุปขั้นตอนวิธี การเปรียบเทียบตำแหน่งข้อมูลในพิกัดเชิงขั้ว

- 1: สร้างรูปภาพขึ้นมา แล้วนำข้อมูลพิกัดในระบบเชิงขั้วจากฐานข้อมูลมาใส่ลงในแต่ละจุดภาพ
- 2: นำข้อมูลพิกัดในระบบเชิงขั้วจากภาพที่ต้องการเปรียบเทียบมาคำนวณเพื่อหาตำแหน่งพิกัดในภาพจากฐานข้อมูลที่สร้างขึ้น ถ้ามีข้อมูลที่ตรงกันให้นับเก็บไว้
- 3: วนรอบทำข้อ (2) จนครบทุกการพิจารณามุมซดเซย
- 4: เลือกค่าคะแนนมากที่สุดจากทุกมุมซดเซยมาใช้เป็นตัวแทนค่าคะแนนความเหมือนของการเปรียบเทียบคู่ดังกล่าว



ภาพที่ 34 แผนภาพรวมของขั้นตอนการเปรียบเทียบตำแหน่งข้อมูลในพิกัดเชิงขั้ว

อุปกรณ์การพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

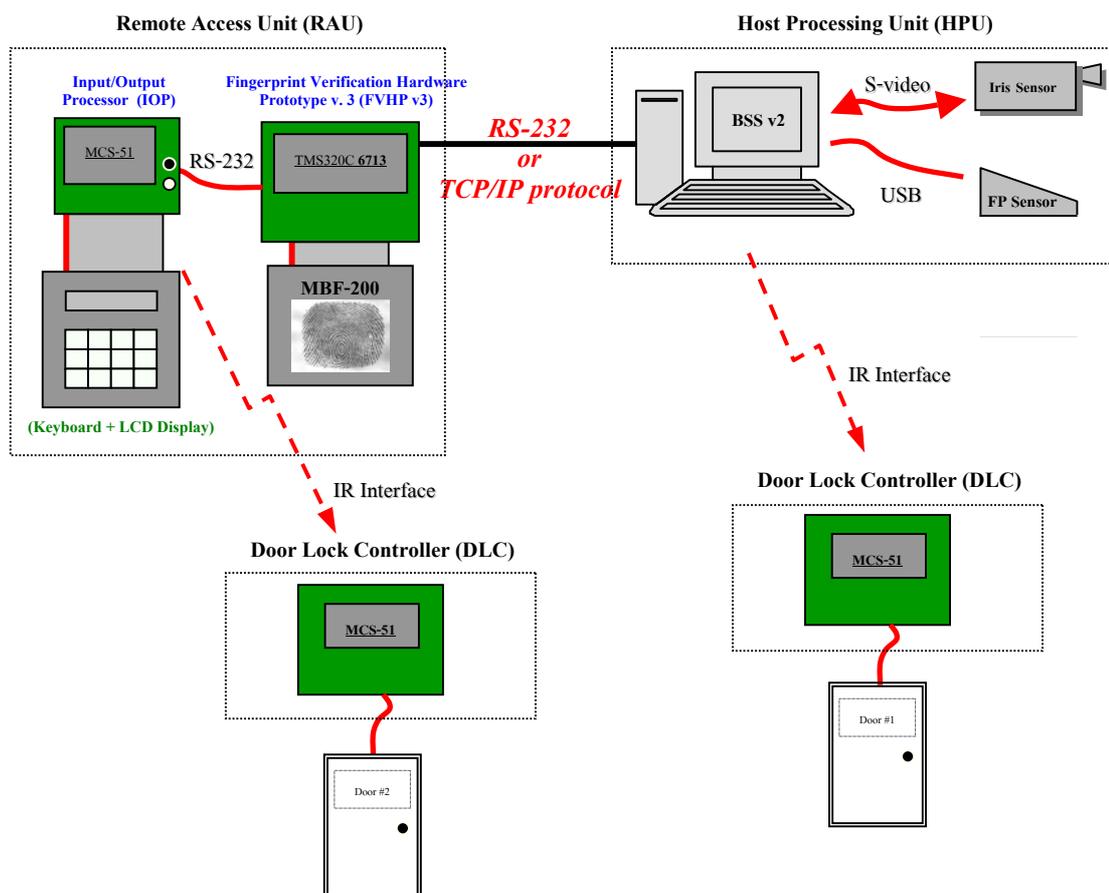
วัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับดำเนินการวิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก ประกอบด้วย

1. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Pentium IV 1.8 GHz RAM 256 Mbytes	1	เครื่อง
2. เครื่องอ่านม่านตาต้นแบบของห้องปฏิบัติการ KSIP ที่ประกอบด้วย		
2.1 กล้องวิดิทัศน์แบบแอนะล็อกที่สามารถรับแสงใกล้อินฟราเรด (Near Infrared) ได้ดี	1	ตัว
2.2 ระบบยิงแสงใกล้อินฟราเรด	1	ชุด
2.3 ชุดวิเคราะห์ทางโดยใช้แสงอินฟราเรด	1	ชุด
3. แผงวงจรแปลงสัญญาณวิดิทัศน์แบบแอนะล็อกเป็นข้อมูลทางดิจิทัล	1	ชุด
4. เครื่องอ่านลายนิ้วมือเชิงแสงของ NECTEC รุ่น NOFPS 2	1	เครื่อง
5. เครื่องอ่านลายนิ้วมือเชิงตัวเก็บประจุต้นแบบของห้องปฏิบัติการ KSIP	1	เครื่อง
6. ชุดควบคุมการเปิดประตูแบบไร้สายผ่านทางอินฟราเรด	1	ชุด
7. ชุดฮาร์ดแวร์ตรวจสอบลายนิ้วมือของห้องปฏิบัติการ KSIP รุ่น FVHP 3	1	ชุด
8. ซอฟต์แวร์เขียนโปรแกรม Borland Delphi รุ่นที่ 6.0	1	ชุด

วิธีการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

1. ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของระบบไบโอเมตริก

ระบบไบโอเมตริกถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นระบบตรวจสอบบุคคลด้วยม่านตาหรือลายนิ้วมือสำหรับงานรักษาความปลอดภัยการผ่านเข้าออกประตู ซึ่งภายในระบบไบโอเมตริกจะมีส่วนประกอบที่สำคัญเป็นฮาร์ดแวร์อยู่ 2 ระบบตามภาพที่ 35 คือ หน่วยประมวลผลกลางหรือ Host Processing Unit (HPU) ที่เป็นคอมพิวเตอร์ และหน่วยเข้าถึงย่อยหรือ Remote Access Unit (RAU) ที่เป็นแผงวงจรตรวจสอบลายนิ้วมือสามารถประมวลผลได้ภายในตัวเอง ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ภายในระบบไบโอเมตริกมีดังต่อไปนี้



ภาพที่ 35 โครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่างฮาร์ดแวร์ทั้งหมดภายในระบบไบโอเมตริก

1.1 หน่วยประมวลผลกลางหรือ HPU (Host Processing Unit)

ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของการจัดการระบบไบโอเมตริกโดยการเชื่อมต่อระหว่างฮาร์ดแวร์ทั้งหมดของหน่วยประมวลผลกลางจะแสดงในภาพที่ 36 ซึ่งประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกที่อาจต่ออยู่กับเครื่องอ่านอัตลักษณ์ไบโอเมตริก เช่น เครื่องอ่านม่านตาต้นแบบของห้องปฏิบัติการประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์ (KSIP Lab) ดังภาพที่ 37 (ก) เครื่องอ่านลายนิ้วมือเชิงแสงของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ หรือ NECTEC รุ่น NOFPS 2 (NECTEC Optical Fingerprint Scanner Prototype) ดังภาพที่ 37 (ข) หรือเครื่องอ่านลายนิ้วมือเชิงตัวเก็บประจุต้นแบบของห้องปฏิบัติการประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์ดังภาพที่ 37 (ค) เพื่อใช้เป็นตัวรับภาพม่านตาและลายนิ้วมือเข้ามารวบรวมข้อมูลตามลำดับ รวมทั้งอาจเชื่อมต่ออยู่กับส่วนฮาร์ดแวร์ควบคุมการเปิดประตูหรือ Door Lock Control (DLC) เพื่อสั่งการเปิดประตู



ภาพที่ 36 โครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่างฮาร์ดแวร์ของหน่วยประมวลผลกลาง



(ก) เครื่องอ่านม่านตา



(ข) เครื่องอ่านลายนิ้วมือ

เชิงแสง



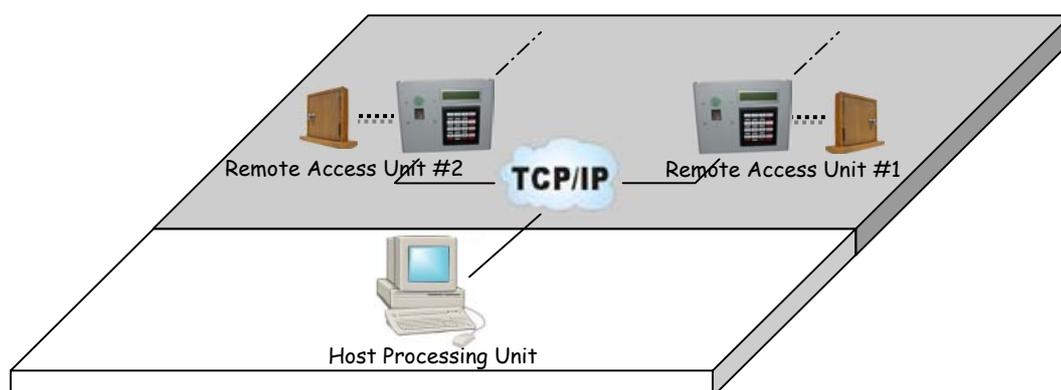
(ค) เครื่องอ่านลายนิ้วมือ

เชิงตัวเก็บประจุ

ภาพที่ 37 เครื่องอ่านม่านตาและเครื่องอ่านลายนิ้วมือที่เชื่อมต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ภายในหน่วยประมวลผลกลาง

ในส่วนการทำงานหลักของ HPU สามารถแบ่งออกได้เป็นสองลักษณะคือ การใช้งานควบคุมการเปิดประตู โดยจะรับภาพม่านตาจากเครื่องอ่านม่านตาหรือรับภาพลายนิ้วมือจากเครื่องอ่านลายนิ้วมือทั้งแบบเครื่องอ่านลายนิ้วมือเชิงแสงของ NECTEC รุ่น NOFPS2 หรือเครื่องอ่านลายนิ้วมือเชิงตัวเก็บประจุของห้องปฏิบัติการประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์ เข้ามา

เพื่อทำการตรวจสอบ ทั้งในโหมคการค้นหามุคคคในฐานข้อมูลทั้งหมด (Identification) และในโหมคการเปรียบเทียบเพื่อยืนยันบุคคลแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (Verification) โดยเมื่อบุคคคได้ทำการตรวจสอบม่านตาหรือลายนิ้วมือผ่านแล้วจะมีการส่งสัญญาณให้ทำการเปิดประตูแบบไร้สายผ่านทางอินฟาเรดที่มีการเข้ารหัสข้อมูลเพื่อความปลอดภัยไปยังฮาร์ดแวร์ควบคุมการเปิดประตูที่ติดตั้งอยู่ตามประตู และการทำงานอีกลักษณะหนึ่งของ HPU คือ การเป็นศูนย์กลางของการจัดการการทำงานของระบบไบโอเมตริก โดยจะมีการตรวจสอบม่านตาหรือลายนิ้วมือเพื่ออนุญาตเฉพาะบุคคลที่มีอำนาจเข้าไปจัดการระบบไบโอเมตริก โดยสามารถเลือกได้ทั้งการจัดการระบบภายใน HPU เอง หรือการจัดการระบบของ RAU อาทิเช่น การจัดการฐานข้อมูลส่วนบุคคล การตั้งค่าการทำงานของระบบโดยทั่วไปให้แก่ HPU หรือ RAU ซึ่งการเชื่อมต่อระหว่าง HPU กับ RAU นี้สามารถทำได้ผ่านพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรม (Serial port) ด้วยโพรโทคอลล RS-232 ที่สามารถรองรับจำนวน RAU ได้สูงสุด 15 หน่วย หรือผ่านการสื่อสารแบบ LAN ด้วยโพรโทคอลล TCP/IP ที่สามารถรองรับ RAU ได้เป็นจำนวนมาก เป็นลักษณะเครือข่ายดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 เครือข่ายระบบไบโอเมตริกที่มี HPU เป็นศูนย์กลางการจัดการของระบบและมี RAU เป็นหน่วยตรวจสอบไบโอเมตริกย่อย

1.2 หน่วยเข้าถึงย่อยหรือ RAU (Remote Access Unit)

ทำหน้าที่ควบคุมการเปิดประตูเฉพาะที่ โดยใช้ฮาร์ดแวร์ Fingerprint Verification Hardware Prototype version 3 (FVHP v.3) ของห้องปฏิบัติการประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์ ซึ่งเป็นแผงวงจรประมวลสัญญาณดิจิทัล (DSP Board) ที่มีชิพ DSP เบอร์ TMS320C6713 ของบริษัท Texas Instrument ทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลต่อเข้ากับตัวรับภาพ

ลายนิ้วมือแบบตัวเก็บประจุ (Capacitive) MBF-200 ของบริษัท Fujitsu โดยมีส่วนปฏิสัมพันธ์กับผู้
ใช้ด้วยฮาร์ดแวร์ควบคุม (Input/Output Processor) ซึ่งประกอบด้วยจอแสดงผล (LCD) กับแผงปุ่ม
กด (Keyboard) นอกจากนี้ฮาร์ดแวร์ FVHP v.3 ยังสามารถเชื่อมต่อกับส่วนฮาร์ดแวร์ควบคุมการ
เปิดประตูแบบไร้สายผ่านทางอินฟราเรดเช่นเดียวกันกับการเชื่อมต่อของหน่วยประมวลผลกลาง จึง
เป็นผลให้ฮาร์ดแวร์ FVHP v.3 มีความสามารถประมวลผลและตรวจสอบบุคคลด้วยลายนิ้วมือได้
ภายในตัว (Standalone) โดยการเชื่อมต่อระหว่างฮาร์ดแวร์ทั้งหมดของหน่วยเข้าถึงย่อยจะแสดงใน
ภาพที่ 39



ภาพที่ 39 โครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่างฮาร์ดแวร์ของหน่วยเข้าถึงย่อย

ในส่วนการทำงานของ RAU จะเป็นการใช้งานเฉพาะการควบคุมการเปิดประตู
เฉพาะที่ ซึ่งจะรับภาพลายนิ้วมือของผู้ใช้ผ่านเข้ามาทางตัวรับภาพลายนิ้วมือแบบตัวเก็บประจุ เพื่อ
ตรวจสอบบุคคลได้ทั้งในโหมดการค้นหบุคคลในฐานข้อมูลทั้งหมด (Identification) และใน
โหมดการเปรียบเทียบเพื่อยืนยันบุคคลแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (Verification) จากนั้นจะส่งการเปิดประตู
ผ่านทางอินฟราเรดเช่นเดียวกันกับการทำงานควบคุมการเปิดประตูของ HPU แต่ทว่าฐานข้อมูลส่วน
บุคคลที่เก็บอยู่ในตัว RAU จะมีขนาดที่จำกัดอยู่ที่ประมาณ 1000 คน ซึ่งแตกต่างกับฐานข้อมูลที่
สามารถมีได้บน HPU ที่มีขนาดไม่จำกัดขึ้นกับขนาดพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์

2. หลักการการทำงานของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

ซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกเป็นโปรแกรมที่ทำหน้าที่เป็นผู้บริหารจัดการทรัพยากร (Resource Manager) ทั้งหลายที่ระบบปฏิบัติการบนคอมพิวเตอร์ให้สิทธิในการเข้าใช้งานอันได้แก่ การประมวลผลของโปรเซสเซอร์หรือซีพียู (CPU) การบันทึกข้อมูล การรับส่งข้อมูลจากฮาร์ดแวร์ และอุปกรณ์สื่อสาร ดังนั้นการออกแบบวิธีการทำงานของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกต้องคำนึงถึงสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ร่วมด้วย

สำหรับการออกแบบวิธีการทำงานของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกจะมีการพิจารณาเฉพาะในส่วนของการใช้งานฮาร์ดแวร์และข้อมูลร่วมกัน การจัดการการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ การฟื้นฟูสภาพเมื่อเกิดการดำเนินงานที่ผิดปกติ การจัดโครงสร้างข้อมูลเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อการสูญหายของข้อมูลและเกิดความรวดเร็วในการใช้งานข้อมูล และการบริหารจัดการการสื่อสารข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ ซึ่งวิธีการทำงานของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกต่าง ๆ จะต้องมีส่วนที่สัมพันธ์กับส่วนเชื่อมต่อผู้ใช้หรือที่เรียกว่า User Interface

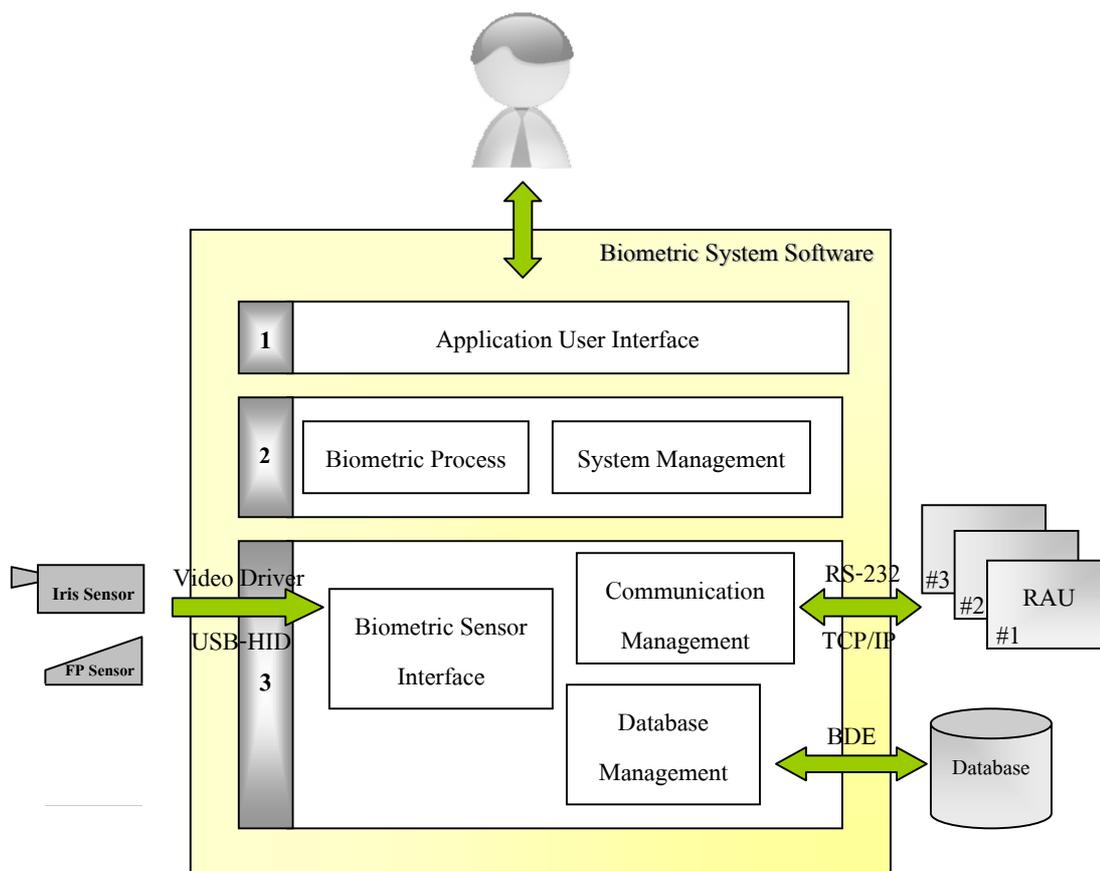
โดยโครงสร้างการทำงานภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ตามหน้าที่การทำงาน เรียกว่า ระดับชั้น (Layer) โดยที่ระดับชั้นบนจะถูกสร้างอยู่เหนือระดับชั้นอื่นที่อยู่ต่ำกว่า ระดับชั้นล่างสุดจะหมายถึงการทำงานที่เกี่ยวกับฮาร์ดแวร์ และระดับชั้นบนสุดเป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้

