



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้การจัดกลุ่มความโค้งของเส้นลายนิ้วมือ

Focal Point Detection using Ridge Curvature Clustering

นามผู้วิจัย นายศรุต รุ่งรัตนอุบล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์วุฒิพงษ์ อารีกุล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหญิง ไทยนิมิต, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กาญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้การจัดกลุ่มความโค้งของเส้นลายนิ้วมือ

Focal Point Detection using Ridge Curvature Clustering

โดย

นายศรุต รุ่งรัตนอุบล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศรุต รุ่งรัตนอุบล 2554: การตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้การจัดกลุ่มความโค้งของเส้น
ลายนิ้วมือ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์วุฒิพงษ์ อารีกุล, Ph.D. 77 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีใหม่ในการตรวจหาจุดโฟกัส หรือจุดศูนย์กลางของความโค้งของลายนิ้วมือ ซึ่งจะเป็นลักษณะเฉพาะที่เป็นเอกลักษณ์ที่สามารถกำหนดเป็นจุดอ้างอิงของลายนิ้วมือเพื่อใช้ในการลงทะเบียนลายนิ้วมือได้ โดยอัลกอริทึมการตรวจหาจุดโฟกัสใหม่นี้ได้แนวทางจากการจัดกลุ่มความโค้งของเส้นลายนิ้วมือ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์สนามทิศทางของลายนิ้วมือร่วมกับการแทนกราฟ ผลการทดลองแสดงถึงประสิทธิภาพความถูกต้องแม่นยำของอัลกอริทึมใหม่ที่เหนือกว่าอัลกอริทึมการหาจุดอ้างอิงอื่น ๆ ที่ถูกนำเสนอมาก่อนหน้านี้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในด้านความซับซ้อนของการคำนวณและระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ พบว่ามีความเหมาะสมในการนำไปใช้ทางปฏิบัติได้ สรุปได้ว่าวิธีการตรวจหาจุดโฟกัสใหม่นี้ มีประสิทธิภาพการใช้งานและเสถียรภาพที่ดี รวมทั้งการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน เหมาะสมแก่การนำมาประยุกต์ใช้กับระบบรู้จำลายนิ้วมืออัตโนมัติ สุดท้ายนี้การแทนกราฟความโค้งที่นำเสนอไปสามารถประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ อาทิเช่น การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ การเปรียบเทียบลายนิ้วมือ การทำดัชนีลายนิ้วมือต่อไปในอนาคตอันใกล้

Sarut Rungrattana-ubon 2011: Focal Point Detection using Ridge Curvature Clustering. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Vutipong Areekul, Ph.D. 77 pages.

This thesis proposes a novel algorithm to detect a focal point of fingerprint or a centroid of fingerprint curvature, which is a unique identical feature that can be used as a reference point for fingerprint registration. The new algorithms based on ridge curvature clustering approach, which obtained by directional field analysis with graph representation. From experimental result, this new approach outperforms other reference point detection schemes in literature in term of accuracy. Moreover, computational complexity and execution time are also reasonable for practical implementation. In conclusion, the new reference point algorithm obtains good performance efficiency and stability with low computational complexity and suitable for automatic fingerprint recognition system. Finally, the proposed curvature graph representation can be applied to improve performance of fingerprint enhancement, fingerprint matching, and fingerprint indexing in the near future.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพงศ์ อารีกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมหญิง ไทยนิมิต และคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสารทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนความรู้ ความเข้าใจ เนื้อหาบทเรียน คุณธรรม จริยธรรม การแก้ไขปัญหา อีกทั้งข้อคำปรึกษาต่างๆ ของ ข้าพเจ้าตลอดเวลาที่ได้ศึกษาเล่าเรียนในที่แห่งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่สาว ที่ได้ให้คำปรึกษาในการเรียน การใช้ ชีวิตประจำวัน กำลังใจ อีกทั้งช่วยเหลือและอบรมสั่งสอน ข้าพเจ้าตลอดเวลาที่ผ่านมาเป็นอย่างดี