โปรแกรมในแต่ละระดับชั้นจะมีลักษณะเป็นมอดูล (Module) หรือกลุ่มงานหนึ่ง ซึ่งจะเรียกใช้ฟังก์ชันหรือบริการต่าง ๆ จากโปรแกรมในระดับชั้นที่อยู่ต่ำกว่าเท่านั้น ลักษณะนี้เรียกว่า Modularity โดยที่โครงสร้างแบบระดับชั้นของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับดังนี้

ระดับชั้นที่ 1 : การติดต่อกับผู้ใช้

ระดับชั้นที่ 2 : การบริหารจัดการระบบและการประมวลผล

ระดับชั้นที่ 3 : การทำงานเกี่ยวกับฮาร์ดแวร์และการบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 40 โครงสร้างของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกแบบเป็นระดับชั้น

ภาพที่ 40 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกแบบเป็นระดับชั้น ซึ่งระดับชั้นบนสุดจะมีหน้าที่คอยรับคำสั่งและแสดงผลให้กับผู้ใช้งานเป็นสำคัญ ถัดลงมาเป็นระดับชั้นของการประมวลผลที่อาจต้องการดึงข้อมูลจากระดับชั้นของการติดต่อฮาร์ดแวร์และบันทึกข้อมูลที่เป็นระดับชั้นล่างสุด เช่น การประมวลผลเพื่อเปรียบเทียบบุคคลด้วยภาพม่านตาหรือลายนิ้วมือ โดยในส่วนของระดับชั้นที่สองนี้จะมีหน้าที่สำหรับการประมวลผลข้อมูลต่าง ๆ และการจัดการระบบภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก เมื่อเกิดการขัดจังหวะ (Interrupt) ต่าง ๆ หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบขึ้น สำหรับระดับชั้นล่างสุดจะมีหน้าที่บริหารจัดการการใช้งานทรัพยากร (System Resource) และอุปกรณ์สื่อสาร (Communication Port) ของคอมพิวเตอร์ เช่น (1) การเข้าถึงพอร์ตอนุกรม (Serial port) หรือพอร์ตสื่อสาร LAN (2) การอ่านข้อมูลจากเครื่องอ่านม่านตาผ่านทาง S-Video หรือเครื่องอ่านลายนิ้วมือผ่านพอร์ต USB (3) การเข้าถึงทรัพยากรหน่วยความจำที่มีข้อมูลเป็นฐานข้อมูลส่วนบุคคลซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลประวัติผู้ใช้ ข้อมูลสถานะผู้ใช้ ข้อมูลม่านตา ข้อมูลลายนิ้วมือ และข้อมูลบันทึกการเข้าออก

3. วิธีการเขียนโปรแกรมของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

ซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกได้พัฒนาบนพื้นฐานของการเขียนโปรแกรมชนิด Interrupt/Event Driven Program กล่าวคือ เป็นโปรแกรมที่ทำงานโดยอาศัยการขัดจังหวะ (Interrupt) หรือเหตุการณ์ที่มาจากผู้ใช้เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการทำงานขึ้น โดยตอบสนองด้วยกิจกรรม (Procedure) หรือฟังก์ชัน (Function) ตามการขัดจังหวะหรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างกับการเขียนโปรแกรมแบบโครงสร้าง (Structure Programming) ที่เน้นการเขียนโปรแกรมให้ควบคุมทุกอย่างอย่างครบถ้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสร้างโปรแกรมประยุกต์ (Application Program) ที่มีการติดต่อกับผู้ใช้งานส่วนแต่มีเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้หลากหลายจากการใช้งาน ด้วยเหตุนี้การเลือกซอฟต์แวร์ที่จะนำมาใช้พัฒนาเป็นซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์แบบ 32 บิต (WIN32) จึงต้องพิจารณาตามความเหมาะสมและความสามารถในด้านต่าง ๆ ซึ่งซอฟต์แวร์ที่มีความนิยมใช้พัฒนาโปรแกรมประยุกต์ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นซอฟต์แวร์ที่มีการโปรแกรมแบบวิซวล (Visual Programming) คือ กำหนดเหตุการณ์สำหรับเขียนโปรแกรมได้จากคอมโพเนนต์ และเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้พัฒนาโปรแกรมประยุกต์ได้อย่างรวดเร็ว หรือ RAD (Rapid Application Development) อย่างเช่น Microsoft Visual Basic, Borland Delphi และ Microsoft Visual C++ ซึ่งจุดเด่นในด้านต่าง ๆ ของซอฟต์แวร์ทั้งหมดเหล่านี้ได้ถูกเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 9

เมื่อพิจารณาข้อดีข้อเสียต่าง ๆ ของซอฟต์แวร์ทั้งหมดในตารางที่ 9 แล้วจะพบว่า Borland Delphi 6.0 มีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับใช้พัฒนาโปรแกรมประยุกต์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีความง่ายในการพัฒนาส่วนปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้และงานด้านฐานข้อมูลเมื่อเทียบกับซอฟต์แวร์ Microsoft Visual C++ และยังมีส่วนของการโปรแกรมและรหัสคำสั่ง (Code) โปรแกรมที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับซอฟต์แวร์ Microsoft Visual Basic นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ Borland Delphi 6.0 ยังสามารถปรับเปลี่ยนการทำงานจากระบบปฏิบัติการวินโดวส์ ให้สามารถไปใช้งานบนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ได้ ทำให้โปรแกรมประยุกต์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยซอฟต์แวร์ Borland Delphi 6.0 ไม่ต้องกังวลถึงเรื่องระบบปฏิบัติการบนคอมพิวเตอร์ที่จะนำไปใช้งานแต่อย่างใด ดังนั้นในที่นี้จึงได้เลือกซอฟต์แวร์ Borland Delphi 6.0 มาใช้สำหรับการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

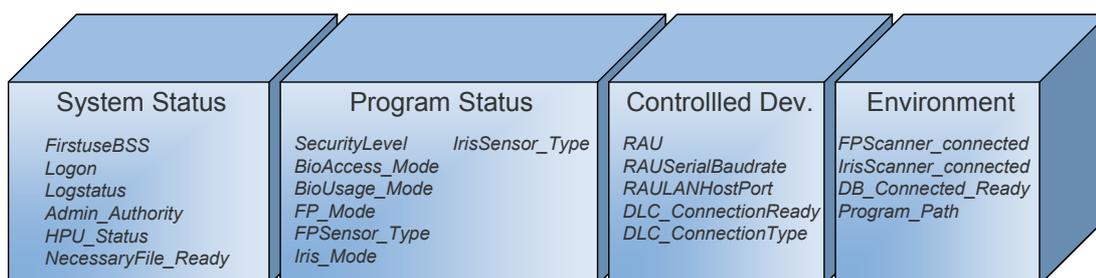
ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบจุดเด่นในด้านต่าง ๆ ของซอฟต์แวร์ที่นิยมใช้พัฒนาโปรแกรมประยุกต์

	Microsoft Visual Basic	Borland Delphi	Microsoft Visual C++
บริษัทผู้ผลิต	Microsoft	Borland	Microsoft
ภาษาการโปรแกรม	Basic	Object Pascal	C/C++
องค์ประกอบต่างๆ ที่ใช้งานเพื่อเขียนโปรแกรม (IDE)	เสถียร และใช้ทรัพยากรน้อย	เสถียร	เสถียร และใช้ทรัพยากรน้อย
การสร้างส่วนปฏิสัมพันธ์ผู้ใช้ (GUI)	ง่าย	ง่าย	ยาก
ความสามารถติดต่อกับงานฐานข้อมูล	ง่าย	ง่าย	ยาก
การเพิ่มเติม Component	ง่าย	ง่าย	ไม่มี ต้องใช้ ActiveX
การเข้าถึงระบบของวินโดวส์(Windows)	ดี	ดี	ดีมาก
รหัสคำสั่ง (Code) โปรแกรม	มีขนาดใหญ่ และต้องการเพิ่ม runtime (.dll) ติดไปกับโปรแกรมด้วยทุกครั้ง	มีขนาดปานกลาง	มีขนาดเล็กมาก
การโหลดโปรแกรม	โหลดช้า	โหลดเร็ว	โหลดเร็วมาก
ความนิยม	ใช้งานเยอะมากในเมืองไทย	ใช้งานน้อยในเมืองไทย	ใช้งานเยอะในบริษัทใหญ่
ข้อเสีย	ภาษาการโปรแกรมไม่ได้เป็น OOP	สร้าง ActiveX Component ยาก	ทำ GUI และติดต่อกับงานฐานข้อมูลยาก
ข้อดี	ใช้งานง่ายสำหรับมือใหม่	สามารถเปลี่ยนการทำงานจากระบบวินโดวส์ไปสู่ลินุกซ์ได้โดยใช้ Source Code เดิมด้วย Borland Kylix	ประสิทธิภาพการทำงานของโปรแกรมบนระบบวินโดวส์ดีมาก

การเขียนโปรแกรมใน Borland Delphi 6.0 นั้นจะใช้ภาษาการเขียนโปรแกรมแบบ Object-Pascal ซึ่งมีลักษณะเป็นการโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object-Oriented Programming, OOP) กล่าวคือ ในแต่ละมอดูลจะให้แทนด้วยหนึ่งจุดหมาย (Object) ซึ่งการเขียนโปรแกรมในลักษณะนี้จะสามารถช่วยให้การโปรแกรมเป็นระเบียบและสามารถจัดหมวดหมู่ได้ (ประพนธ์, 2543; สัจจะ, 2546) ซึ่งภายในการทำงานของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกนั้นจะประกอบด้วยมอดูลที่มาจากหลายระดับเข้ามาทำงานร่วมกันเพื่อรองรับการทำงานของเครื่องจักรหรือเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เข้ามาเรียกใช้กิจกรรมหรือฟังก์ชันได้ตลอดเวลา อันได้แก่ การจัดการระบบภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก (System Management) การประมวลผลเพื่อเปรียบเทียบบุคคลด้วยภาพม่านตาหรือลายนิ้วมือ (Biometric Process) การเชื่อมต่อเครื่องอ่านอัตลักษณ์ไบโอเมตริก (Biometric Sensor Interface) การจัดการฐานข้อมูล (Database Management) และการบริหารจัดการการใช้งานอุปกรณ์สื่อสาร (Communication Management) ทำให้การออกแบบโปรแกรมภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกจึงใช้เทคนิคการเขียนโปรแกรมให้เป็นแบบ OOP โดยมอดูลต่าง ๆ จะแทนด้วยแต่ละจุดหมาย ซึ่งรายละเอียดของแต่ละจุดหมายจะกล่าวอยู่ในหัวข้อย่อต่อไปนี้

3.1 มอดูลจัดการระบบภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก (System Management Module)

ในการจัดการระบบภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกที่สามารถมีการจัดจ้งหวะหรือเหตุการณ์ต่าง ๆ เกิดขึ้นได้ตลอดเวลาทั้งจากการจัดจ้งหวะของเครื่องอ่านอัตลักษณ์ไบโอเมตริก การสื่อสาร และผู้ใช้งาน ทำให้การจัดการระบบจะต้องเป็นบริการที่ต้องมีการทำงานเป็นพื้นฐานตลอดเวลา (Background Process) ซึ่งจะมีกลุ่มข้อมูล (Record) ที่ใช้จัดเก็บสถานะของระบบกลาง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นภายในระบบจะมีการปรับปรุงสถานะที่เกิดขึ้นทุกครั้งกับกลุ่มข้อมูลชุดนี้ เพื่อให้ทุกส่วนของโปรแกรมได้ทราบถึงสถานะโดยรวมของระบบได้ กลุ่มข้อมูลสถานะของโปรแกรม (System Status Record) หรือ TSystem_Status มีฟิลด์ข้อมูลสถานะต่าง ๆ ตามภาพที่ 41 ดังนี้



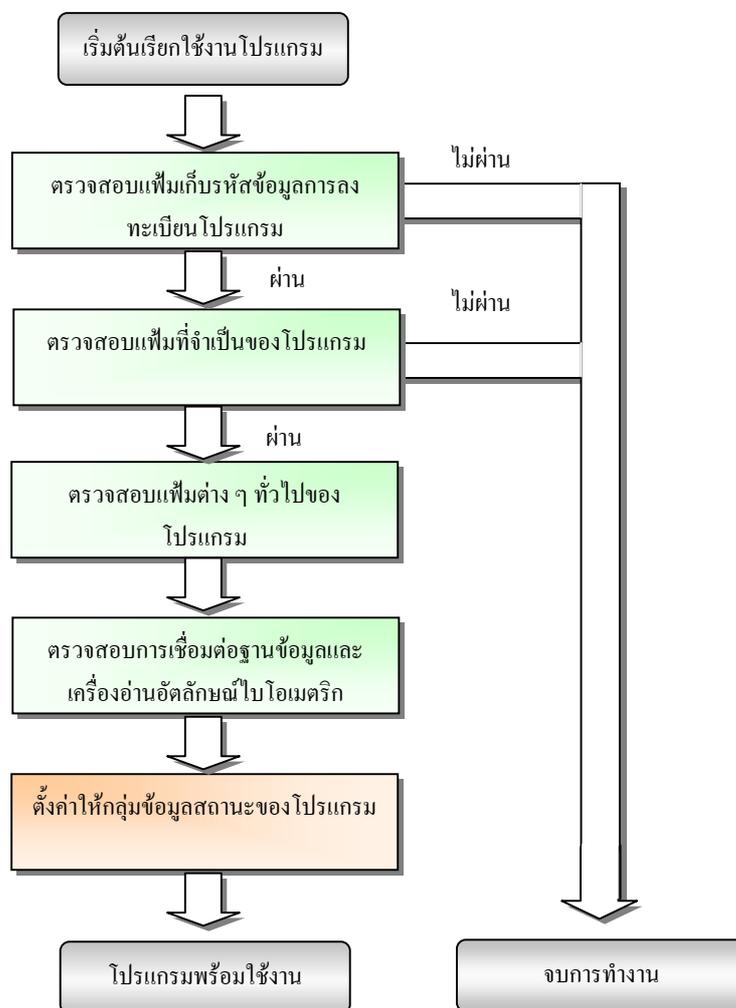
ภาพที่ 41 กลุ่มข้อมูลสถานะของโปรแกรม

- 1) *FirstuseBSS* อยู่ในกลุ่มของ System Status ใช้บอกว่าซอฟต์แวร์ได้ผ่านการลงทะเบียนโปรแกรมครั้งแรกแล้วหรือไม่
- 2) *Logon* อยู่ในกลุ่มของ System Status ใช้บอกสถานะของการ Logon ระบบว่าอยู่ในสถานะนี้หรือไม่
- 3) *Logstatus* อยู่ในกลุ่มของ System Status ใช้บอกสถานะของการ Logon ระบบว่าเป็นผู้ดูแลระบบหรือเจ้าของระบบเข้ามาใช้งาน โดยโปรแกรมจะพิจารณาเมื่อระบบอยู่ในสถานะ Logon แล้ว
- 4) *Admin_Authority* อยู่ในกลุ่มของ System Status ใช้บอกระดับความสามารถและสิทธิในการควบคุมหรือดูแลระบบในแต่ละบุคคลที่ Logon เข้ามาเพื่อจัดการระบบ
- 5) *HPU_Status* อยู่ในกลุ่มของ System Status ใช้บอกว่าขณะนี้โปรแกรมอยู่ในสถานะทำงาน (Run) หรือพัก (Halt) การทำงานตรวจสอบบุคคลเพื่อเปิดประตู
- 6) *NecessaryFile_Ready* อยู่ในกลุ่มของ System Status ใช้บอกสถานะของโปรแกรมว่าแฟ้ม (File) ที่จำเป็นกับโปรแกรมนั้นมีอยู่และสามารถเข้าถึงได้ครบทุกตัวหรือไม่
- 7) *SecurityLevel* อยู่ในกลุ่มของ Program Status ใช้บอกค่าระดับความปลอดภัยของการตรวจสอบม่านตาและลายนิ้วมือ
- 8) *BioAccess_Mode* อยู่ในกลุ่มของ Program Status ใช้บอกวิธีการตรวจสอบว่าจะใช้ไบโอเมตริก ร่วมกับรหัสผ่านหรืออย่างใดอย่างหนึ่ง
- 9) *BioUsage_Mode* อยู่ในกลุ่มของ Program Status ใช้บอกวิธีการตรวจสอบไบโอเมตริกว่าใช้ม่านตาร่วมกับลายนิ้วมือหรืออย่างใดอย่างหนึ่ง

- 10) *FP_Mode* อยู่ในกลุ่มของ Program Status ใช้บอกวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมือว่าใช้หนึ่งนิ้วหรือสองนิ้ว
- 11) *FPSensor_Type* อยู่ในกลุ่มของ Program Status ใช้บอกชนิดของเครื่องอ่านลายนิ้วมือ
- 12) *Iris_Mode* อยู่ในกลุ่มของ Program Status ใช้บอกวิธีการตรวจสอบม่านตาว่าใช้ตาหนึ่งข้างหรือสองข้าง
- 13) *IrisSensor_Type* อยู่ในกลุ่มของ Program Status ใช้บอกชนิดของเครื่องอ่านม่านตา
- 14) *RAU* อยู่ในกลุ่มของ Controlled Device ใช้เก็บสถานะของ RAU ทั้งหมดที่ต่อเข้ากับโปรแกรม ซึ่งมีกลุ่มข้อมูลสถานะของ RAU ลักษณะเดียวกันกับของ HPU รองรับข้อมูลอยู่
- 15) *RAUSerialBaudrate* อยู่ในกลุ่มของ Controlled Device ใช้ระบุอัตราการความเร็วของการส่งข้อมูลผ่านพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรมของ RAU
- 16) *RAULANHostPort* อยู่ในกลุ่มของ Controlled Device ใช้ระบุหมายเลขพอร์ตการสื่อสารผ่าน LAN ระหว่างตัว HPU กับ RAU
- 17) *DLC_ConnectionReady* อยู่ในกลุ่มของ Controlled Device ใช้บอกว่าโปรแกรมเชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์ควบคุมการเปิดประตูได้หรือไม่
- 18) *DLC_ConnectionType* อยู่ในกลุ่มของ Controlled Device ใช้ระบุพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรมของการเชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์ควบคุมการเปิดประตู
- 19) *FPScanner_connected* อยู่ในกลุ่มของ Environment ใช้บอกว่าโปรแกรมมีการเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องอ่านลายนิ้วมือหรือไม่
- 20) *IrisScanner_connected* อยู่ในกลุ่มของ Environment ใช้บอกว่าโปรแกรมมีการเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องอ่านม่านตาหรือไม่
- 21) *DB_Connected_Ready* อยู่ในกลุ่มของ Environment ใช้บอกว่าโปรแกรมสามารถเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลได้หรือไม่
- 22) *Program_Path* อยู่ในกลุ่มของ Environment ใช้เก็บสารบบ (Directory) ที่อยู่ของโปรแกรม

สำหรับการตั้งค่าให้กับกลุ่มข้อมูลสถานะของโปรแกรม (System Status Record) เมื่อเริ่มต้นโปรแกรม จะมีการตรวจสอบเพิ่มสถานะต่าง ๆ ของทั้ง HPU และ RAU เพื่ออ่านข้อมูลเข้ามาตั้งค่าให้กับกลุ่มข้อมูลสถานะของโปรแกรม รวมทั้งข้อมูลสถานะของการเชื่อมต่อฐานข้อมูลและการ

เชื่อมต่อกับเครื่องอ่านอัตลักษณ์ไบโอเมตริกต่าง ๆ ดังแสดงขั้นตอนการทำงานเป็นแผนภาพในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 แผนภาพการตรวจสอบสถานะของโปรแกรมก่อนเริ่มใช้งาน

สำหรับเพิ่มเก็บสถานะของ HPU ใน SSFS1p3.stt จะมีการเก็บค่าต่าง ๆ ดังนี้

- *Security* มีค่า (1-7) แสดงค่าระดับความปลอดภัยในการตรวจสอบ
- *BioAccessMode* มีค่า (0-2 / Bio, PSW, Bio_PSW) แสดงรูปแบบการตรวจสอบ
- *BioUsageMode* มีค่า (0,1 / IrisorFP, IrisandFP) แสดงรูปแบบการใช้ไบโอเมตริก
- *Fingerprint Mode* มีค่า (0,1 / OnePrint, TwoPrint) แสดงวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมือ
- *FPSensor Type* มีค่า (0,1 / Optical, FPS200) แสดงชนิดของเครื่องอ่านลายนิ้วมือ
- *IrisMode* มีค่า (0,1 / OneSide, TwoSide) แสดงวิธีการตรวจสอบม่านตา

- *IrisSensor Type* มีค่า (0,1 / S-Video, Other) แสดงลักษณะของเครื่องอ่านม่านตา
- *Status* มีค่า (0,1 / Halt, Run) แสดงสถานะการขอผ่านเข้าระบบชั่วคราว
- *DLC Door Delay* มีค่า (1-9) แสดงระยะเวลาหน่วงการปิดประตูของ DLC
- *DLC Connection* มีค่า (Com1, Com2) แสดงพอร์ตการเชื่อมต่อของ DLC กับ HPU
- *RAUBaudrate* แสดงอัตราความเร็วของการส่งข้อมูลผ่านพอร์ตสื่อสาร

แบบอนุกรมของ RAU

- *RAUSocketPort* แสดงหมายเลขพอร์ตของ HPU ในการสื่อสารผ่าน LAN ระหว่างตัว HPU กับ RAU

ส่วนแฟ้มเก็บสถานะของ RAU ใน RLFS1p3.fsi จะมีการเก็บค่าเหมือนกับสถานะของ HPU แต่จะเพิ่มเติมในส่วนของ

- *RAU Name* แสดงชื่อของ RAU
- *RAU Address* แสดงเลขที่อยู่ (Address) ของ RAU
- *RAU Product Key* แสดงรหัสประจำเครื่องของ RAU
- *RAU ConnectionType* แสดงชนิดของพอร์ตการเชื่อมต่อระหว่าง RAU กับ HPU
- *RAU ConnectionAdr* แสดงหมายเลขพอร์ตการเชื่อมต่อระหว่าง RAU กับ HPU

นอกจากนี้ยังมีแฟ้มอื่น ๆ ที่จำเป็นภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโเมตริก ซึ่งประกอบด้วยตัวโปรแกรมระบบไบโเมตริก (.exe) และองค์ประกอบแฟ้มที่จำเป็นต่าง ๆ เช่น คลัง (Library) การตรวจสอบม่านตาและลายนิ้วมือ (.dll) แฟ้มเก็บสถานะ (.stt, .fsi) แฟ้มฐานข้อมูล (.db) โดยระบบแฟ้มของซอฟต์แวร์ระบบไบโเมตริกทั้งหมดได้แสดงไว้ในตารางที่ 10

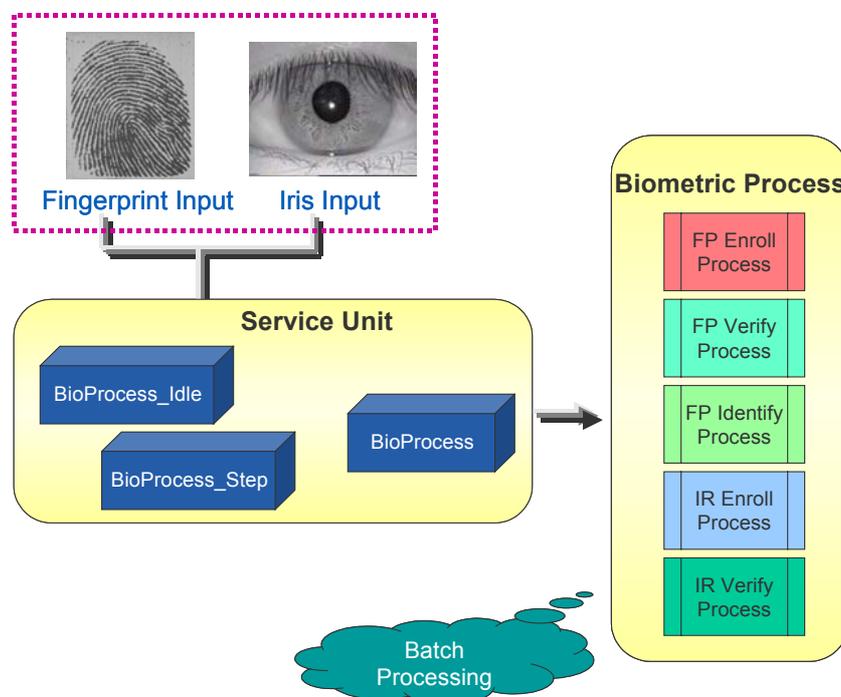
ตารางที่ 10 ระบบเพิ่มในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

ชื่อเพิ่ม	ความสำคัญ
...\BSSV2.exe	โปรแกรมระบบไบโอเมตริก
...\IVA.dll	คลังของขั้นตอนวิธีการตรวจสอบม่านตา
...\FVA.dll	คลังของขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมือ
...\RFC1p3.fsi	เพิ่มเก็บรหัสข้อมูลการลงทะเบียนโปรแกรม
...\Readme.txt	เพิ่มข้อความสำหรับซอฟต์แวร์
...\Resource\Data\AHFS1p2.db	ฐานข้อมูลรายงานบันทึกการเข้าออก
...\Resource\Data\PDFS1p2.db	ฐานข้อมูลบุคคลเก็บข้อมูลส่วนตัว
...\Resource\Data\SDFS1p3.db	ฐานข้อมูลบุคคลเก็บข้อมูลสถานะ
...\Resource\Data>Status\SSFS1p3.stt	เพิ่มเก็บสถานะของ HPU
...\Resource\Data>Status\RLFS1p3.fsi	เพิ่มเก็บสถานะของ RAU
...\Resource\Data\Template\ULIFS1p2.fdb	เพิ่มบัญชีรายชื่อของการค้นหาบุคคล
...\Resource\Data\IrisTemplate\PIN.ftp	ข้อมูลม่านตาของบุคคลที่อยู่ใน HPU
...\Resource\Data\FPTemplate\PIN.ftp	ข้อมูลลายนิ้วมือของบุคคลที่อยู่ใน HPU
...\Resource\Data\RAUTemplate\i\PIN.!rtb	ข้อมูลลายนิ้วมือของบุคคลที่อยู่ใน RAU ที่ i
...\Resource\Data\Communication\RPi.!dgb	บัฟเฟอร์รับข้อมูลของอุปกรณ์สื่อสารพอร์ตที่ i

3.2 มอดูลประมวลผลไบโอเมตริก (Biometric Process Module)

ในการตรวจสอบม่านตาและลายนิ้วมือ ซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกมีหน้าที่ในการบริหารจัดการการประมวลผลข้อมูลต่าง ๆ ที่มาจากผู้ใช้งาน ซึ่งผู้ใช้จะแสดงม่านตาหรือลายนิ้วมือที่เครื่องอ่านม่านตาหรือลายนิ้วมือ จากนั้นซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกจะนำภาพม่านตาหรือลายนิ้วมือเข้ามาเพื่อทำการตรวจสอบ ในกรณีที่ซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกพร้อมสำหรับการประมวลผลไบโอเมตริก ระบบจะนำภาพที่ได้รับเข้ามานั้นผ่านเข้าสู่กระบวนการประมวลผล แต่ถ้าซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกไม่มีความพร้อมในการประมวลผลไบโอเมตริก ระบบจะทิ้งภาพที่ได้รับเข้ามาและกลับไปอยู่สถานะเดิมก่อนการได้รับภาพ ซึ่งการจัดการเกี่ยวกับความพร้อมในการประมวลผลไบโอเมตริกนี้จะมีกลุ่มข้อมูลสถานะของการประมวลผลไบโอเมตริก (Biometric

Process Record) หรือ TBio_Process ทำหน้าที่ควบคุมการประมวลผลข้อมูลไบโอเมตริกให้เป็นไปตามขั้นตอนของการทำงานต่าง ๆ โดยมีฟิลด์ข้อมูลสถานะต่าง ๆ ตามภาพที่ 43 ดังนี้



ภาพที่ 43 กลุ่มข้อมูลสถานะของการประมวลผลไบโอเมตริก

- 1) *BioProcess_Idle* ใช้บอกสภาวะความพร้อมของการทำงานของกระบวนการประมวลผลไบโอเมตริก
- 2) *BioProcess* ใช้บอกชนิดของงานที่ต้องการใช้ภาพที่ได้รับเข้ามาในขณะนี้ว่าเป็นการลงทะเบียนของม่านตา (IrisEnroll) การลงทะเบียนของลายนิ้วมือ (FPEnroll) การตรวจสอบบุคคลด้วยลายนิ้วมือ (FPVerify) การระบุตัวบุคคลด้วยม่านตา (IrisIdentify) หรือการระบุตัวบุคคลด้วยลายนิ้วมือ (FPIIdentify)
- 3) *BioProcess_Step* ใช้บอกลำดับขั้นการทำงานของกระบวนการประมวลผลไบโอเมตริก

โดยการทำงานของกลุ่มข้อมูลสถานะการประมวลผลไบโอเมตริก จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปตามลำดับขั้นของงานแต่ละงานที่ใช้ข้อมูลไบโอเมตริก ตัวอย่างเช่น การเปรียบเทียบบุคคล (Verification, BioProcess = FPVerify) และการค้นหาบุคคล (Identification, BioProcess =

IrisIdentify or FPIIdentify) จะมีการทำงานเพียงลำดับขั้นเดียวด้วยการนำภาพที่ผ่านการประเมิน พร้อมทั้งพารามิเตอร์ ไปทำการเรียกฟังก์ชันของการตรวจสอบ เมื่อมีการตรวจสอบเสร็จแล้วกลุ่มข้อมูลสถานะจะกลับสู่สถานะปกติ (BioProcess_Idle = True) และจะแจ้งผลการเปรียบเทียบหรือค้นหาบุคคลให้ทราบ แต่สำหรับการลงทะเบียนม่านตาหรือลายนิ้วมือ (Enrollment, BioProcess = IrisEnroll or FPEnroll) เพื่อสร้างข้อมูลม่านตาหรือข้อมูลลายนิ้วมือ หรือที่เรียกว่าเทมเพลตม่านตาหรือเทมเพลตลายนิ้วมือ เก็บในฐานข้อมูลนั้นจะมีลำดับขั้นเริ่มตั้งแต่ 1 จนถึง 9 ดังนี้

- 1) เรียกกระบวนการเพื่อแสดงผลเรียกม่านตาหรือลายนิ้วมือสำหรับลงทะเบียนครั้งที่ 1
- 2) เรียกกระบวนการพร้อมภาพลายนิ้วมือหรือสำหรับสร้างข้อมูลเทมเพลตครั้งที่ 1
- 3) เรียกกระบวนการเพื่อแสดงผลเรียกม่านตาหรือลายนิ้วมือสำหรับลงทะเบียนครั้งที่ 2
- 4) เรียกกระบวนการพร้อมภาพลายนิ้วมือหรือสำหรับสร้างข้อมูลเทมเพลตครั้งที่ 2
- 5) เรียกกระบวนการเพื่อแสดงผลเรียกม่านตาหรือลายนิ้วมือสำหรับลงทะเบียนครั้งที่ 3
- 6) เรียกกระบวนการพร้อมภาพลายนิ้วมือหรือสำหรับสร้างข้อมูลเทมเพลตครั้งที่ 3
- 7) เรียกกระบวนการเพื่อสร้างตัวแทนของข้อมูลเทมเพลตจากข้อมูลเทมเพลตทั้งสาม
- 8) เรียกกระบวนการเพื่อขอแสดงผลเรียกม่านตาหรือลายนิ้วมือสำหรับทดสอบใช้งาน (ครั้งที่ 4)
- 9) เรียกกระบวนการพร้อมภาพม่านตาหรือลายนิ้วมือสำหรับทดสอบ ถ้า “ผ่าน” จะเก็บข้อมูลเทมเพลตก่อนหน้าในฐานข้อมูลม่านตาหรือลายนิ้วมือและแสดงผลเสร็จสิ้นการลงทะเบียน พร้อมทั้งสถานะของกลุ่มข้อมูลสถานะจะกลับสู่สถานะปกติ (BioProcess_Idle = True) ถ้า “ไม่ผ่าน” จะลบข้อมูลเทมเพลตก่อนหน้าทิ้ง และกลับสู่ลำดับขั้นที่ 1

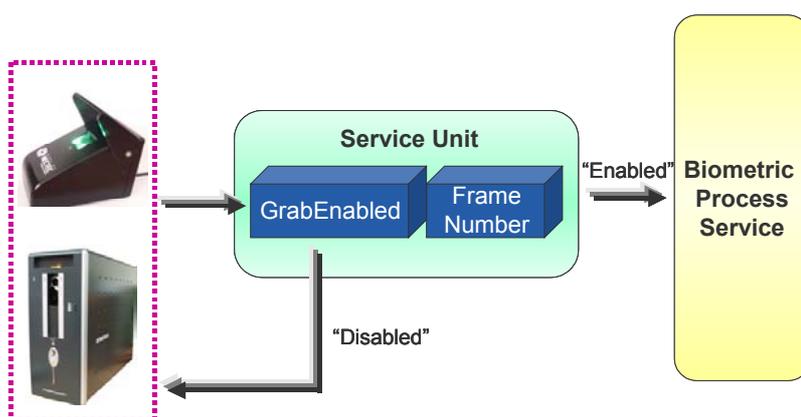
สำหรับในส่วนกระบวนการประมวลผลภาพม่านตาหรือลายนิ้วมือของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกจะมีการเรียกใช้ฟังก์ชันของการตรวจสอบม่านตาหรือลายนิ้วมือ มาจากโปรแกรมอรรถประโยชน์หรือคลังภายนอกชนิด Dynamic Link Library (DLL) ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้นตอนวิธีในการประมวลผลภาพม่านตาและลายนิ้วมือ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบวิธีการประมวลผลไบโอเมตริกลักษณะนี้ ในส่วนของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกจะมีความเป็นอิสระต่อการเปลี่ยนแปลงวิธีการประมวลผลภาพม่านตาหรือลายนิ้วมือ ทำให้การพัฒนาหรือปรับปรุงประสิทธิภาพขั้นตอนวิธีเกิดความสะดวกและทำได้ง่ายโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานโปรแกรมของซอฟต์แวร์ระบบ

3.3 มอดุลจัดการการเชื่อมต่อเครื่องอ่านอัตลักษณ์ไบโอเมตริก (Biometric Sensor Interface Module)

ในการเชื่อมต่อเครื่องอ่านอัตลักษณ์ไบโอเมตริกเข้ากับคอมพิวเตอร์ เพื่อการอ่านอัตลักษณ์ไบโอเมตริกของผู้ใช้งานเข้ามาประมวลผลภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกจะมีรูปแบบของการติดต่อเพื่อรับข้อมูลภาพอยู่สองรูปแบบคือ (1) การรับภาพผ่านไดรเวอร์ของกล้องวิดีโอทัศน์ และ (2) การรับภาพโดยตรงจากพอร์ต USB ในแบบ Human Interface Device (HID) ซึ่งรายละเอียดของการติดต่อเครื่องอ่านแต่ละรูปแบบจะกล่าวในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

3.3.1 การรับภาพผ่านไดรเวอร์ของกล้องวิดีโอทัศน์

เครื่องอ่านอัตลักษณ์ไบโอเมตริกที่ใช้กล้องวิดีโอทัศน์เป็นตัวรับภาพ เช่น เครื่องอ่านม่านตา และเครื่องอ่านลายนิ้วมือเชิงแสง สามารถที่จะทำการเชื่อมต่อเข้ากับซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกได้โดยผ่านไดรเวอร์ของกล้องที่มีมาให้คู่กันกับกล้องวิดีโอทัศน์ที่อยู่ในเครื่องอ่านอัตลักษณ์ไบโอเมตริก ซึ่งข้อมูลภาพที่จะได้รับนั้นมีลักษณะเป็นแบบลำดับภาพต่อเนื่อง (Sequential Input Image) ทำให้การดำเนินการเพื่อนำภาพไปทำการประมวลผลเป็นแบบวนรอบ กล่าวคือ หลังจากการประมวลผลกับภาพที่รับเข้ามาเสร็จแล้ว ระบบจะต้องพร้อมไปรับภาพใหม่เข้ามาทำการประมวลผลแบบต่อเนื่องได้ทันที ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบระบบให้มีกลุ่มข้อมูลสถานะของการจัดการรับลำดับภาพต่อเนื่อง (Video Stream Record) หรือ TVideoStreamControl เพื่อเป็นตัวควบคุมการรับภาพที่เป็นลำดับภาพต่อเนื่อง ซึ่งมีฟิลด์ข้อมูลสถานะต่าง ๆ ตามภาพที่ 44 ดังนี้

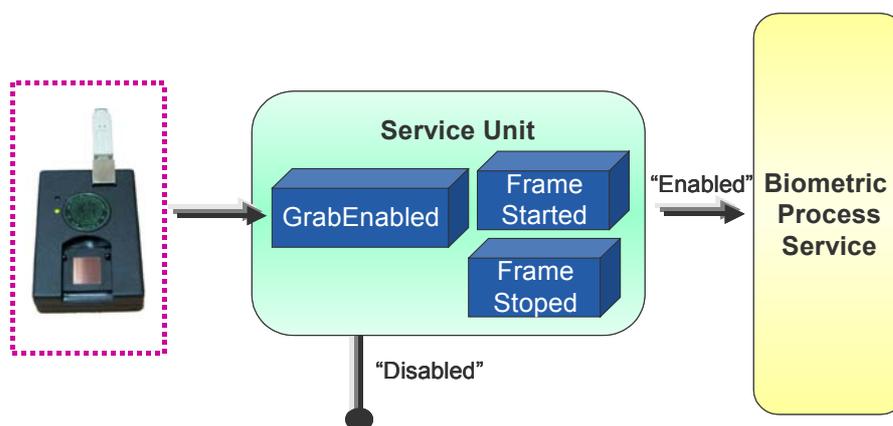


ภาพที่ 44 กลุ่มข้อมูลสถานะของการจัดการรับลำดับภาพต่อเนื่อง

- 1) *GrabEnabled* ใช้บอกสถานะการยินยอมให้รับภาพเข้าสู่โปรแกรม
- 2) *FrameNumber* ใช้บอกจำนวนภาพต่อเนื่องที่ได้รับเข้ามา

3.3.2 การรับภาพโดยตรงจากพอร์ต USB ในแบบ Human Interface Device (HID)

สำหรับเครื่องอ่านอัตลักษณ์ไบโอเมตริกที่มีการออกแบบให้มีการส่งข้อมูลภาพมายังคอมพิวเตอร์ในรูปแบบเฉพาะผ่านทางพอร์ตสื่อสารต่าง ๆ เช่น พอร์ตอนุกรม พอร์ตขนาน หรือพอร์ต USB ซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกจำเป็นต้องรับรู้ถึงข้อตกลงในรูปแบบเฉพาะของการส่งข้อมูลดังกล่าวนี้ด้วยเพื่อที่จะสามารถจัดเรียงข้อมูลที่รับเข้ามาทางพอร์ตสื่อสารไปเป็นภาพไว้ใช้ในการประมวลผลต่อไปได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งในที่นี้การเชื่อมต่อกับเครื่องอ่านอัตลักษณ์ไบโอเมตริกเพื่อรับภาพโดยตรงจะมีเพียงรูปแบบเดียวเท่านั้นคือ การเชื่อมต่อกับเครื่องอ่านลายนิ้วมือเชิงตัวเก็บประจุต้นแบบของห้องปฏิบัติการประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์ โดยซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกจะมีการติดต่อกับเครื่องอ่านลายนิ้วมือเชิงตัวเก็บประจุนี้ในแบบ Human Interface Device ผ่านทางพอร์ต USB ซึ่งการรับข้อมูลภาพจะมีลักษณะเป็นแบบขัดจังหวะ (Interrupt Input Image) ตามการร้องขอให้รับข้อมูลภาพที่มาจากเครื่องอ่านลายนิ้วมือเชิงตัวเก็บประจุ โดยการร้องขอจะเกิดขึ้นตามเหตุการณ์ที่ผู้ใช้เข้ามาใช้งานเครื่องอ่านลายนิ้วมือ แตกต่างกับการส่งข้อมูลภาพจากกล้องวิทัศน์ที่เป็นลำดับภาพต่อเนื่อง ซึ่งการจัดการเกี่ยวกับการรับภาพที่เป็นรูปแบบเฉพาะนี้จะมีกลุ่มข้อมูลสถานะของการจัดการรับภาพแบบขัดจังหวะ (Interrupt Single Image Record) หรือ THIDStreamControl เป็นตัวควบคุม ซึ่งมีฟิลด์ข้อมูลสถานะต่าง ๆ ตามภาพที่ 45 ดังนี้