ขอบขอบคุณ พี่สุขสันต์ จิรเชวง พี่ๆ ตลอดจนเพื่อนๆ และรุ่นน้องในห้องวิจัย KSIP Lab ทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนความรู้ ความสามัคคี ความเสียสละ ความอดทน การทำงานเป็นหมู่คณะและ ให้ข้อคิดในการทำงานกับข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบคุณห้องวิจัย KSIP Lab และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาเล่าเรียนวิชาความรู้ และเป็นที่พักพิงให้กับข้าพเจ้าตลอดเรื่อยมา

ข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ความดีหรือประโยชน์อันใดที่มีในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ทุกท่านที่ได้กล่าวมาแล้ว ใน ณ ที่นี้ให้มีความสุข และความเจริญยิ่งขึ้นต่อไป

ศรุต รุ่งรัตนอุบล

เมษายน 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	32
ผลและวิจารณ์	59
ผล	59
วิจารณ์	66
สรุปและข้อเสนอแนะ	71
สรุป	71
ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	74
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	77

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้	31
2	รายละเอียดของฐานข้อมูล FVC2000DB2 ซึ่งใช้ในการทดสอบ	58
3	พารามิเตอร์ที่ทำการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับฐานข้อมูล FVC2000DB2a	61
4	ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจุดโฟกัสโดยการวัดความคลาดเคลื่อนแบบสามเหลี่ยมกับงานวิจัยการหาจุดอ้างอิงรูปแบบอื่นๆในฐานข้อมูล FVC2000DB2a	62
5	ผลการเปรียบเทียบทิศทางอ้างอิงของจุดโฟกัสกับงานวิจัยการหาจุดอ้างอิงรูปแบบอื่นๆ ในฐานข้อมูล FVC2000DB2a	63
6	เวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนของการตรวจหาจุดโฟกัสในฐานข้อมูล FVC2000DB2a	63
7	เวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนของการตรวจหาจุดโฟกัส และผลการเปรียบเทียบงานวิจัยการหาจุดโฟกัสก่อนหน้าในฐานข้อมูล FVC2000DB2a	64

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	อุปกรณ์ตรวจวัดลายนิ้วมือในรูปแบบการใช้งานต่างๆ	5
2	แผนผังการแบบบล็อกแสดงการทำงานของระบบไบโอเมตริกโดยพิจารณาตามการใช้งานได้แก่ระบบลงทะเบียน, ระบบการยืนยัน หรือพิสูจน์ตัวตนบุคคล และระบบระบุตัวบุคคลตามลำดับ	8
3	ตัวอย่างภาพถ่ายลายนิ้วมือโบราณ ในรูปแบบต่างๆ กัน	9
4	แผนผังการไหลขั้นตอนต่างๆ ในระบบรู้จำลายนิ้วมืออัตโนมัติ	10
5	สนามทิศทางของเส้นลายนิ้วมือที่บล็อกขนาด 8×8, 16×16 และ 32×32 ตามลำดับ	13
6	จุดเอกฐานของลายนิ้วมือ วงกลมสีแดงคือจุดแกน และสามเหลี่ยมสีเขียวคือจุดสามเหลี่ยม	14
7	รอยแตก, รอยแยก หรือรอยแผลเป็นที่เกิดขึ้นบนลายนิ้วมือ	15
8	การจำแนกลายนิ้วมือโดยใช้คุณลักษณะระดับมหภาค หรือระดับที่ 1 (ก) วงซ้าย (Left loop), (ข) วงขวา (Right Loop), (ค) ก้นหอย (Whorl), (ง) กระจง (Arch) และ (จ) กระจงสูง (Tented Arch) โดยสัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยมคือจุดแกน และจุดสามเหลี่ยมตามลำดับ	15
9	มินูเทียร์แสดงด้วยจุดสีดำ และรูขุมขนคือวงกลมที่วางตัวบนเส้นลายนิ้วมือ	16
10	ตัวอย่างการคำนวณหาค่าบ่งชี้พอยน์แคร์	18
11	ตัวอย่างผลการตรวจหาจุดเอกฐานจำแนกตามประเภทของลายนิ้วมือที่ได้จากระเบียบวิธีการบ่งชี้พอยน์แคร์ ซึ่งได้ทำการปรับปรุงแล้ว โดย Bazen และ Gerez (2002)	18
12	การตรวจหาจุดเอกฐานโดยการตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสนาม (Park <i>et al.</i> , 2005)	19
13	ตัวอย่างผลการหาจุดแกน โดยใช้ตัวกรองเชิงซ้อนที่ความละเอียดต่างๆกัน นำเสนอโดย Nilsson และ Bigun (2005)	19