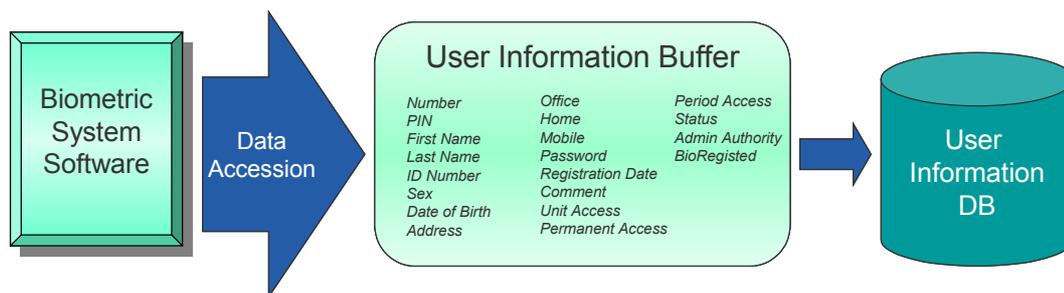


ภาพที่ 45 กลุ่มข้อมูลสถานะของการจัดการรับภาพแบบขัดจังหวะ

- 1) *GrabEnabled* ใช้บอกสถานะการยินยอมให้รับภาพเข้าสู่โปรแกรม
- 2) *FrameStarted* ใช้บอกสถานะเริ่มต้นของขั้นตอนการรับภาพ
- 3) *FramStoped* ใช้บอกสถานะสิ้นสุดของขั้นตอนการรับภาพ

3.4 มอdulจัดการฐานข้อมูล (Database Management Module)

ในการเข้าถึงระบบฐานข้อมูลของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกจะมีการใช้กลุ่มข้อมูลชุดหนึ่งที่เป็นตัวกลางในการนำข้อมูลเข้าและออกจากฟิลด์ข้อมูลทุกฟิลด์ของฐานข้อมูล เพื่อให้การบันทึกหรือการอ่านข้อมูลสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ในทุกฟิลด์และยังเป็นการป้องกันการเข้าถึงงานตัวฐานข้อมูลจากที่ต่าง ๆ ของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกพร้อมกัน โดยการออกแบบกลุ่มข้อมูลที่เป็นตัวกลางในการเข้าถึงฐานข้อมูลส่วนบุคคลนี้จะจัดแบ่งออกเป็นสองกลุ่มตามลักษณะการใช้งานคือ กลุ่มข้อมูลผู้ใช้ จะใช้ในการอ่านหรือแก้ไขข้อมูลส่วนตัวต่าง ๆ ของบุคคล และกลุ่มข้อมูลบันทึกการเข้าออก จะใช้สำหรับบันทึกข้อมูลการผ่านเข้าออกประตู โดยในส่วนของกลุ่มข้อมูลบันทึกการเข้าออกนี้จะมีการใช้งานที่ค่อนข้างบ่อยครั้งกว่ากลุ่มข้อมูลผู้ใช้ ซึ่งกลุ่มข้อมูลผู้ใช้ (User Profile Record) หรือ TUserProfile มีฟิลด์ข้อมูลต่าง ๆ ตามภาพที่ 46 ดังนี้

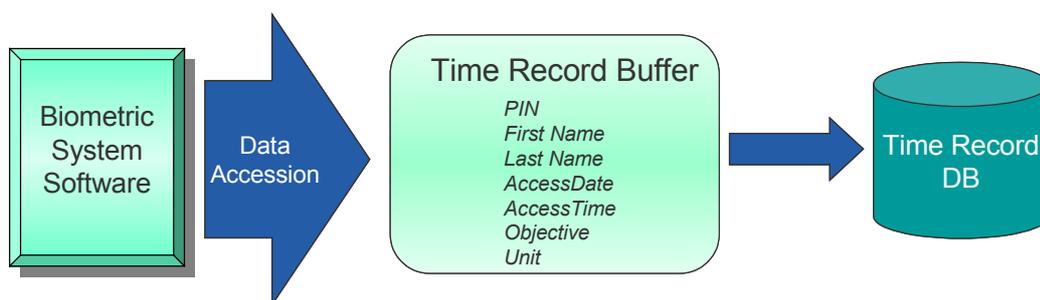


ภาพที่ 46 กลุ่มข้อมูลผู้ใช้สำหรับการเข้าถึงข้อมูลในฐานข้อมูลส่วนบุคคล

- 1) *Number* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นลำดับบุคคลในฐานข้อมูล
- 2) *PIN* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นหมายเลข PIN ใช้ในการเข้าถึงระบบแบบ Fingerprint Verification Mode
- 3) *First Name* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นชื่อจริง
- 4) *Last Name* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นนามสกุล
- 5) *ID Number* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นรหัสประจำตัว
- 6) *Sex* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation ระบุเพศของผู้ใช้งาน
- 7) *Date of Birth* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นวันเดือนปีเกิด
- 8) *Address* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นที่อยู่ของผู้ใช้งาน
- 9) *Office* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นเบอร์โทรศัพท์ที่ทำงาน

- 10) *Home* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นเบอร์โทรศัพท์ที่บ้าน
- 11) *Mobile* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นเบอร์โทรศัพท์มือถือ
- 12) *Password* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นรหัสเพื่อใช้ในการเข้าระบบครั้งแรก หรือในกรณีที่ระบบมีปัญหา
- 13) *Registration Date* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นวันที่ลงทะเบียนเข้าใช้งานระบบ/วันที่เริ่มต้นนับการใช้งานของการใช้งานระบบแบบชั่วคราว
- 14) *Comment* อยู่ในกลุ่มของ UserInformation เป็นส่วนอธิบายเพิ่มเติม
- 15) *Unit Access* อยู่ในกลุ่มของ UserStatus เป็นความยินยอมให้ใช้งานระบบ
- 16) *Permanent Access* อยู่ในกลุ่มของ UserStatus เป็นความยินยอมให้ใช้งานแบบถาวร
- 17) *Period Access* อยู่ในกลุ่มของ UserStatus เป็นจำนวนวันที่สามารถใช้งานแบบชั่วคราว
- 18) *Status* อยู่ในกลุ่มของ UserStatus เป็นสถานะของผู้ใช้งาน
- 19) *Admin Authority* อยู่ในกลุ่มของ UserStatus เป็นระดับความสามารถในการจัดการระบบของผู้ดูแลระบบ
- 20) *BioRegistered* เป็นสถานะของการลงทะเบียนไบโอเมตริกภายในตัว HPU

สำหรับกลุ่มข้อมูลบันทึกการเข้าออก (History Record) หรือ THistory มีฟิลด์ข้อมูลต่าง ๆ ตามภาพที่ 47 ดังนี้



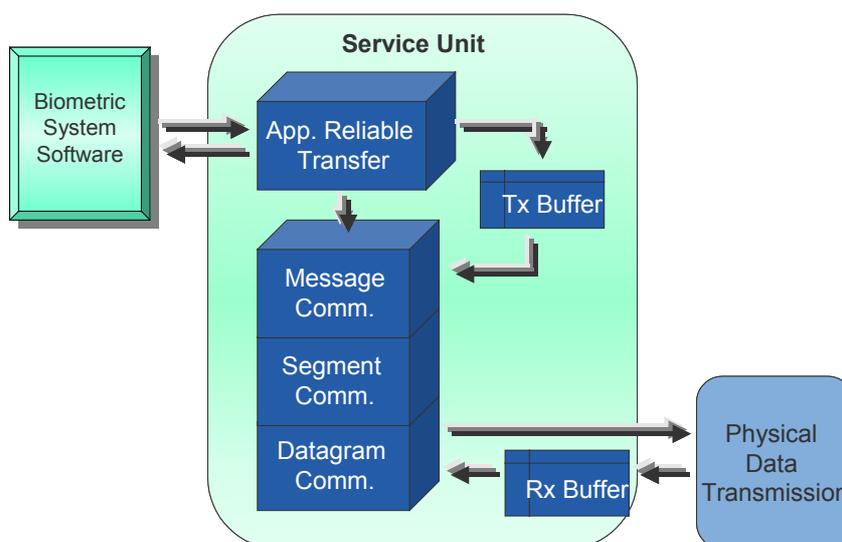
ภาพที่ 47 กลุ่มข้อมูลบันทึกการเข้าออกสำหรับการเข้าถึงข้อมูลในฐานข้อมูลส่วนบุคคล

- 1) *PIN* เป็นหมายเลข PIN
- 2) *First Name* เป็นชื่อจริง

- 3) *Last Name* เป็นนามสกุล
- 4) *AccessDate* เป็นวันที่เข้ามาใช้งานระบบ
- 5) *AccessTime* เป็นเวลาที่เข้ามาใช้งานระบบ
- 6) *Objective* เป็นประเภทของการผ่านเข้าระบบ
- 7) *Unit* เป็นระบบที่เข้าใช้งาน

3.5 มอดูลจัดการการใช้งานอุปกรณ์สื่อสาร (Communication Management Module)

ซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกกำหนดการติดต่อสื่อสารกับ RAU ผ่านทางพอร์ตอนุกรมและพอร์ต LAN ส่วน DLC (Door Lock Control) จะสื่อสารผ่านทางพอร์ตอนุกรมไปยังเครื่องส่งอินฟราเรด ซึ่งวิธีการติดต่อสื่อสารระหว่างฮาร์ดแวร์จะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4 ในชื่อเรื่องวิธีการเขียนโปรแกรมของการสื่อสารในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก ซึ่งในส่วนการใช้งานของมอดูลจัดการการใช้งานอุปกรณ์สื่อสารนี้จะสนใจเฉพาะการติดต่อสื่อสารระดับบนที่มีการรับส่งข้อความระหว่างโปรแกรมประยุกต์จากคู่ฮาร์ดแวร์สองตัว (HPU กับ RAU หรือ HPU กับ DLC) เท่านั้นและไม่สนใจถึงขั้นตอนการส่งข้อมูลแต่อย่างใด ดังนั้นการออกแบบโปรแกรมในส่วนของการติดต่อสื่อสารจึงมีลักษณะเป็นชั้น (Class) ที่มีการเรียกใช้การทำงานได้โดยไม่จำเป็นต้องรู้การทำงานย่อยภายในหรือลักษณะของการส่งข้อมูล ชั้นสำหรับใช้ติดต่อสื่อสารกับฮาร์ดแวร์ทั้งระบบนี้เรียกว่า ชั้นการติดต่อสื่อสาร (Communication Class) หรือ TSystem_Comm ซึ่งมีชุดข้อมูลและบัฟเฟอร์รับข้อมูล รวมทั้งการทำงานของมอดูลสื่อสารตามภาพที่ 48 ดังนี้



ภาพที่ 48 ชั้นการติดต่อสื่อสาร

- 1) *Application_ReliableTransfer* เป็นหน่วยรับประกันการสื่อสารก่อนการส่งข้อมูล
สื่อสารออกทางพอร์ตสื่อสาร ด้วยการตรวจสอบการตอบรับ
(Acknowledge) จาก RAU และมีการส่งซ้ำ (Re-Transmission)
เมื่อหมดเวลา (Timeout)
- 2) *MessageComm* เป็นการทำงานส่งข้อมูลสื่อสารออกทางพอร์ตสื่อสาร
- 3) *SegmentComm* เป็นการทำงานของตัวประกอบย่อยภายในการส่งข้อมูล ซึ่งจะ
เป็นการประกอบข้อความในระดับชั้น Transport เพื่อส่งข้อมูล
ในระดับใหญ่เกินกว่า *DatagramComm* จะสามารถจัดการส่งข้อ
ความทั้งหมดให้ได้ โดยในชั้นนี้จะมีการตัดแบ่งข้อมูลและใส่
ส่วนหัว (Header) เพื่อบอกลำดับที่ของข้อมูลที่ถูกตัดแบ่ง
(Segment Packet) ด้วย
- 4) *DatagramComm* เป็นการทำงานของตัวประกอบย่อยภายในการส่งข้อมูล ซึ่งจะ
เป็นการประกอบข้อความในระดับชั้น Network มีส่วนหัว
(Header) เพื่อบอก เลขที่อยู่ คำสั่ง และความยาวข้อความ อีกทั้ง
ยังมีส่วนท้าย (Tailor) เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดของข้อความ
ด้วยการตรวจสอบค่าผิดพลาดรวม (Check Sum Error)
- 5) *RxBuffer* เป็นบัฟเฟอร์สำหรับการรับข้อมูลจากพอร์ตสื่อสารที่เข้ามาติด
ต่อกับตัวโปรแกรม โดยบัฟเฟอร์นี้จะเป็นบัฟเฟอร์ตัวกลาง
(RxMessage Pool) ที่พอร์ตสื่อสารทั้งหมดจะนำข้อมูลมาใส่เพื่อ
ให้โปรแกรมประมวลผล
- 6) *TxBufferr* เป็นบัฟเฟอร์สำหรับการส่งข้อมูลแบบรับประกัน ซึ่งจะไว้ใช้
สำหรับการส่งซ้ำ โดยบัฟเฟอร์จะถูกจองขึ้นมาสำหรับแต่ละ
RAU และจะถูกลบเมื่อได้รับ Acknowledge หรือเมื่อไม่สามารถ
ส่งข้อมูลออกไปได้จริง ๆ

สำหรับกระบวนการติดต่อสื่อสารระหว่าง HPU กับ RAU มีการสร้างชั้นเพิ่มเติมขึ้น
จากชั้นการติดต่อสื่อสาร (TSystem_Comm) เพื่อรองรับการทำงานของการติดต่อสื่อสารกับ RAU
เป็นชั้นการติดต่อสื่อสารกับ RAU (TRAU_System) ซึ่งมีชุดข้อมูลและการทำงานดังนี้

- 1) *RAU_Comm* เป็นเครื่องมือที่ HPU จะติดต่อกับ RAU โดยผ่านโปรโตคอลของระบบไบโอเมตริกที่ออกแบบใน TSystem_Comm
- 2) *RAUStatus* เป็นบัพเฟอร์สำหรับเก็บสถานะคำสั่งต่าง ๆ ที่ได้สื่อสารและเลขที่อยู่ของ RAU เพื่อระบบจะได้ติดตามการตอบรับจาก RAU ได้กรณีที่เป็นการส่งแบบมีการรับประกัน

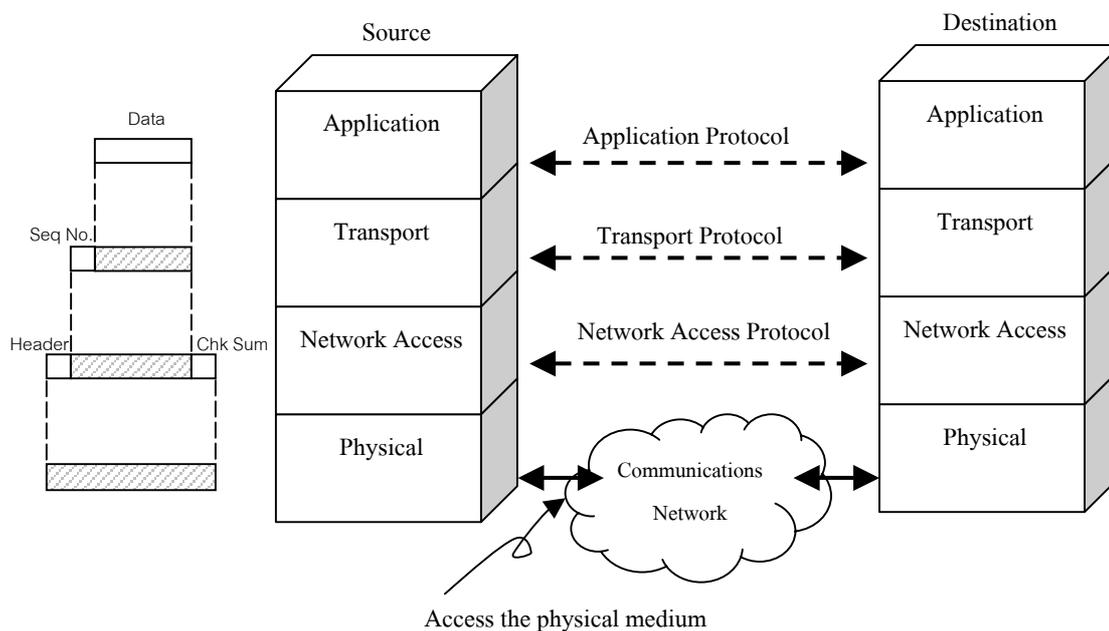
สำหรับกระบวนการติดต่อสื่อสารระหว่าง HPU กับ DLC มีการสร้างชั้นเพิ่มเติมขึ้นจากชั้นการติดต่อสื่อสาร (TSystem_Comm) เพื่อรองรับการทำงานของ การติดต่อสื่อสารกับ DLC เป็นชั้นการติดต่อสื่อสารกับ DLC (TDLC_System) ซึ่งมีชุดข้อมูลและการทำงานดังนี้

- 1) *DLC_Comm* เป็นเครื่องมือที่ HPU จะติดต่อกับ DLC โดยผ่านโปรโตคอลของการสื่อสารในระบบไบโอเมตริกที่ออกแบบใน TSystem_Comm
- 2) *DLC_PNCode* เป็นการทำงานของ การเข้ารหัสโดยใช้ PNCode (Haykin, 2001) ที่จะต้องมีการติดต่อกับตัว DLC เพื่อให้มีการกำหนดค่าเริ่มต้นแบบสุ่มที่ใช้สำหรับเข้ารหัส จากนั้นจะเป็นการเข้ารหัสลำดับตามตัวเริ่มต้นที่ได้มีการกำหนด
- 3) *Period* บอกถึงระยะเวลาที่จะให้ประตูหน้าต่างเวลาในการปิด ซึ่งผู้ใช้สามารถที่จะตั้งค่าได้

4. วิธีการเขียนโปรแกรมของการสื่อสารในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

4.1 โพรโทคอลของการสื่อสารในระบบไบโอเมตริก

การติดต่อสื่อสารภายในระบบไบโอเมตริกได้แบ่งการรับส่งข้อมูลออกเป็นระดับชั้นประกอบด้วย ระดับชั้น Application เป็นการส่งข้อความ (Message) โดยไม่ได้พิจารณาถึงรูปแบบของข้อมูลที่รับส่ง ระดับชั้น Transport เป็นการแบ่งข้อความจากระดับชั้น Application เมื่อข้อความมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถใช้งานการส่งข้อมูลด้วยโพรโทคอลของระดับชั้น Network Access ได้ ระดับชั้น Network Access เป็นการส่งข้อมูลไปยังปลายทางซึ่งในระดับชั้นนี้ข้อความที่ส่งจะถูกกำหนดเลขที่อยู่ฮาร์ดแวร์ เพื่อให้ไปถึงปลายทางได้ และระดับชั้น Physical จะเป็นระดับชั้นที่ติดต่อกับพอร์ตสื่อสารโดยตรงและต้องทำการจัดรูปแบบของข้อมูลให้ตรงกับรูปแบบของตัวกลาง (Media) เช่น รูปแบบของ RS-232 เป็นต้น โครงสร้างของการติดต่อสื่อสารนี้ได้แสดงในภาพที่ 49 และแสดงตัวอย่างข้อความที่ถูกแบ่งย่อยในแต่ละระดับชั้นดังตารางที่ 11



ภาพที่ 49 โครงสร้างการติดต่อสื่อสารของระบบไบโอเมตริก

ตารางที่ 11 ข้อมูลในระดับชั้นต่าง ๆ ของโครงสร้างการติดต่อสื่อสารของระบบไบโอเมตริก

Protocol Data	Stack	Data
Units		
Message	Application	Message: Data 10 KBytes
Segment	Transport	Segment: Seq.No. + Data 255 bytes
Datagram	Network	Datagram: Addr+Command+Segment
1-PDU	Physical	1-PDU: start bit+Datagram 8 bits+parity bit+stop bit

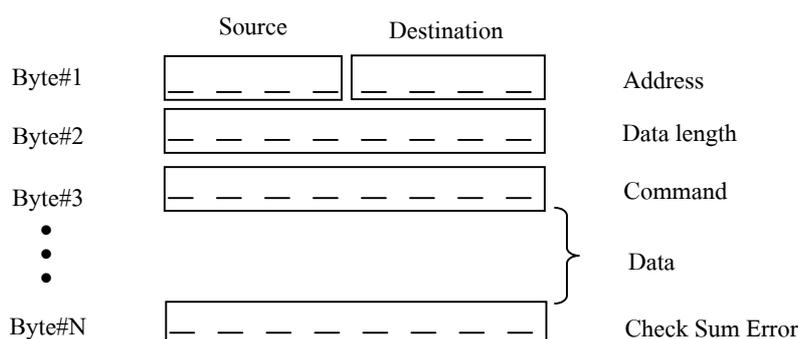
รูปแบบข้อมูลภายในระดับชั้นต่าง ๆ ของการติดต่อสื่อสารนั้นจะมีรูปแบบที่ต่างกันตามจุดประสงค์ของการรับส่งข้อมูลในแต่ละระดับชั้น สำหรับระดับชั้น Transport รูปแบบของข้อมูลจากระดับชั้น Application เป็นข้อความที่ส่งผ่านลงมาจะถูกจำกัดความยาวของข้อความนั้นไม่เกิน 252 ไบต์และเพิ่มหัวข้อความ (Header) เข้าไป 3 ไบต์ประกอบด้วย หมายเลขลำดับ (Sequence Number) หมายเลขกำกับข้อความ (Identifier) และจำนวนลำดับที่ถูกแบ่งทั้งหมด (#Sequence) ดังนั้นข้อมูลในระดับชั้นนี้จึงมีความยาวไม่เกิน 255 ไบต์เพื่อที่จะใช้โปรโตคอลในระดับชั้นถัดไปส่งข้อมูลผ่านไปยังเครือข่ายได้ ซึ่งรูปแบบของข้อความในระดับชั้น Transport แสดงในภาพที่ 50

	Sequence Number	Identifier	#Sequence	Data
Segment #1	00000000	00110101	N	Data [252] bytes
Segment #2	00000001	00110101	N	Data [252] bytes
	⋮			
Segment #N	Message (div) 256	00110101	N	Data [Message (mod) 252] bytes

ภาพที่ 50 รูปแบบข้อมูลการติดต่อสื่อสารในระดับชั้น Transport

ในระดับชั้น Network Access ความยาวของข้อมูลที่ส่งต้องถูกจำกัดความยาวไว้ไม่เกิน 255 ไบต์เนื่องจากมีการบอกความยาวของข้อมูล (Data Length) ไว้ในส่วนหัวข้อความ

(Header) ด้วยค่า 1 ไบต์เพื่อรอรับข้อความให้ครบตามจำนวนได้ที่ปลายทาง และมีการกำหนดเลขที่อยู่ (Address) ให้กับข้อความด้วยค่า 1 ไบต์สำหรับใช้ส่งผ่านข้อมูลไปยังปลายทางและบอกที่อยู่ของต้นทาง รวมทั้งยังมีการส่งคำสั่ง (Command) ของข้อความที่มีความยาว 1 ไบต์ผ่านไปยังปลายทางด้วยเพื่อให้สามารถส่งผ่านไปยังกระบวนการ (Process) ที่เรียกใช้การติดต่อสื่อสารได้ถูกต้อง นอกจากนี้ยังมีการป้องกันความผิดพลาดของข้อมูลระหว่างรับส่งด้วยการตรวจค่าผิดพลาดรวม (Check Sum Error) ในส่วนท้ายของข้อความ (Tailor) ดังแสดงในภาพที่ 51



ภาพที่ 51 รูปแบบข้อมูลการติดต่อสื่อสารในระดับชั้น Network Access

จากการกำหนดเลขที่อยู่ของต้นทางกับปลายทางด้วยข้อมูล 1 ไบต์ทำให้ระบบไบโอมेटริกสามารถมีจำนวน RAU ได้มากที่สุดเพียง 15 หน่วยเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 12 ซึ่งเลขที่อยู่ 0000 เป็นของ HPU และเป็นดิฟเฟอลต์เลขที่อยู่ของ RAU ในการติดตั้ง RAU เข้าระบบสำหรับ DLC กำหนดเลขที่อยู่เป็น 0010 เพื่อให้ HPU หรือ RAU ติดต่อควบคุมการเปิดประตูภายในตัวเองผ่านทางอินฟาเรด

ตารางที่ 12 การกำหนดเลขที่อยู่ในรูปแบบข้อมูลการติดต่อสื่อสารในชั้น Network ให้ HPU และ RAU

Unit	Address
HPU	0000
RAU#1	0001
RAU#2	0010
:	:
RAU#15	1111

ระดับชั้น Physical เป็นระดับชั้นที่มีการส่งผ่านข้อมูลจริงและรูปแบบของข้อมูลขึ้นอยู่กับตัวกลาง (Medium) ที่เลือกใช้ ในที่นี้ซอฟต์แวร์ระบบไบโอมेटริกสามารถทำการติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมด้วยโพรโทคอล RS-232 กับ RAU และ DLC โดยมีรูปแบบการส่งข้อมูล 1 ไบต์ในระดับบิตเป็นบิตเริ่มต้น (Start Bit) ตามด้วยบิตข้อมูล 8 บิต (Data Bit) บิตตรวจสอบภาวะคู่หรือคี่ (Parity-Check Bit) และสุดท้ายเป็นบิตหยุด (Stop Bit) นอกจากนี้พารามิเตอร์ของการรับส่งผ่านพอร์ตอนุกรมด้วยโพรโทคอล RS-232 ของ RAU และ DLC ได้ถูกกำหนดดังตารางที่ 13

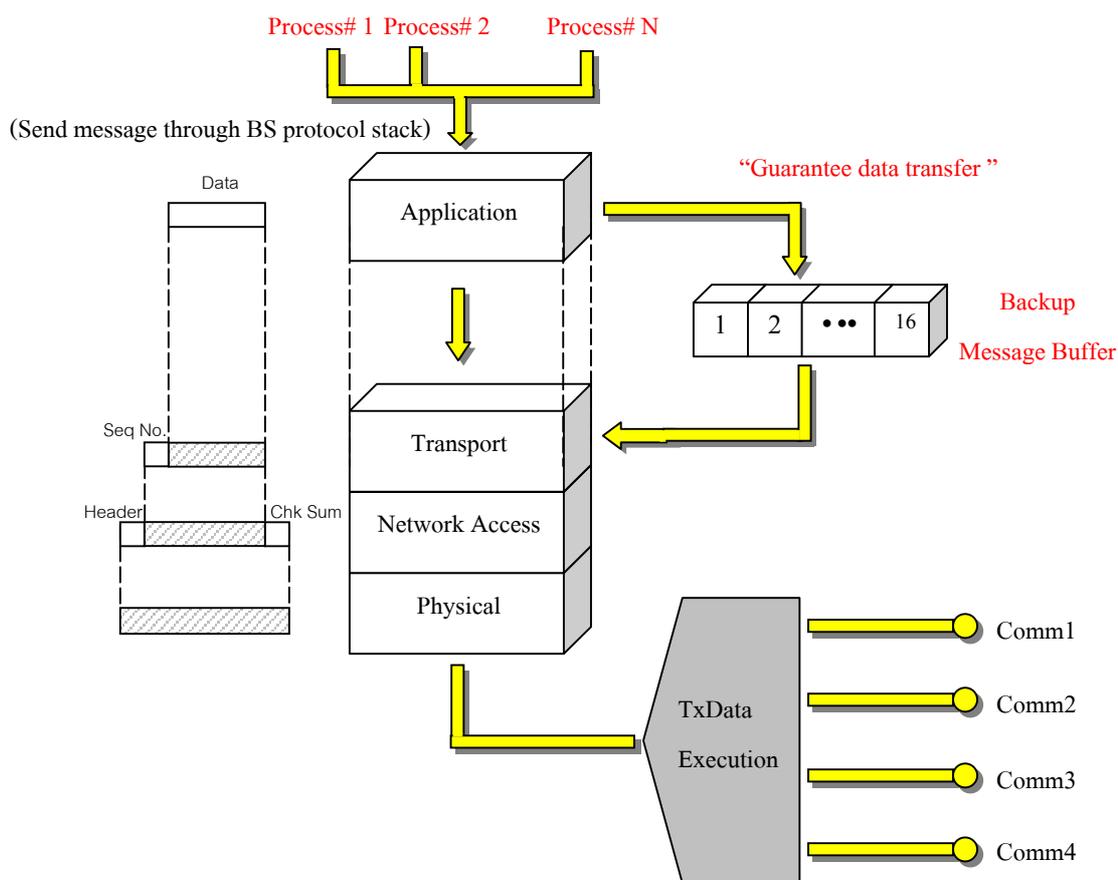
ตารางที่ 13 ค่าพารามิเตอร์ของการติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมด้วยโพรโทคอล RS-232 ของ RAU และ DLC กับตัว HPU

พารามิเตอร์ของโพรโทคอล RS-232	RAU	DLC
ความเร็วการรับ-ส่งข้อมูล (Baud Rates)	9600 bps	2400 bps
บิตเริ่มต้น (Start Bit)	ไม่มี	ไม่มี
บิตตรวจสอบ (Parity Bit)	ไม่มี	ไม่มี
บิตสิ้นสุด (Stop Bit)	ใช้ขนาด 1 บิต	ใช้ขนาด 1 บิต

นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ระบบไบโอมेटริกยังมีการติดต่อสื่อสารในรูปแบบพอร์ตสื่อสาร LAN ด้วยโพรโทคอล TCP/IP กับ RAU ซึ่งการรับส่งข้อมูลมีความเร็วที่ 10/100 Mbps ในที่นี้ได้กำหนดการเข้าติดต่อสื่อสารด้วยโพรโทคอล TCP/IP ผ่านหมายเลขพอร์ต (Socket Port) 5029 สำหรับตัว HPU และหมายเลขพอร์ต 1234 สำหรับตัว RAU

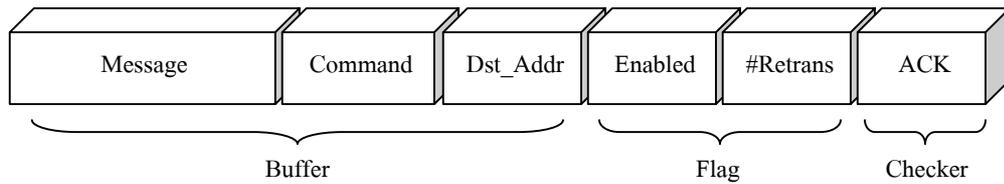
4.2 การรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ตสื่อสารของ HPU

การรับส่งข้อมูลของ HPU ต้องรองรับการติดต่อสื่อสารที่เกิดขึ้นจาก RAU หลายตัวในระบบได้ ดังนั้นโครงสร้างสำหรับการสื่อสารที่ใช้พอร์ตอนุกรมเป็นสื่อในระบบไบโอมेटริกในลักษณะการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point) จึงต้องมีการออกแบบการรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมของ HPU ให้สามารถใช้งานติดต่อสื่อสารร่วมกันได้กับพอร์ตสื่อสาร LAN ซึ่งการส่งข้อมูลจากกระบวนการต่าง ๆ จะผ่านระดับชั้นโพรโทคอล (Protocol Stack) ดังภาพที่ 52 เพื่อสร้างความตามรูปแบบโพรโทคอลการสื่อสารที่กำหนดก่อนแล้วส่งผ่านไปยังตัวจัดการส่งข้อมูลในระดับล่างสุด (TxData Execution) ก่อนกระจายข้อมูลส่งออกพอร์ตสื่อสารที่มี RAU ต่ออยู่



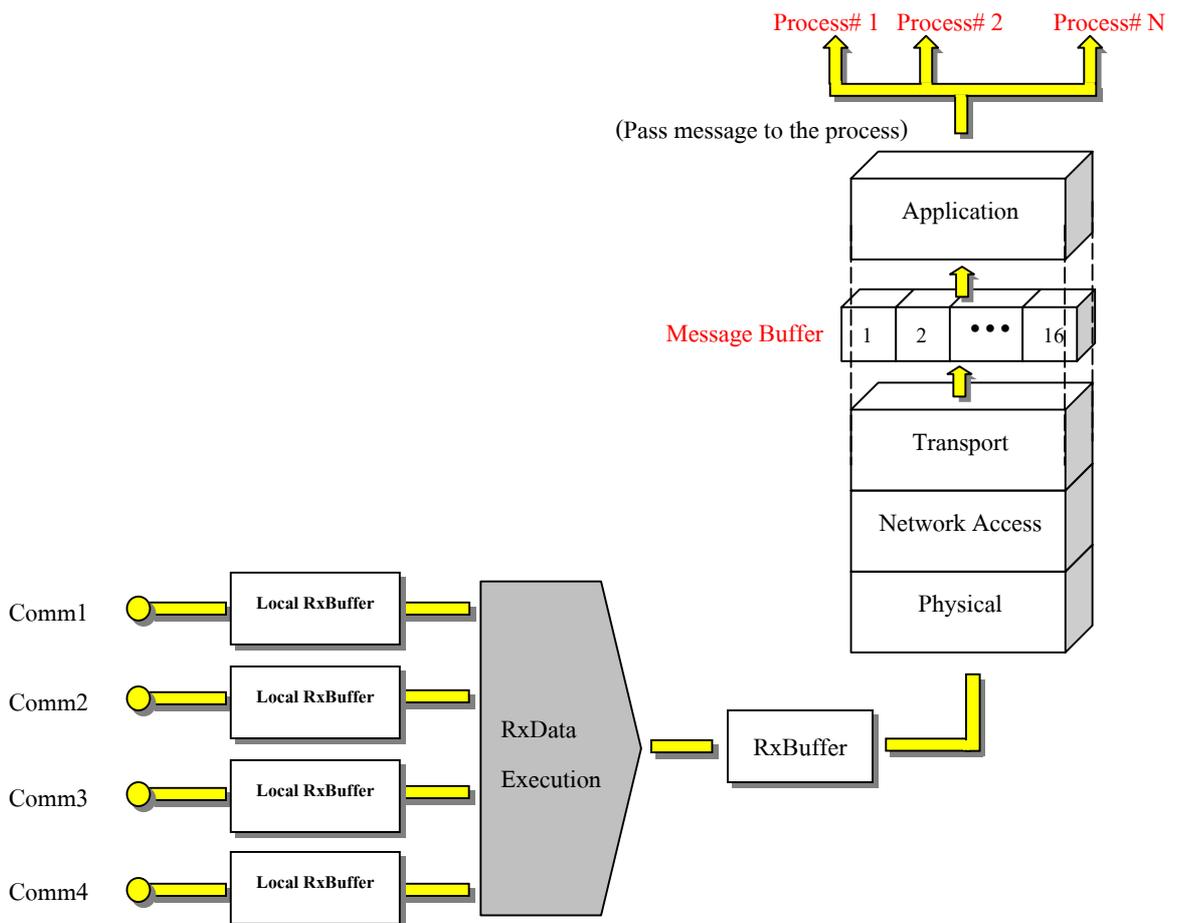
ภาพที่ 52 โครงสร้างการส่งข้อมูลของ HPU

ในขั้นตอนการส่งข้อความนั้นจะแบ่งเป็น การส่งข้อความแบบไม่รับประกัน (Unreliable Data Transfer Service) และการส่งข้อความแบบรับประกัน (Reliable Data Transfer Service) โดยกรณีการส่งข้อความแบบรับประกันจะมีการเก็บข้อความที่ได้ส่งผ่านออกจากชั้น Application ของโครงสร้างการส่งข้อมูลตามภาพที่ 52 โดยฟิลด์ข้อมูลทั้งหมดในบัฟเฟอร์ข้อความสำรอง (Backup Message Buffer) ประกอบด้วย ข้อความที่ถูกส่ง (Message) คำสั่งที่ถูกส่ง (Command) เลขที่อยู่ปลายทาง (Dst_Addr) สถานะบัฟเฟอร์ (Enabled) จำนวนครั้งที่ส่งซ้ำไปแล้ว (#Retransmitted) การตอบรับ (Acknowledge) ที่คอย (ACK) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 53 เพื่อให้โปรแกรมสามารถติดตามการตอบรับกลับมาจากเลขที่อยู่นั้นได้ ถ้าไม่มีการส่งการตอบรับกลับ โปรแกรมจะทำการส่งข้อความซ้ำ (Retransmission) ให้อัตโนมัติ โดยที่เวลาในการรอการตอบรับก่อนการส่งซ้ำของ RAU มีค่า 2 วินาที และ DLC มีค่า 1 วินาที เนื่องจากการสื่อสารของ DLC มีข้อความที่สั้นกว่าของ RAU และจำนวนครั้งที่ทั้งหมดที่โปรแกรมส่งข้อความซ้ำให้อัตโนมัติมีจำนวน 3 ครั้ง เมื่อส่งครบตามจำนวนนี้แล้วถ้ายังไม่มีการตอบรับกลับมาระบบจะลบค่าสถานะในบัฟเฟอร์ข้อความสำรองทันที



ภาพที่ 53 กลุ่มข้อมูลของบัฟเฟอร์ข้อความสำรอง

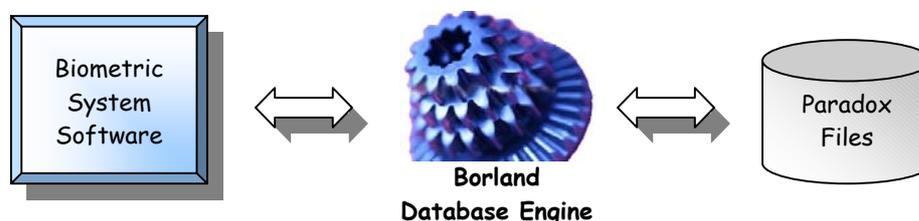
สำหรับการรับข้อความจาก RAU เข้ามาจะทำการเก็บข้อมูลไว้ในบัฟเฟอร์ของแต่ละพอร์ต (Local RxBuffer) จนครบทั้งข้อความก่อน จากนั้นจึงนำส่งเข้าไปยังบัฟเฟอร์รับข้อความของโครงสร้างการรับข้อมูล (RxBuffer) ตามภาพที่ 54 เพื่อให้เกิดความราบรื่นในการเคลื่อนย้ายข้อมูล แล้วจึงเริ่มการถอดรหัสข้อมูลออกจากข้อความ และส่งผ่านข้อมูลที่ได้ในข้อความนั้นไปที่กระบวนการตามฟิลด์คำสั่งที่ระบุอยู่ในข้อความนั้นหรือทำการลบค่าสถานะในบัฟเฟอร์ข้อความสำรอง (Backup Message Buffer) กรณีที่เป็นการตอบกลับของการตอบรับจากตัวปลายทาง



ภาพที่ 54 โครงสร้างการรับข้อมูลของ HPU

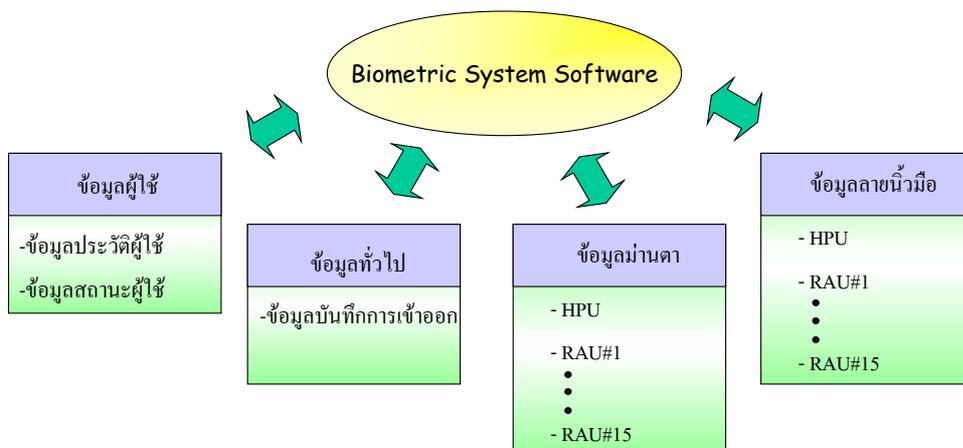
5. การจัดการฐานข้อมูลในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

ฐานข้อมูลในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกเป็นระบบที่ใช้รวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ของผู้ใช้เอาไว้ เพื่อที่จะสามารถนำข้อมูลมาประมวลผลและประยุกต์ใช้งานตามที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งวิธีการจัดเก็บข้อมูลในระบบฐานข้อมูลของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกนี้จะอยู่ในรูปแบบฐานข้อมูลชนิด Paradox ซึ่งเป็นฐานข้อมูลประเภทผู้ใช้เดี่ยว (Single-tiered Database Module) โดยมี Borland Database Engine หรือ BDE เป็นเครื่องมือในการติดต่อระหว่างซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกและฐานข้อมูลด้วยภาษา SQL ดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 การเชื่อมโยงระหว่างซอฟต์แวร์กับชุดเครื่องมือในการติดต่อกับฐานข้อมูล