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	การตรวจหาจุดเอกฐาน โดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามทิศทาง (MASK) (Cappelli <i>et al.</i> , 1999)	20
15	การตรวจหาจุดแกน โดยใช้การลู่อู่เข้า โดยเส้นตั้งฉากกับสนามทิศทาง (Huvanandana <i>et al.</i> , 2000)	21
16	การหาจุดอ้างอิงโดยใช้วิธี “Local Axial Symmetry Field, LAS” (Liu <i>et al.</i> , 2006)	22
17	จุดโฟกัสซึ่งนำเสนอโดย Rerkrai และ Areekul (2000)	22
18	จุดโฟกัสโดยวิธีการของ Rerkrai และ Areekul (2000)	24
19	แผนผังการไหลแสดงการทำตรวจหาจุดโฟกัส ซึ่งนำเสนอโดย Areekul <i>et al.</i> (2006)	25
20	ตัวอย่างการหาจุดโฟกัสซึ่งนำเสนอโดย Areekul <i>et al.</i> (2006)	26
21	ตัวอย่างโฟกัสโดยวิธีการของ Areekul <i>et al.</i> (2006)	27
22	แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมขนาดบล็อก 16×16 และภาพตัวอย่างการใช้งาน	28
23	ตัวอย่างผลการตรวจหาจุดโฟกัสที่เกิดขึ้น เมื่อภาพลายนิ้วมือที่ไม่สมบูรณ์	29
24	ตัวอย่างการกระจายของจุดตัดในกรณีที่อาณาบริเวณสนามทิศทางสับสน หรือเป็นเส้น(ก) สนามทิศทางที่มีลักษณะทิศทางที่ค่อนข้างขนานกัน, (ข) การกระจายของจุดตัดซึ่งมีการกระจายสูงมาก และ (ค) วงกลมสีดำแสดงความคลาดเคลื่อนของจุดกึ่งกลางเฉลี่ย ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายสูง ไม่ลู่เข้าไปสู่จุดเดียวกัน	29
25	ตัวอย่างการกระจายตัวของจุดตัดของทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ โดยแต่ละวงมาจากลายนิ้วมือหนึ่งภาพ	32
26	แผนผังการไหลแสดงการตรวจหาจุดโฟกัส	33
27	แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการคำนวณหาตำแหน่งจุดโฟกัสจากทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ	36
28	แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการคำนวณหาจุดตัดแบบเฉพาะที่	37
29	การคำนวณจุดตัดของกลุ่มทิศทางลายนิ้วมือ	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	ขั้นตอนการพิจารณาการคำนวณจุดตัดของเส้นลายนิ้วมือแบบท้องถิ่น (ก) ขั้นตอนการติดตามเส้นลายนิ้วมือแบบบล็อก (ข) ขั้นตอนการคำนวณหาจุดตัด และ (ค) ขั้นตอนการเลือกจุดตัดอ้างอิง	40
31	ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ภาพลายนิ้วมือโดยสี่แต่ละสี่แสดงทิศทาง (ก) ภาพลายนิ้วมือฐานข้อมูล FVC2000Db2: 60_1 (ข) การแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือด้วยสนามทิศทาง (OF) (ค) การแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือด้วยทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ (GF)	41
32	แผนผังการไหลแบบบล็อกแสดงการหาการแทนกราฟของการแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือ	42
33	(ก) ตัวอย่างการการควอนไทซ์ทิศทางของทิศทางตั้งฉากของลายนิ้วมือโดยแบ่งเป็น 12 ระดับ (ข) พื้นที่ของลายนิ้วมือเมื่อทำการแบ่งตามระดับทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ	43
34	ตัวอย่างการคำนวณลักษณะจากโครงสร้างลายนิ้วมือในฐานข้อมูลต่างๆ หลัก (ก) ภาพลายนิ้วมือต้นฉบับ หลัก (ข) ภาพการแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือด้วยทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ และหลัก (ค) ภาพลักษณะเด่นของลายนิ้วมือจากการแทนกราฟ โดยแต่ละแถวเป็นลายนิ้วมือจากฐานข้อมูล FVC2000db2 FVC2002db1 FVC2002db2 FVC2004db1 และ NIST4	47
35	บริเวณเส้นลายนิ้วมือที่สำคัญที่สนับสนุนการสร้างจุดตัดเพื่อตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัส	48
36	(ก) ภาพลายนิ้วมือ (FVC2000Db2a 60_1) (ข) แบบจำลองลายนิ้วมือด้วยการแทนกราฟ (ค) เส้นสี่แสดงรอยต่อแบบทิศทางต่อเนื่อง (สีดำ) และทิศทางตรงกันข้าม (สีแดง) (ง) การแทนกราฟของลายนิ้วมือเมื่อพิจารณาเฉพาะโหนดที่มีทิศทางแบบต่อเนื่อง	49
37	บริเวณพื้นที่ด้านบนของลายนิ้วมือ (Region of North Curvature)	50
38	ภาพจำลองเส้นลายนิ้วมือที่มีลักษณะการวางตัวเป็นวงกลมโดยสมบูรณ์	52