ภายในฐานข้อมูลส่วนบุคคลจะแบ่งการจัดเก็บข้อมูลออกเป็นสองแบบคือ การจัดเก็บข้อมูลด้วยระบบฐานข้อมูล และการจัดเก็บข้อมูลด้วยระบบแฟ้ม (File) โดยข้อมูลที่จัดเก็บด้วยระบบฐานข้อมูลจะประกอบไปด้วยข้อมูลประวัติผู้ใช้ ข้อมูลสถานะผู้ใช้ และข้อมูลบันทึกการเข้าออก สำหรับในส่วนของการจัดเก็บด้วยระบบแฟ้มจะประกอบไปด้วย ข้อมูลม่านตา และข้อมูลลายนิ้วมือ ซึ่งจะมีการแยกเก็บเป็นแฟ้มเลขฐานสอง (Binary File) ของแต่ละบุคคลไว้ตามสารบบ (Directory) เฉพาะของ HPU และ RAU ต่าง ๆ เนื่องจากข้อมูลลายนิ้วมือที่ได้จากเครื่องอ่านลายนิ้วมือหนึ่งอาจไม่สามารถใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลลายนิ้วมือที่ได้จากเครื่องอ่านลายนิ้วมืออื่นได้ โครงสร้างของการจัดเก็บฐานข้อมูลส่วนบุคคลทั้งหมดนี้ได้แสดงไว้ในภาพที่ 56



ภาพที่ 56 โครงสร้างการจัดเก็บฐานข้อมูลส่วนบุคคล

5.1 ฐานข้อมูลผู้ใช้

ผู้ใช้งานจะมีข้อมูลประวัติและข้อมูลสถานะการใช้งานของ HPU หรือ RAU เป็นของแต่ละคน ซึ่งข้อมูลทั้งหมดจะมีความสำคัญและรายละเอียดที่แตกต่างกัน ดังนั้นวิธีการออกแบบระบบฐานข้อมูลสำหรับใช้กับฐานข้อมูลผู้ใช้ จะเป็นการสร้างฐานข้อมูลแบบ Master/Detail ที่มีการแยกตารางโดยจัดข้อมูลที่มีความสำคัญอยู่เป็นตารางหลักและข้อมูลที่เป็นรายละเอียดอยู่เป็นตารางย่อย ซึ่งเมื่อมีการเรียกข้อมูลจากตารางหลักพร้อมกับตารางย่อยระบบจะต้องอ้างอิงความสัมพันธ์จากตารางหลักเพื่อดึงข้อมูลจากตารางย่อยออกมา ในซอฟต์แวร์ระบบไปโอเมตริกตารางหลักจะเป็นตารางข้อมูลประวัติผู้ใช้อยู่ในแฟ้มตารางฐานข้อมูลชื่อ PDFS1p2.db เก็บข้อมูลส่วนตัวต่าง ๆ ของบุคคลดังตารางที่ 14 และตารางย่อยจะเป็นตารางข้อมูลสถานะผู้ใช้ อยู่ในแฟ้มตารางฐานข้อมูลชื่อ SDFS1p3.db เก็บข้อมูลสถานะการใช้งานของ HPU และ RAU ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 14 การเก็บข้อมูลประวัติผู้ใช้ในฐานข้อมูลส่วนบุคคล

No.	PIN	First Name	Last Name	ID	Gender	Date of Birth	Address
1	3086	KASET	NONTRI	0001	Male	02/02/1943	50 Phahonyothin, Jatujak, BKK

Office	Home	Mobile	Password	Registration Date	Bio Registered	Comment
029428555	029427171	-	23AR4Q523E	31/12/02	True	Engineer

คำอธิบายในฟิลด์ต่าง ๆ ของตารางข้อมูลประวัติผู้ใช้ในฐานะข้อมูลส่วนบุคคลมีดังนี้

- 1) *No.* ลำดับบุคคลในฐานะข้อมูล (ถูกกำหนดโดยอัตโนมัติเพื่อใช้อ้างอิงลำดับ)
- 2) *PIN* หมายเลข PIN ใช้ในการเข้าถึงระบบแบบ Verification (4 ตัวเลข)
- 3) *First Name* ชื่อตัว (20 ตัวอักษร)
- 4) *Last Name* นามสกุล (20 ตัวอักษร)
- 5) *ID Number* รหัสประจำตัว (10 ตัวอักษร)
- 6) *Gender* เพศ (Male / Female)
- 7) *Date of Birth* วันเดือนปีเกิด (dd/mm/yy)
- 8) *Address* ที่อยู่ของผู้ใช้งาน (80 ตัวอักษร)
- 9) *Office* หมายเลขโทรศัพท์ที่ทำงาน (15 ตัวอักษร)
- 10) *Home* หมายเลขโทรศัพท์ที่บ้าน (15 ตัวอักษร)
- 11) *Mobile* หมายเลขโทรศัพท์มือถือ (15 ตัวอักษร)
- 12) *Password* รหัสผ่านเฉพาะตัวที่ไม่ปะปนกับคนอื่น เพื่อใช้ในการเข้าระบบครั้งแรก หรือในกรณีที่ระบบมีปัญหา (10 ตัวอักษร)
- 13) *Registration Date* วันที่ลงทะเบียนเข้าใช้งานระบบ/ วันที่เริ่มต้นนับการใช้งานของการใช้งานระบบแบบชั่วคราว (dd/mm/yy)
- 14) *Bio Registered*สถานะของการลงทะเบียนไบโอเมตริกของ HPU (True/False)
- 15) *Comment* ส่วนอธิบายเพิ่มเติม (15 ตัวอักษร)

ตารางที่ 15 การเก็บข้อมูลสถานะผู้ใช้ในฐานะข้อมูลส่วนบุคคล

PIN	HPU	RAU1	RAU2	RAU3	...	RAU15
0001	S539	A199	U099	99		(Status + Authority+FPVerifyThreshold)
3758	U099	U032	U735	A299		(Status + Authority+FPVerifyThreshold)

คำอธิบายในฟิลด์ต่าง ๆ ของตารางข้อมูลสถานะผู้ใช้ในฐานะข้อมูลส่วนบุคคลมีดังนี้

- 1) *PIN* หมายเลข PIN ใช้ในการอ้างอิงถึงระบบ (Record) เพื่อดึงข้อมูลสถานะการใช้งานของ HPU และ RAU

- 2) *HPU* เก็บข้อมูลสถานะการใช้งานของ HPU
- 3) *RAU_i* เก็บข้อมูลสถานะการใช้งานของ RAU หมายเลขที่ *i*

ค่าสถานะของผู้ใช้ที่มีการเก็บอยู่ในแต่ละ HPU และ RAU จะประกอบด้วยตัวอักษรหรือตัวเลข 4 หลักดังนี้

- 1) หลักที่ 1 เป็นการระบุสถานะของผู้ใช้ดังนี้คือ
 - ผู้ควบคุมระบบเป็นอักษร S มีได้เพียงบุคคลเดียวในระบบซึ่งจะถูกกำหนดอยู่บน HPU
 - ผู้ดูแลระบบเป็นอักษร A ใน HPU สามารถกำหนดได้หลายคนแต่ RAU มีได้เพียงคนเดียว
 - ผู้ใช้งานทั่วไปเป็นอักษร U สามารถกำหนดเพิ่มเติมได้ไม่จำกัดขึ้นกับข้อจำกัดของแต่ละหน่วย
- 2) หลักที่ 2 เป็นการระบุระดับความสามารถของผู้ใช้งานในแต่ละสถานะดังนี้คือ
 - สำหรับผู้ดูแลระบบมีค่า 1-5 ตามระดับที่ผู้ควบคุมระบบกำหนดให้
 - สำหรับผู้ใช้ทั่วไปมีค่า 0 หมายถึง การใช้งานระบบได้แบบถาวร และ 1-7 หมายถึงจำนวนวันที่ใช้งานระบบแบบชั่วคราว
- 3) หลักที่ 3 และ 4 เป็นตัวเลขพิเศษแสดงค่าการตัดสินใจของการเปรียบเทียบลายนิ้วมือ มีค่าตั้งแต่ 00-99 โดยค่าการตัดสินใจจะมีเฉพาะของแต่ละบุคคล

กรณีผู้ใช้ไม่ถูกยินยอมให้ใช้งานใน HPU หรือ RAU ใด ค่าสถานะของผู้ใช้ (หลักที่ 1) และค่าระดับความสามารถ (หลักที่ 2) ใน HPU หรือ RAU นั้น จะถูกตั้งค่าเป็นช่องว่างเหลือเพียงตัวเลข 2 หลัก

5.2 ฐานข้อมูลบันทึกการเข้าออก

เมื่อระบบถูกใช้งาน จะมีการบันทึกวันเวลาของผู้ใช้ที่ผ่านเข้าระบบทั้ง HPU และ RAU ข้อมูลที่เก็บในแต่ละครั้งของการเข้าระบบจะอยู่ในระบบฐานที่มีเพียงหนึ่งตาราง ในแฟ้มตารางฐานข้อมูลชื่อ AHFS1p2.db ซึ่งมีรายละเอียดตามตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ฐานข้อมูลบันทึกการเข้าออก

PIN	First Name	Last Name	Date	Time	Objective	Unit
3086	KASET	NONTRI	31/12/02	15:49:02	Logon	HPU

คำอธิบายในฟิลด์ต่าง ๆ ของตารางข้อมูลบันทึกการเข้าออกมีดังนี้

- 1) *PIN* หมายเลข PIN (4 ตัวเลข)
- 2) *First Name* ชื่อตัว (20 ตัวอักษร)
- 3) *Last Name* นามสกุล (20 ตัวอักษร)
- 4) *Objective* วัตถุประสงค์การเข้าใช้ระบบ (Access / Logon)
- 5) *Date* วันที่เข้ามาใช้งานระบบ (dd/mm/yy)
- 6) *Time* เวลาที่เข้ามาใช้งานระบบ (hh/mm/ss)
- 7) *Unit* ระบบที่ผ่านเข้ามาใช้งาน (HPU / RAU1 - 15)

5.3 ระบบเพิ่มข้อมูลผ่านตาและข้อมูลลายนิ้วมือ

การเก็บข้อมูลไบโอเมตริกของ HPU ที่มีทั้งข้อมูลผ่านตาและข้อมูลลายนิ้วมือ กับการเก็บข้อมูลไบโอเมตริกของ RAU ที่มีเฉพาะข้อมูลลายนิ้วมือ จะมีการแยกเก็บอยู่ในสารบบต่าง ๆ ตามแต่ละสารบบของ HPU หรือ RAU ซึ่งระบบของการเก็บเพิ่มข้อมูลผ่านตาและลายนิ้วมือได้แสดงไว้ในตารางที่ 10 แล้ว

โดยในส่วนของ การเก็บเพิ่มข้อมูลผ่านตาของ HPU จะถูกเก็บอยู่ในสารบบชื่อ ...IrisTemplate ที่มีนามสกุล .ITP และอ้างอิงเพิ่มข้อมูลด้วยหมายเลข PIN ของผู้ใช้ และในส่วนของการเก็บเพิ่มข้อมูลลายนิ้วมือจะถูกเก็บอยู่ในสารบบชื่อ ...FPTemplate ที่มีนามสกุล .FTP และอ้างอิงเพิ่มข้อมูลด้วยหมายเลข PIN เช่นเดียวกันกับวิธีการเก็บเพิ่มข้อมูลผ่านตา สำหรับในส่วนเพิ่มข้อมูลลายนิ้วมือของ RAU ที่ส่งมายัง HPU เพื่อเก็บสำรองไว้นั้น เพิ่มข้อมูลลายนิ้วมือจะถูกจัดเก็บอยู่ในสารบบชื่อ ...RAUTemplate ซึ่งจะมีการแบ่งสารบบย่อยลงอีกตามหมายเลขที่อยู่ของ RAU นั้น ๆ เพื่อใช้จัดเก็บเพิ่มข้อมูลลายนิ้วมือแยกตาม RAU และจะมีการอ้างอิงเพิ่มข้อมูลด้วยหมายเลข PIN ของเพิ่มที่มีนามสกุลคือ .RTB ภายในสารบบของ RAU นั้น

ผลและวิจารณ์

ผลการพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา

การทดลองในส่วนของการพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตาเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพ จะใช้ฐานข้อมูลอ้างอิงจำนวน 2 ชุดคือ ฐานข้อมูลม่านตาของจีนชื่อ CASIA v.1 ของสถาบัน Institute of Automation, Chinese Academy of Science ซึ่งมีจำนวนภาพทั้งหมด 756 ภาพ โดยเก็บตัวอย่างจากจำนวนบุคคล 108 คน เก็บภาพดวงตา 7 ภาพต่อคน และฐานข้อมูลม่านตาของไทยชื่อ KSIP_DB01R ของห้องปฏิบัติการประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์ มีจำนวนภาพทั้งหมด 1920 ภาพ จากจำนวนบุคคล 120 คน เก็บดวงตาซ้าย 8 ภาพ ดวงตาขวา 8 ภาพต่อคน โดยการทดลองจะเริ่มจากการทดสอบหาประสิทธิภาพของการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วที่ได้เสนอ เทียบกับการกระจายรายละเอียดด้วยการแปลงเวฟเล็ทแบบเดิม จากนั้นจะทำการทดสอบหาประสิทธิภาพการรู้จำม่านตาด้วยวิธีการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว ซึ่งรายละเอียดของการทดสอบจะกล่าวอยู่ในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

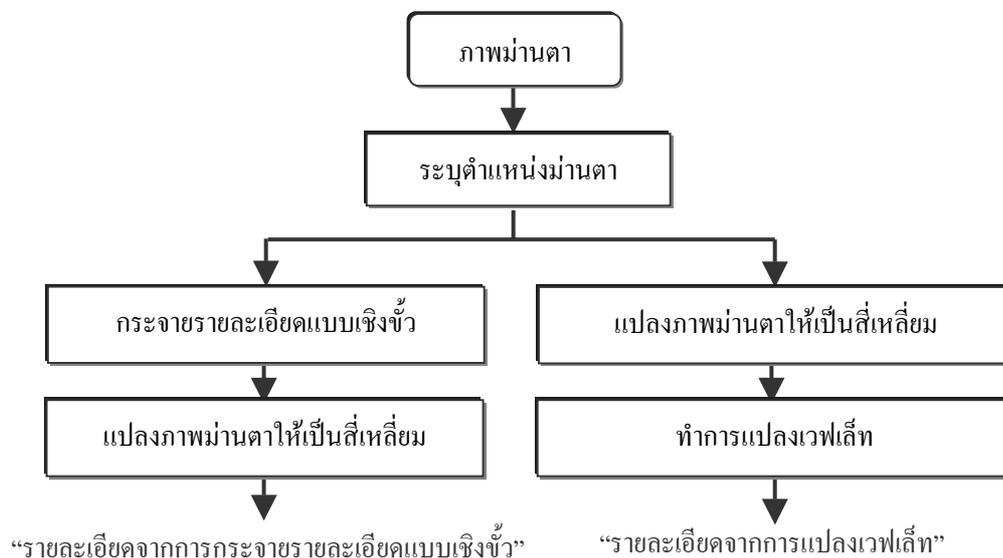
1. การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วกับการแปลงเวฟเล็ท

เนื่องจากการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วเป็นการประยุกต์การแปลงเวฟเล็ทด้วยชุดตัวกรองวิเคราะห์จากการกรองในแนวพิกัดมุมฉากมาเป็นแนวพิกัดเชิงขั้ว ดังนั้นการหาประสิทธิภาพของวิธีการวิเคราะห์จากวิธีการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วจะเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลที่ได้จากการแปลงเวฟเล็ทแบบเดิม โดยการทดสอบเปรียบเทียบจะทำใน 2 ลักษณะคือ วิธีแบบ Subjective test จะกระจายรายละเอียดม่านตาแล้วใช้คนดูเทียบผล และวิธีแบบ Objective test จะกระจายรายละเอียดม่านตาแล้วนำไปหาค่าความผิดพลาดในการรู้จำออกมาเป็นตัวเลข

1.1 เปรียบเทียบผลการกระจายรายละเอียดจากภาพม่านตา (Subjective Test)

การเปรียบเทียบรายละเอียดจากภาพการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วและการแปลงเวฟเล็ทจะต้องออกแบบให้ขั้นตอนการเปรียบเทียบมีจำนวนกระบวนการที่ใกล้เคียงกันเพื่อความถูกต้อง ทำให้การวัดผลของการกระจายรายละเอียดภาพม่านตาจึงต้องอยู่บนพิกัดมุมฉาก เนื่องจากผลการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วจะต้องผ่านการแปลงพิกัดไปบนรูปสี่เหลี่ยมในขั้น

ตอนสุดท้าย ซึ่งจะสมนัยกับการแปลงพิกัดของภาพม่านตาเป็นรูปสี่เหลี่ยมก่อนที่จะทำการแปลงเวฟเล็ทในพิกัดมุมฉากแบบเดิม ทั้งนี้แผนภาพขั้นตอนของการเปรียบเทียบได้แสดงไว้ในภาพที่ 57



ภาพที่ 57 แผนภาพของขั้นตอนการเปรียบเทียบระหว่างการรายละเอียดแบบเชิงขั้วกับการแปลงเวฟเล็ทแบบเดิม

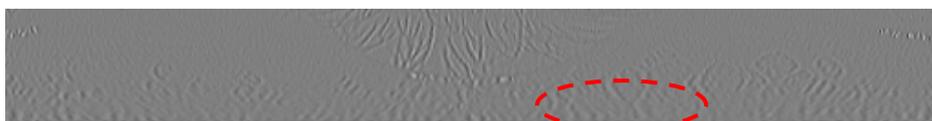
จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 58 สังเกตได้ว่า ผลของการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วจะคงรายละเอียดเล็ก ๆ ที่อยู่ตามแนวแกนรัศมีและแกนมุมได้มากกว่าผลจากการแปลงเวฟเล็ทแบบเดิม แต่ทว่าเวลาที่ใช้ในการประมวลผลระหว่างทั้งสองวิธียังมีค่าที่แตกต่างกันอยู่มาก ดังแสดงในตารางที่ 17 เนื่องจากการประยุกต์ตัวกรองเวฟเล็ทในแนวพิกัดเชิงขั้วจะต้องใช้การประมาณเชิงเส้นกับจุดรอบ ๆ ข้างเคียงในตำแหน่งที่ไม่ได้อยู่บนจุดภาพ

ตารางที่ 17 เวลาการประมวลผลระหว่างการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วกับการแปลงเวฟเล็ทแบบเดิม

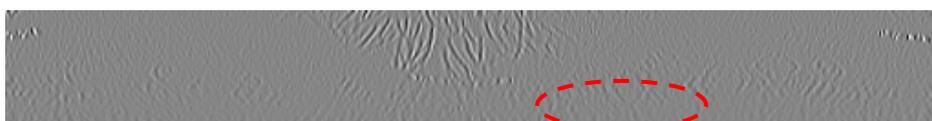
ขั้นตอน	เวลาการประมวลผล (วินาที)		
	การกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว	การแปลงเวฟเล็ทแบบเดิม	อัตราส่วน
การกระจายรายละเอียดในหนึ่งระดับ			
ความละเอียดด้วยชุดตัวกรองเวฟเล็ทของ Daubechies 9-7 biorthogonal	2.22	0.06	37:1



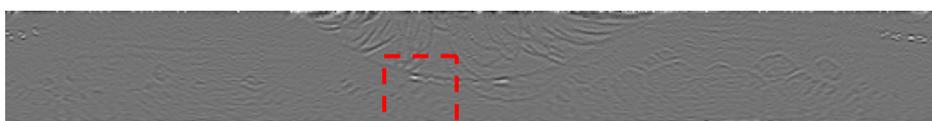
(ก) ภาพม่านตาต้นฉบับหลังผ่านการคลี่



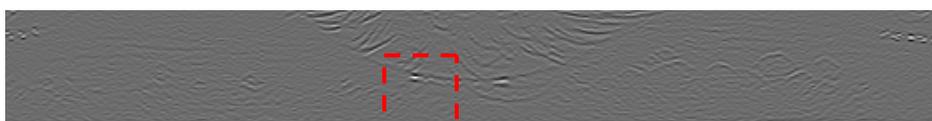
(ข1) ภาพรายละเอียดแนวรัศมีของการกระจายแบบเชิงขั้ว



(ข2) ภาพรายละเอียดแนวรัศมีของการแปลงเวฟเล็ท



(ค1) ภาพรายละเอียดแนวมุมของการกระจายแบบเชิงขั้ว



(ค2) ภาพรายละเอียดแนวมุมของการแปลงเวฟเล็ท



(ง1) ภาพรายละเอียดแนวไขว้กับแกนรัศมีและแกนมุมของการกระจายแบบเชิงขั้ว



(ง2) ภาพรายละเอียดแนวไขว้กับแกนรัศมีและแกนมุมของการแปลงเวฟเล็ท

ภาพที่ 58 ผลการกระจายรายละเอียดด้วยการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วและการแปลงเวฟเล็ท
กับภาพม่านตา

1.2 เปรียบเทียบผลการกระจายรายละเอียดจากประสิทธิภาพการรู้จำม่านตา (Objective Test)

ระบบการรู้จำอย่างง่ายได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพ โดยการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของม่านตาออกมาในเชิงความถี่ด้วยการกระจายรายละเอียด โดยการใช้การแปลงเวฟเล็ทแบบเดิมและการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ม่านตาของระบบเริ่มจากนำภาพม่านตามาหาขอบเขตวงแหวนม่านตา และนำไปกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ทางความถี่ออกมา จากนั้นจะทำการเข้ารหัสรายละเอียด โดยจะเก็บเป็นชุดรหัสเลขฐานสอง และอาศัยค่าความแปรปรวนในแต่ละพื้นที่เป็นเกณฑ์ตัดสินใจที่จะใช้เป็นตัวแทนของแต่ละพื้นที่ย่อยที่พิจารณา จากนั้นการเปรียบเทียบจะใช้ตัวดำเนินการแบบ AND (Binary AND-operator) กระทำการเปรียบเทียบชุดรหัสเลขฐานสองที่ได้ทำให้เวลาที่ใช้ในการเปรียบเทียบต่ำ โดยรายละเอียดของขั้นตอนการเข้ารหัสของรายละเอียดแบบเชิงขั้วจะกล่าวในหัวข้อต่อไป พร้อมแผนภาพของระบบการรู้จำรวมในภาพที่ 59 และ 60

1.2.1 ทำการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วกับภาพวงแหวนม่านตา

1.2.2 แบ่งพื้นที่ของม่านตาออกเป็นส่วนด้วยการแบ่งมุม มุมละ 5° และแบ่งรัศมีจากรัศมีขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านในถึงขอบเขตวงแหวนม่านตาด้านนอกเป็น 8 ส่วน

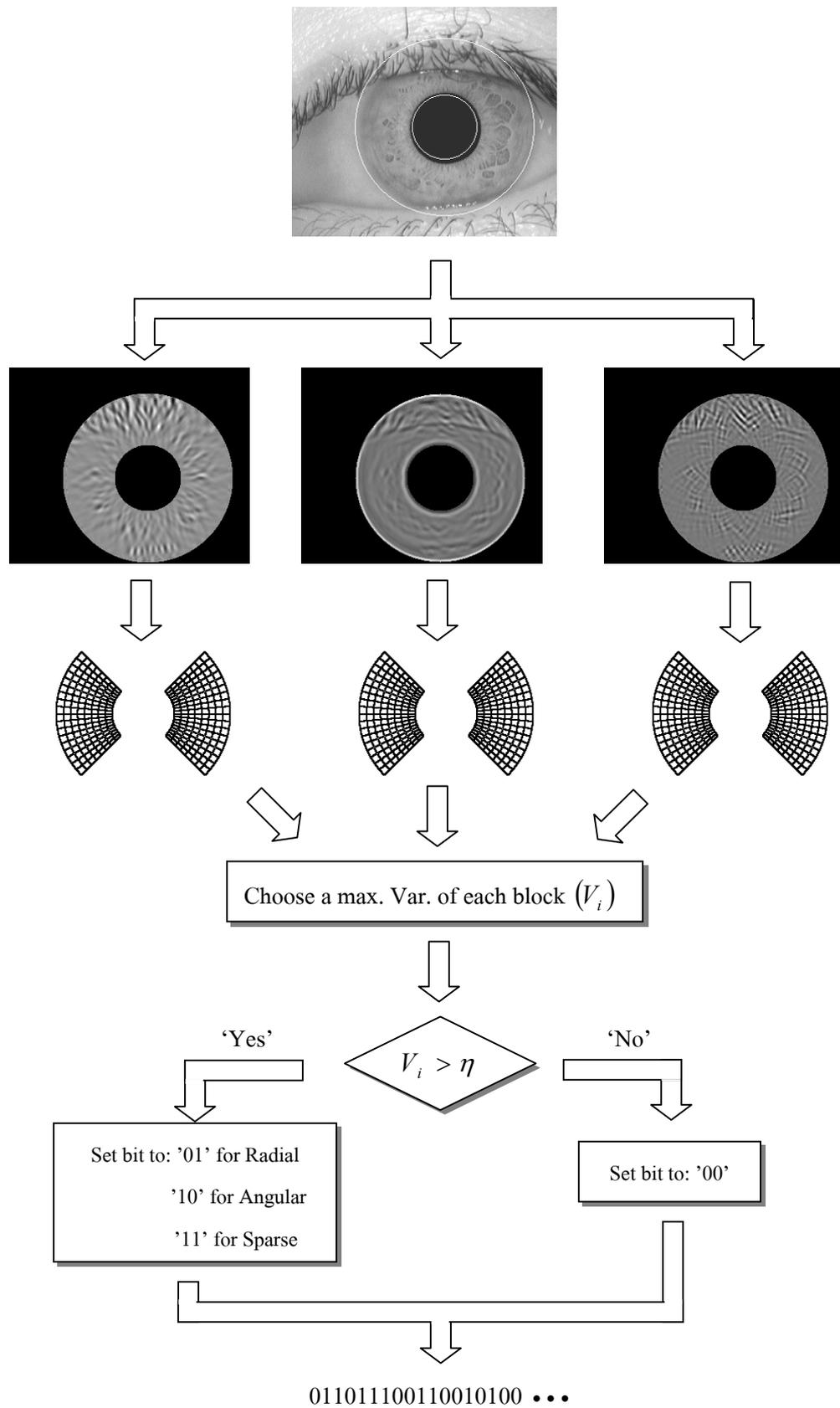
1.2.3 ทำการเข้ารหัสค่าสัมประสิทธิ์ทางความถี่จากภาพรายละเอียดในแนวรัศมีแนวมุม และแนวไขว้กับแกนรัศมีและแกนมุม

1) วัดค่าความแปรปรวนในแต่ละพื้นที่จากทั้งสามภาพรายละเอียด แล้วเลือกค่าที่มากที่สุดเป็นตัวแทนเพื่อบอกลักษณะของลายเส้นพื้นที่นั้นว่าเป็นแบบใดจากทั้งสามรายละเอียด

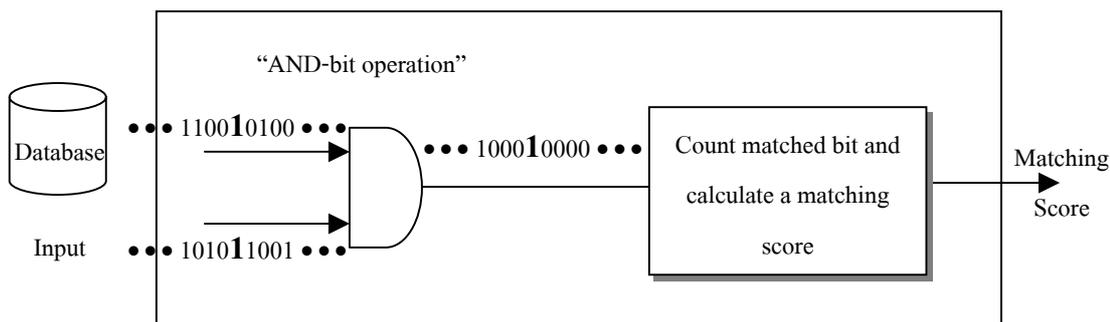
2) เทียบค่าความแปรปรวนที่เลือกมากับค่าระดับขีดเริ่มเปลี่ยน ถ้ามากกว่าก็จะเข้ารหัสรายละเอียดเป็น 01-เมื่อเลือกค่ามาจากภาพรายละเอียดแนวรัศมี 10-เมื่อเลือกค่ามาจากภาพรายละเอียดแนวมุม 11-เมื่อเลือกค่ามาจากภาพรายละเอียดแนวไขว้กับแกนรัศมีและแกนมุม ถ้าค่าความแปรปรวนน้อยกว่า ก็จะเข้ารหัสเป็น 00

3) วนรอบทำงานครบทุกพื้นที่ในส่วน $\pm 45^{\circ}$ ด้านซ้ายและขวาของม่านตา

1.2.4 สร้างแถวลำดับ (Array) เพื่อเก็บรหัสข้อมูลม่านตาเป็นเลขฐานสอง



ภาพที่ 59 แผนภาพรวมของการเข้ารหัสด้วยการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว



ภาพที่ 60 แผนภาพรวมของการเปรียบเทียบรหัสข้อมูลผ่านดา

สำหรับขั้นตอนของการรู้จำผ่านดาด้วยการแปลงเวฟเล็ทแบบเดิมนั้นจะมีขั้นตอนเหมือนกับการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วว่ามีขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นแตกต่างจากเดิมเพียงการคลี่วงแหวนผ่านดาไปเป็นรูปสี่เหลี่ยมก่อน โดยการเปรียบเทียบผลความผิดพลาดด้วยค่า EER (Equal Error Rate) ในการรู้จำของทั้งสองระบบระหว่างการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วกับการแปลงเวฟเล็ทแบบเดิมจะแสดงอยู่ในตารางที่ 18 ซึ่งค่า EER เป็นจุดที่ค่าอัตราการยอมรับที่ผิดพลาด (False Accept Rate, FAR) และจุดที่ค่าการปฏิเสธที่ผิดพลาด (False Reject Rate, FRR) มีค่าเท่ากัน

ตารางที่ 18 ผลความผิดพลาดในการรู้จำผ่านดาด้วยการวิเคราะห์รายละเอียดจากการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วกับการแปลงเวฟเล็ทแบบเดิม

ระดับความละเอียดที่ใช้ในการกระจายรายละเอียด	Equal Error Rate (EER, %)	
	การกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว	การแปลงเวฟเล็ทแบบเดิม
ระดับความละเอียดที่ 1	23.55	30.19
ระดับความละเอียดที่ 1 และ 2	17.37	22.10
ระดับความละเอียดที่ 2	16.87	18.36
ระดับความละเอียดที่ 2 และ 3	14.93	17.42
ระดับความละเอียดที่ 3	15.32	18.72
ระดับความละเอียดที่ 1, 2, และ 3	15.38	19.05

จากผลการทดลองจะเห็นว่า การกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วให้ค่า EER ต่ำกว่าการแปลงเวฟเล็ทแบบเดิมในทุกกรณี ข้อสังเกตที่น่าสนใจคือ ประสิทธิภาพของระบบจะให้ค่าสูง

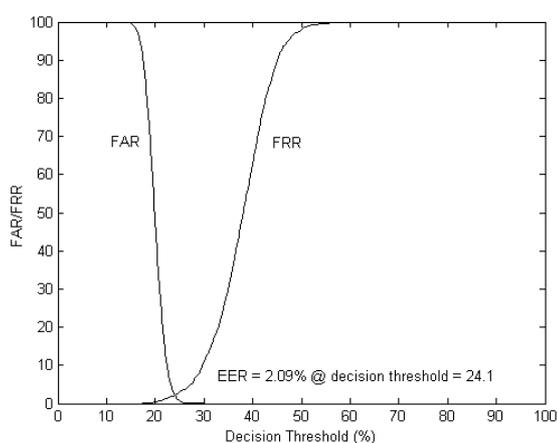
สุด เมื่อพิจารณาลักษณะเฉพาะในรายละเอียดที่ 2 ร่วมกับที่ 3 และให้ค่าประสิทธิภาพต่ำสุดเมื่อมีการใช้ลักษณะเฉพาะจากรายละเอียดที่ 1 เพียงรายละเอียดเดียว โดยข้อสังเกตดังกล่าวเป็นจริงกับการกระจายทั้งสองวิธี ทั้งนี้เนื่องมาจากรายละเอียดที่ 2 และ 3 เน้นลายเส้นบนม่านตาออกมาได้มากกว่ารายละเอียดอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับรายละเอียดที่ 1

2. ผลการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา

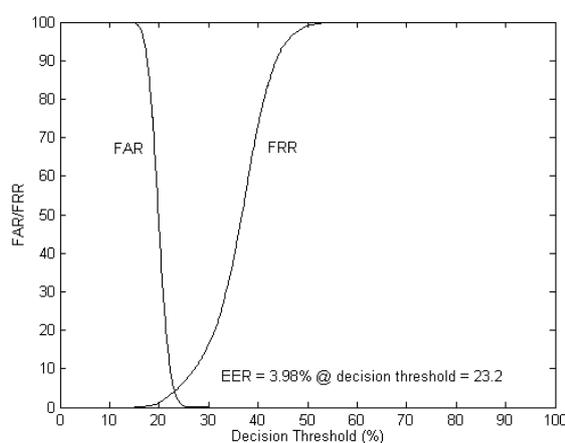
การวัดประสิทธิภาพของการรู้จำม่านตาโดยอิงกับค่าความผิดพลาดของระบบการรู้จำลายเส้นตามแนวรัศมีตามที่ได้อธิบายในหน้า 15-58 ได้แสดงผลประสิทธิภาพไว้ในตารางที่ 19 และผลความผิดพลาดในการตัดสินใจที่ระดับคะแนนต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 61 โดยค่า FAR (False Accept Rate) คือ ค่าอัตราการยอมรับที่ผิดพลาด ค่า FRR (False Reject Rate) คือ ค่าการปฏิเสธที่ผิดพลาด ค่า EER (Equal Error Rate) คือ ค่าที่มีค่าใกล้เคียงกันระหว่าง FAR และ FRR และค่า CRR (Correct Recognition Rate) คือ อัตราการรู้จำที่ถูกต้อง

ตารางที่ 19 ประสิทธิภาพของผลการรู้จำม่านตา

ฐานข้อมูล	Verification Mode			Identification Mode
	FAR (%)	FRR (%)	EER (%)	CRR (%)
CASIA v.1	1.989602	2.204586	2.097094	99.735451
KSIP DB01R	3.789880	4.181548	3.985714	99.687500



(ก) ทดสอบบนฐานข้อมูล CASIA v.1



(ข) ทดสอบบนฐานข้อมูล KSIP_DB01R

ภาพที่ 61 ผลความผิดพลาดในการตัดสินใจที่ระดับคะแนนต่าง ๆ

จากผลการทดลองพบว่าผลการรู้จำม่านตาในฐานข้อมูลชุด CASIA v.1 ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า เนื่องมาจากภาพม่านตาในฐานข้อมูลชุดนี้ค่อนข้างมีความชัดเจน และมีปัญหาเรื่องการบิดบังพื้นที่ม่านตาจากขนตาและเปลือกตาน้อย อีกทั้งยังได้มีการเติมสีระบอบเขตรูม่านตาไว้ก่อนสำหรับการวัดประสิทธิภาพของการรู้จำโดยอิงกับเวลาของการประมวลผลถูกแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ประสิทธิภาพความเร็วในการประมวลผลเฉลี่ยของขั้นตอนต่าง ๆ ในการรู้จำม่านตา

ขั้นตอนวิธี	เวลาการประมวลผล
การระบุตำแหน่งของม่านตา	317.75 มิลลิวินาที
การสร้างลักษณะเฉพาะของม่านตาด้วยการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว	6.386556 วินาที
การเปรียบเทียบม่านตา	91.47 มิลลิวินาที

วิจารณ์ผลการพัฒนาขั้นตอนวิธีการรู้จำม่านตา

ปัญหาสำคัญที่เกิดจากการกระจายรายละเอียดเชิงขั้วคือ การเกิดรายละเอียดเทียมขึ้นจากผลของ Ringing Artifact และจะปรากฏให้เห็นอย่างเด่นชัดขึ้นในระดับความละเอียดที่ลดลง ซึ่งผลดังกล่าวอาจจะถูกปรับปรุงได้ด้วยการเปลี่ยนเทคนิคการกรองของตัวกรองเวฟเล็ตโดยใช้ขนาดตัวกรองที่ไม่เท่ากันตามแต่ละจุดภาพ โดยให้การกรองในส่วนด้านในใกล้เคียงกับรัศมีของขอบเขตในใช้ขนาดตัวกรองที่เล็กกว่าขอบเขตนอกโดยยังต้องจำกัดให้ตัวกรองทั้งหมดดังกล่าวมีความถี่ผ่าน (Pass Band) ที่เท่ากัน

นอกจากนี้การวิเคราะห์หลายเส้นในแนวรัศมีที่มีปริมาณหลายเส้นเกิดขึ้นจำนวนมาก อันเป็นผลจากการการปรับฮิสโตแกรม (Histogram Equalization) ที่ทำให้เกิดลายเส้นม่านตาแฝงเด่นชัด ดังนั้นการเติบโตของขอบเขต (Region growing) เพื่อหาหลายเส้นจึงได้ปริมาณหลายเส้นที่มาก ทั้งนี้การหาหลายเส้นอาจจะพิจารณา ร่วมกับการวิเคราะห์ของจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงของหลายเส้นเพื่อยืนยันการมีอยู่ของหลายเส้นที่ไม่ได้เป็นผลจากความเด่นชัดของหลายเส้นม่านตาแฝง

สำหรับเวลาการประมวลผลของการสร้างลักษณะเฉพาะของม่านตาด้วยการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วจากตารางที่ 20 ที่มีการประมวลผลสูงกว่าขั้นตอนอื่น ๆ มาก เนื่องจากมีขั้นตอนการประมาณค่าจุด (Interpolation) ในทุก ๆ จุดภาพที่ทำการแปลง ดังนั้นอาจจะปรับปรุงโดยการใช้อัลกอริทึมใกล้เคียงหรือการทำการประมาณแบบเร็ว (Fast Algorithm) เพื่อทดแทนได้

ผลการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

ผลการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก แบ่งเป็น 4 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

- 1) ส่วนการติดต่อสื่อสารระหว่างฮาร์ดแวร์ HPU กับ RAU โดยการติดต่อสื่อสารจะติดต่อผ่านพอร์ตอนุกรมหรือ พอร์ต LAN เป็นเครือข่าย ประกอบด้วยหน่วยประมวลผลกลางเป็นคอมพิวเตอร์ที่มีซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกทำงานควบคุมอยู่ และหน่วยประมวลผลย่อยที่เป็นฮาร์ดแวร์สามารถติดตั้งได้ตามประตูต่าง ๆ โดยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ทดสอบครั้งนี้มีความเร็วในการประมวลผล 1.8 GHz RAM 256 MB. ดังแสดงระบบไบโอเมตริกที่มี HPU เป็นศูนย์กลางระบบ และ RAU เป็นหน่วยตรวจสอบลายนิ้วมือที่ติดตั้งตามประตู ในภาพที่ 62
- 2) ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน แสดงหน้าต่างหลักของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกในภาพที่ 63
- 3) ส่วนการจัดการการทำงาน โดยซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกจะแบ่งการทำงานของผู้ออกเป็น 2 โหมดคือ โหมดผู้ใช้ทั่วไปและโหมดผู้ดูแลระบบซึ่งซอฟต์แวร์จะทำการตรวจสอบมาตราหรือลายนิ้วมือเพื่อให้สิทธิในการใช้งาน มีโครงสร้างของการเชื่อมโยงหน้าต่างการใช้งานเมนูภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกดังภาพที่ 64 โดยหน้าต่าง Main Menu เป็นหน้าต่างหลักในการเลือกรูปแบบการทำงานระหว่างการใช้งานควบคุมการผ่านเข้าออกประตูใน User Menu กับการจัดการระบบไบโอเมตริกใน Administrator Menu ที่มีฟังก์ชันการทำงานเตรียมไว้สำหรับผู้ควบคุมระบบและผู้ดูแลระบบ อาทิ การจัดการฐานข้อมูลบันทึกการเข้าออก การจัดการฐานข้อมูลผู้ใช้ การจัดการ RAU และการตั้งค่าระบบไบโอเมตริก
- 4) ส่วนการจัดการข้อมูล ซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกจะจัดการข้อมูลของผู้ใช้ด้วยระบบฐานข้อมูลแบบ Paradox ได้แก่ ฐานข้อมูลผู้ใช้ และฐานข้อมูลบันทึกการเข้าออก ซึ่งหน้าต่างของส่วนจัดการฐานข้อมูลผู้ใช้และฐานข้อมูลบันทึกการเข้าออกจะแสดงในภาพที่ 65

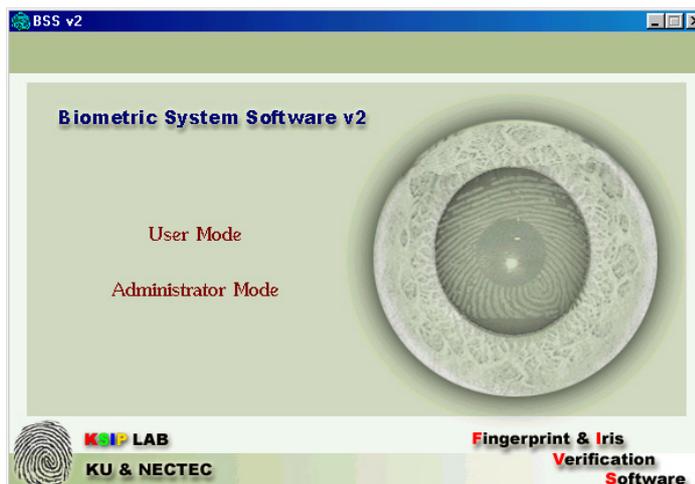


(ก) การใช้งานของ HPU



(ข) การใช้งานของ RAU

ภาพที่ 62 ระบบไบโอเมตริกเต็มรูปแบบกับซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