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	ค่าแฟกเตอร์แสดงความคล้ายคลึงกับเลนส์ครึ่งวงกลมในอาณาบริเวณที่ลักษณะของสนามทิศทางแตกต่างกัน	53
40	ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการตรวจหาจุดโฟกัส	54
41	การวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสด้วยวิธีการสามเหลี่ยมของภาพลายนิ้วมือของบุคคลคนเดียวกัน (ก) ลายนิ้วมือที่ 1 และ (ข) ลายนิ้วมือที่ 2	56
42	ตัวอย่างจุดโฟกัสที่ทำการตรวจหาในฐานข้อมูล FVC2000DB2a	65
43	ตัวอย่างการกระจายตัวของจุดตัดจากลายนิ้วมือประเภทกระโจມ (ก) สีแดง แสดงถึงบริเวณเส้นลายนิ้วมือที่มีจุดตัดตัดกันบนบริเวณพื้นที่สีฟ้า (ข) แสดงถึงพื้นที่สีฟ้าซึ่งมีบริเวณที่เล็กกว่าจากการตัดกันของจุดตัดแบบเฉพาะที่	65
44	ตัวอย่างสนามทิศทางของภาพลายนิ้วมือที่มีคุณภาพต่ำ	67
45	ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือที่ไม่สมบูรณ์	68
46	จุดโฟกัสที่เกิดขึ้นในนิ้วเดียวกันเมื่อภาพลายนิ้วมือมีความผิดเพี้ยนยืดหยุ่นแตกต่างกัน	69
47	ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือซึ่งไม่สามารถหาตำแหน่งของจุดโฟกัสได้ เนื่องจากข้อมูลภาพลายนิ้วมือไม่สมบูรณ์	69

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

DNA	=	Deoxyribonucleic Acid
PCA	=	Principal Component Analysis
STFT	=	Short-time Fourier Transform
DCT	=	Discrete Cosine Transform
PCNN	=	Pulse Coupled Neuron Network
FOMFE	=	Fingerprint Orientation Model Based on 2D Fourier Expansion
ROI	=	Region of Interest
ROF	=	Region of Filtering
FAR	=	False Accept Rate
FRR	=	False Reject Rate
EER	=	Equal Error Rate
FVC	=	Fingerprint Verification Competition
NIST	=	National Institute of Standards and Technology
Avg.	=	Average
DF	=	Directional Field
GF	=	Gradient Field

การตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้การจัดกลุ่มความโค้งของเส้นลายนิ้วมือ