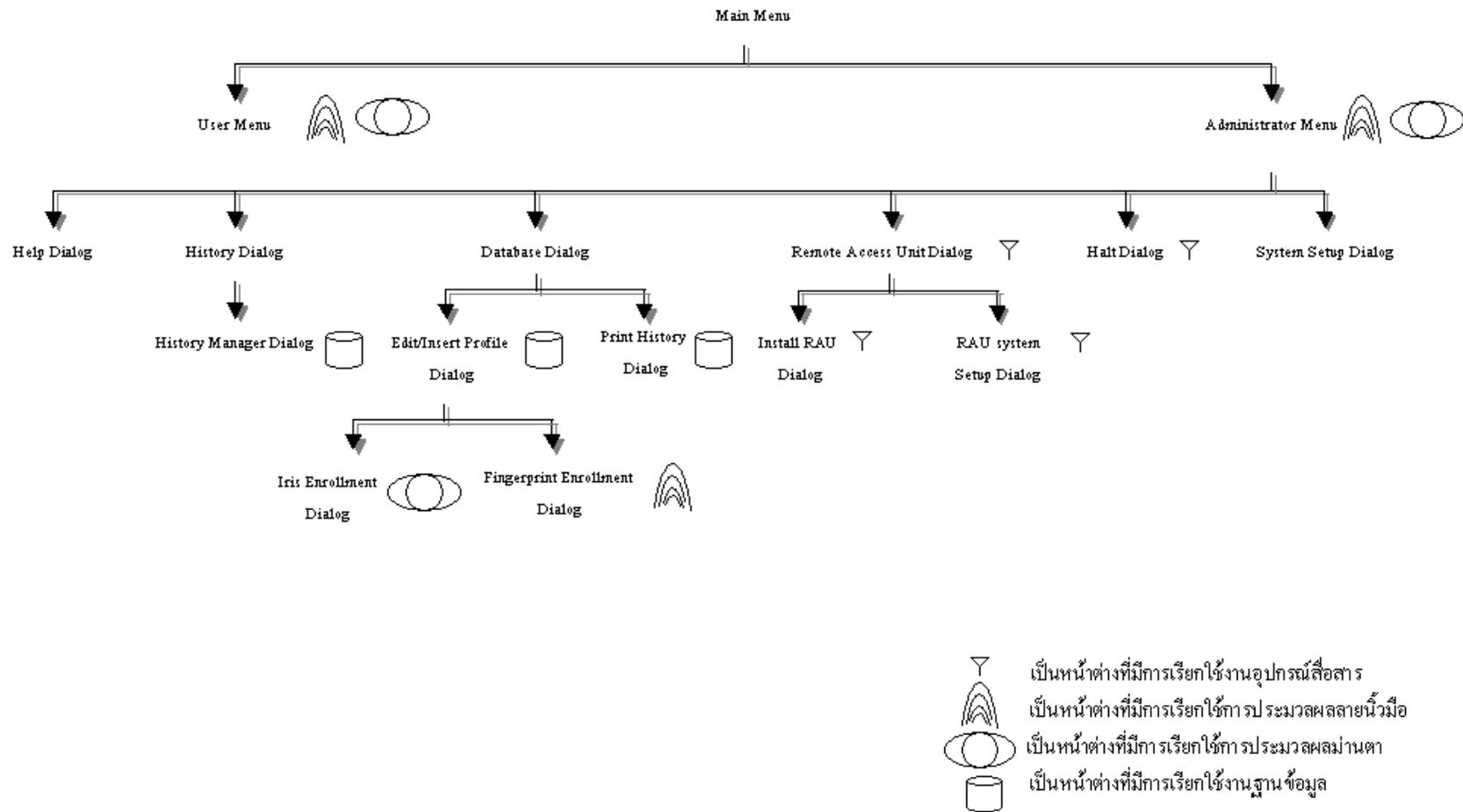


(ก) หน้าต่างปกติ (Main Menu) ก่อนการเข้าสู่ User Mode หรือ Administrator Mode

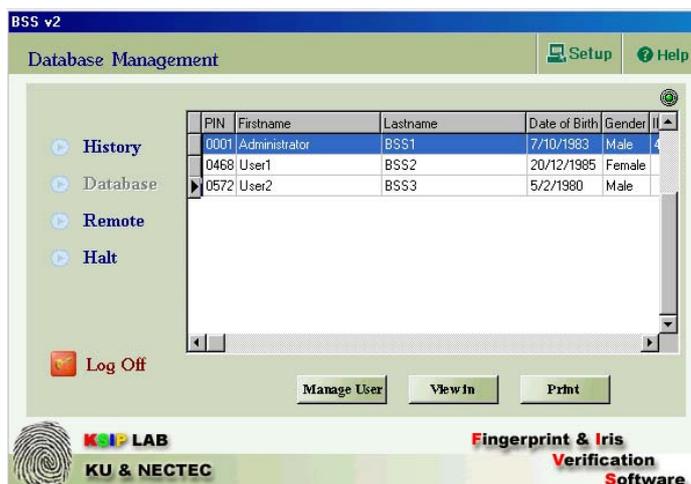
(ข) หน้าต่างการลงทะเบียนประวัติของผู้ควบคุมระบบ

(ค) หน้าต่างการขอผ่านระบบ (User Menu)

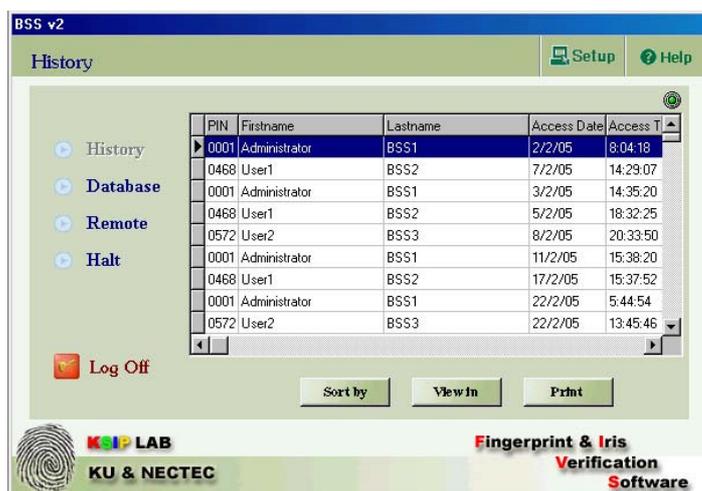
ภาพที่ 63 ซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกสำหรับการตรวจสอบม่านตาและลายนิ้วมือ



ภาพที่ 64 โครงสร้างหน้าต่างภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก



(ก) หน้าต่างการจัดการฐานข้อมูลผู้ใช้



(ข) หน้าต่างการจัดการฐานข้อมูลบันทึกการเข้าออก

ภาพที่ 65 การจัดการฐานข้อมูลส่วนบุคคลในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

จากการทดสอบการใช้งานทั้งระบบในเบื้องต้น ระบบสามารถใช้งานได้ดี โดยเฉพาะใน ส่วนของซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกอาจมีปัญหาคือในส่วนของผู้ใช้ โดยจะต้องมีการแนะนำผู้ใช้ให้ วางตำแหน่งของดวงตาให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานรู้จำม่านตาและการวางตำแหน่งนิ้วมือให้อยู่ ในขอบเขตของตัวอ่านภาพลายนิ้วมือ

วิจารณ์ผลการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริก

จากการพัฒนาโปรแกรมระบบไบโอเมตริก โดยใช้การติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม ด้วยโปรโตคอล RS-232 ที่มีลักษณะการสื่อสารเป็นแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point) ทำให้การเชื่อมต่อระหว่างฮาร์ดแวร์ (HPU กับ RAU) เป็นเครือข่าย เกิดการใช้พอร์ตสื่อสารของ HPU ที่สิ้นเปลือง เนื่องจากหนึ่งพอร์ตอนุกรมของ HPU จะเชื่อมต่อไปยังหนึ่งพอร์ตของ RAU และเมื่อมีจำนวน RAU เพิ่มขึ้นจะทำให้ HPU ที่เป็นคอมพิวเตอร์มีจำนวนพอร์ตอนุกรมไม่เพียงพอต่อจำนวน RAU ดังนั้นการออกแบบเครือข่ายควรมีลักษณะเป็นบัสเพื่อจำกัดพอร์ตสื่อสารกับระบบไบโอเมตริกของ HPU ให้ใช้พอร์ตสื่อสารเพียงพอร์ตเดียว หรืออาจสร้างตัวแปลงข้อมูลของพอร์ตอนุกรมจากหนึ่งพอร์ตของ HPU ออกไปยังพอร์ตของ RAU ทุกตัวเพื่อแก้ปัญหาการสื่อสารแบบจุดต่อจุด ซึ่งตัวแปลงนี้ต้องมีการแบ่งการใช้งาน (Sharing) พอร์ตการสื่อสารระหว่างกัน

สำหรับระบบฐานข้อมูลที่ใช้ Borland Database Engine หรือ BDE เป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างโปรแกรมระบบไบโอเมตริกกับระบบฐานข้อมูล ประสิทธิภาพของความปลอดภัยในการป้องกันการเข้าถึงระบบฐานข้อมูลแบบนี้ยังไม่ดี และระบบฐานข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรมไม่ได้เป็นฐานข้อมูลประเภทระบบรับ-ให้บริการ (Client/Server) แบบ Two-tiered Database Module จึงไม่สามารถเชื่อมโยงกับ HPU จากระบบอื่นเป็นเครือข่ายที่ใหญ่ขึ้นต่อไปได้ แต่ทว่าการเชื่อมโยงไปยัง HPU ตัวอื่นอาจจะทำให้ระบบที่ออกแบบไว้เกิดช่องโหว่และเกิดความไม่ปลอดภัยต่อระบบตามมาได้

ในการใช้งานเครื่องอ่านม่านตาต้นแบบของห้องปฏิบัติการประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์กับการตรวจสอบม่านตา และเครื่องอ่านลายนิ้วมือเชิงแสงของ NECTEC รุ่น NOFPS 2 กับการตรวจสอบลายนิ้วมือ ที่รับภาพม่านตาและลายนิ้วมือเข้ามาประมวลผลเป็นลำดับภาพต่อเนื่อง ทำให้มีการใช้ทรัพยากรของคอมพิวเตอร์ด้านการคำนวณตลอดเวลา ทั้งการใช้งานตัวประมวลผล (Processor) และหน่วยความจำแบบสุ่ม (RAM) ซึ่งจะส่งผลต่อระบบของคอมพิวเตอร์ อาจจะไม่สามารถจัดการแบ่งการใช้งานทรัพยากรไปให้กับโปรแกรมอื่นที่ต้องการใช้งานได้

สรุป

วิธีการวิเคราะห์หม่านตาในโดเมนอวกาศ-ความถี่ ถูกนำเสนอขึ้นสำหรับระบบการรู้จำหม่านตา โดยการกระจายรายละเอียดบนพิกัดเชิงขั้วที่มีจุดศูนย์กลางของรูหม่านตาเป็นจุดอ้างอิง ซึ่งผลการทดลองที่ได้ทดสอบกับฐานข้อมูลของต่างชาติและของคนไทยสามารถบ่งชี้ถึงลักษณะลายเส้นแนวรัศมีมีข้อมูลที่โดดเด่นและสำคัญแตกต่างกันในแต่ละบุคคล เฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเทียบกับวิธีการแปลงเวฟเล็ทแบบเดิมพบว่าการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วสามารถให้ผลของการวิเคราะห์ที่ดีกว่า แต่เวลาที่ใช้ในการประมวลผลมากกว่าวิธีการแปลงเวฟเล็ทแบบเดิม ทั้งนี้วิธีการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้วยังคงต้องมีการปรับปรุงในส่วนของการลดผลจาก Ringing Artifact ต่อลายหม่านตา และควรมีการพิจารณาลายเส้นที่เกิดจากรายละเอียดในแนวมุมกับรายละเอียดในแนวไขว้กับแกนรัศมีและแกนมุมร่วมด้วยเป็นลักษณะเฉพาะของหม่านตา เพื่อให้ประสิทธิภาพของการรู้จำหม่านตาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ควรหาวิธีการลดเวลาของการประมวลผลในขั้นตอนต่าง ๆ โดยเฉพาะการกระจายรายละเอียดแบบเชิงขั้ว เพื่อให้สามารถนำขั้นตอนวิธีการรู้จำหม่านตานี้ไปใช้ได้ในเวลาจริง

สำหรับซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกได้ทำการพัฒนาให้ใช้งานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ด้วยการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object-Oriented Programming, OOP) ที่ทำงานตามการขัดจังหวะหรือเหตุการณ์ที่เข้ามา (Interrupt/Event driven) เพื่อรองรับการปฏิสัมพันธ์ต่อผู้ใช้งาน สำหรับการเข้าถึงข้อมูลต่าง ๆ ในระบบ รวมทั้งการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมหน่วยตรวจสอบลายนิ้วมือย่อยที่ติดตามประตูต่าง ๆ และเป็นศูนย์กลางการเก็บฐานข้อมูลหลักของระบบไบโอเมตริก โดยเป็นการติดต่อผ่านพอร์ตอนุกรมหรือพอร์ต LAN เป็นระบบเครือข่าย นอกจากนี้ภายในซอฟต์แวร์ระบบไบโอเมตริกยังมีการทำงานรองรับกระบวนการประมวลผลไบโอเมตริกจากภาพที่รับเข้ามาของหม่านตาและลายนิ้วมือสำหรับตรวจสอบบุคคล จากผลการทดลองพบว่าระบบดังกล่าวสามารถใช้งานได้จริง สามารถทำการพัฒนาต่อยอดและพัฒนาในเชิงพาณิชย์ได้ แนวทางการพัฒนาทำได้ในหลายส่วนได้แก่

1. ระบบการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบไบโอเมตริกให้มีลักษณะกระจายและสามารถรองรับการขยายตัวของจำนวนอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบไบโอเมตริกได้มากขึ้น
2. การปรับปรุงประสิทธิภาพขั้นตอนวิธีการรู้จำหม่านตาและลายนิ้วมือทั้งในด้านความถูกต้องและความเร็วในการใช้งาน
3. ปรับปรุงลักษณะการใช้งาน โดยเฉพาะอุปกรณ์รับภาพให้มีความง่ายต่อผู้ใช้ในการใช้งาน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

คณะกรรมการและอนุกรรมการบัญญัติศัพท์คอมพิวเตอร์. 2540. **ศัพท์คอมพิวเตอร์ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน**. พิมพ์ครั้งที่ 4. ราชบัณฑิตยสถาน, กรุงเทพฯ.

คณะกรรมการปรับปรุงศัพท์เทคนิคทางวิศวกรรมไฟฟ้า ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2541. **ศัพท์เทคนิควิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร**. พิมพ์ครั้งที่ 4. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

ประพนธ์ อัสวภาณวัฒน์. 2543. **Delphi Episode II เทคนิคและการพัฒนาโปรแกรมด้วยเดลไฟ**. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

ภิญญา ประภาสวัต. 2540. ภาษวิภาคและเอมบริโอวิทยา, น. 1-23. ใน อภิชาติ สิงคาลวณิช และ ญาณี เจียมไชยศรี, บรรณาธิการ. **จักษุวิทยา**. ภาควิชาจักษุวิทยา คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ.

สัจจะ จรัสรุ่งรวิธร และ จักรพงษ์ สุขประเสริฐ. 2546. **เริ่มต้นอย่างมืออาชีพด้วย Delphi 7 ฉบับสมบูรณ์**. สำนักพิมพ์อินโฟเพรส, กรุงเทพฯ.

Antonini, M. and M. Barlaud, P. Mathieu, and I. Daubechies. 1992. Image Coding Using Wavelet Transform. **IEEE Transactions on Image Processing**. Vol. 1 No. 2: 205-220.

Boles, W.W. and B. Boashah. 1998. A Human Identification Technique Using Images of the Iris and Wavelet Transform. **IEEE Transactions on Signal Processing**. Vol. 46 No. 4: 1185-1188.

Bresenham, J.E. 1977. A Linear Algorithm for Incremental Digital Display of Circular Arcs. **Communications of ACM**. Vol. 20 Issue. 2, pp.100-106.

Daugman, J.G. 1992. High Confidence Personal Identification by Rapid Video Analysis of Iris Texture. pp.50-60. **Proceedings of the IEEE 1992 International Carnahan Conference on Security Technology**. IEEE

_____. 1993. High Confidence Visual Recognition of Persons by a Test of Statistical Independence. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. Vol. 15 No. 11: 1148-1161.

_____. 1994. **Biometric Personal Identification System Based on Iris Analysis**. U.S.Patent 5,291,560.

_____. 2004. How Iris Recognition Works. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**. Vol. 14 No. 1: 21-30.

Flom, L. and A. Safir. 1987. **Iris Recognition System**. U.S.Patent 4,641,349.

Forrester, J.V., A.D. Dick., P.G. McMenemy, and W.R. Lee. 2002. **The Eye: Basic Sciences in Practice**. 2nd ed. WB Saunders, China.

Gonzalez, R.C. and R.E. Woods. 2001. **Digital Image Processing**. Second edition. Prentice-Hall, Inc., USA.

Haykin, S. 2001. **Communication Systems**. Fourth edition. John Wiley & Sons, Inc., USA.

Horapong K., S. Thainimit and V. Areekul. 2004. Iris Texture Analysis with Polar-Based Filtering: Preliminary Results. pp.250-253. **Proceedings of the First Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI) Annual Conference**. ECTI.

- Lee P. S. and H. T. Ewe. 2004. Individual Recognition Based on Human Iris Using Fractal Dimension Approach. pp.467-474. Lecture Notes in Computer Science LNCS3072. **Proceeding of International Conference on Biometric Authentication (ICB2004)**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Lim S., Lee K., Byeon O., Kim T. 2001. Efficient Iris Recognition through Improvement of Feature Vector and Classifier. **Journal of Electronics and Telecommunication Research Institute**. Vol. 23 No. 2: 61-70.
- Ma, L., T. Tan., Y. Wang and D. Zhang. 2003. Personal Identification Based on Iris Texture Analysis. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. Vol. 25 No. 12: 1519-1533.
- Mallat, S.G. 1989. A Theory of Multiresolution Signal Decomposition. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. Vol. 11 No. 7: 674-693.
- _____. 1999. **A Wavelet Tour of Signal Processing**. 2nd ed. Academic Press, UK.
- Muron, A. and J. Pospisil. 2000. The Human Iris Structure and Its Usages. **In Acta Univ. Palacki, Physica**. Vol. 39: 87-95.
- Noh S., K. Pae., C. Lee., J. Kim. 2002. Multiresolution Independent Component Analysis for Iris Identification. pp.1674-1676. Vol. 3. **Proceedings of the 2002 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications**. IEEE.
- Rao M.R., Bopardikar A.S. 1998. **Wavelet Transforms Introduction to Theory and Application**. Addison Wesley Longman, USA.

- Starck J.-L., Elad M., Donoho D.L. 2004. Redundant Multiscale Transforms and Their Application for Morphological Component Separation. **Advances in Imaging and Electron Physics. Vol. 132.**
- Sun Z., Y. Wang., T. Tan. and J. Cui. 2004. An Iris Recognition Algorithm Using Local Extreme Points. pp.418-425. Lecture Notes in Computer Science LNCS3072. **Proceeding of International Conference on Biometric Authentication (ICB2004).** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Thoosengngam P., K. Horapong., S. Thainimit and V. Areekul. 2005. A New Shape-Based Iris Recognition. pp.83-86. **Proceeding of the 2005 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI) International Conference (ECTI-CON 2005).** ECTI.
- _____. 2006. Efficient Iris Recognition using Adaptive Quotient Thresholding. pp.472-478. Lecture Notes in Computer Science LNCS3832. **Advances in Biometrics, International Conference on Biometric (ICB2006).** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Tisse C., L. Martin., L. Torres. and M. Robert. 2002. Person Identification Technique Using Human Iris Recognition. pp.294-299. **Proceeding of the 15th International Conference on Vision Interface.**
- Wildes, R.P. 1997. Iris Recognition: An Emerging Biometric Technology. pp.1348-1363. Vol. 85 No.9. **Proceeding of the IEEE.** IEEE.