Focal Point Detection using Ridge Curvature Clustering

คำนำ

ระบบไบโอเมตริก หรือระบบชีวมาตร เป็นการระบุตัวบุคคลโดยใช้ลักษณะทางชีวภาพที่แตกต่างกันของแต่ละบุคคลเป็นตัวชี้วัด หรือข้อมูลวิทยาศาสตร์เชิงชีวภาพที่เป็นเอกลักษณ์ในแต่ละบุคคลติดตัวอยู่กับบุคคลนั้นเสมอ ซึ่งถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากในปัจจุบัน เนื่องจากระบบดังกล่าวนี้จะนำข้อมูลของผู้ใช้งานซึ่งเป็นข้อมูลทางกายภาพ อาทิเช่น ลายนิ้วมือ (Fingerprint), ลายม่านตา (Iris), ลายมือ (Hand writing), เสียง (Voice) หรือรหัสพันธุกรรม (DNA) เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้ต้องเป็นข้อมูลที่เป็นเอกลักษณ์ (Unique) และสามารถระบุตัวบุคคลได้ (Identification) ในผู้ใช้งานแต่ละคน และนอกจากนี้ข้อมูลดังกล่าวนี้ต้องไม่สามารถสร้างหรือปลอมแปลงได้ง่ายด้วยเหตุนี้นักวิจัยจึงได้คิดค้นแนวทางที่จะนำเอาข้อมูลดังกล่าว มาประยุกต์ใช้กับสายงานบางประเภท ซึ่งในปัจจุบันงานที่เหมาะสม และมีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางได้แก่ การระบุตัวบุคคล (Identification), ยืนยันตัวบุคคล (Verification) หรือแม้แต่การกำหนดสิทธิอนุญาตกับตัวบุคคล (Authorization) เพื่อให้สามารถติดต่อ หรือทำงานที่เกี่ยวข้องกับระบบใดระบบหนึ่งได้ตามที่ต้องการ ในอดีตเมื่อมีการติดต่อหรือทำธุรกรรมต่างๆ โดยทั่วไปจะใช้ข้อมูลที่มนุษย์สร้างขึ้นมาเองได้แก่ บัตรประจำตัวประชาชน, บัตรประจำตัวพนักงาน, รหัสผ่าน หรือตราสัญลักษณ์ต่างๆ เป็นต้น แต่เมื่อมีการประยุกต์โดยการนำข้อมูลทางชีวภาพดังกล่าวเข้ามาใช้ในทางปฏิบัติจริงแล้ว ระบบดังกล่าวนี้จึงถูกเรียกขึ้นใหม่ว่า ระบบไบโอเมตริก (Biometric System) หรือระบบชีวมาตร

ลายนิ้วมือถือเป็นไบโอเมตริกที่ได้รับความนิยมสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับไบโอเมตริกประเภทอื่น เนื่องจากเป็นระบบที่มีความสะดวกสบาย ใช้งานง่าย และนอกจากนี้ยังมีความปลอดภัยสูง เมื่อเทียบกับระบบไบโอเมตริกประเภทอื่นๆ ระบบรู้จำลายนิ้วมือประกอบไปด้วยกระบวนการหลักที่สำคัญ ได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Enhancement), การเปรียบเทียบภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Matching) และการจำแนกภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Classification) กระบวนการดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องใช้คุณลักษณะเด่นของข้อมูลในภาพรวม (Global Features) มาช่วยในการปฏิบัติงาน ตัวอย่างคุณลักษณะเด่นของข้อมูล อาทิเช่น จุดมินูเทียร์ เป็นต้น เมื่อพิจารณาข้อมูลต่างๆเมื่อนำมาจัดเก็บในระบบข้อมูลเหล่านั้นจะถูกจัดสร้างขึ้นเป็น

ฐานข้อมูลของระบบ ในกรณีที่ระบบมีปริมาณข้อมูลเพิ่มมากขึ้น ระบบดังกล่าวย่อมมีฐานข้อมูลที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้เองจะเกิดปัญหาที่ตามมาในเรื่องของประสิทธิภาพทางด้านความแม่นยำที่ลดลง รวมทั้งระยะเวลาในการสืบค้นข้อมูลที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นเรื่องที่หลีกเลี่ยงได้ยาก การลงทะเบียนลายนิ้วมือ (Fingerprint Registration) การทำดัชนีหรือจัดเรียงอันดับข้อมูลลายนิ้วมือ (Fingerprint Indexing), การเรียกข้อมูลหรือการทำเหมืองข้อมูลลายนิ้วมือ (Fingerprint Retrieving or Data Mining) และการจำแนกข้อมูลลายนิ้วมือ (Fingerprint Classification) วิธีการต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้คุณลักษณะเด่น ที่เกิดจากข้อมูลนั้นๆมาเพื่อช่วยให้ระบบนั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมต่อความต้องการในการใช้งานในปัจจุบัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงถูกนำเสนอขึ้นเพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีการตรวจหาจุดโฟกัส ให้มีประสิทธิภาพความแม่นยำที่สูงขึ้น และเหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้จริงในชีวิตประจำวันและต่อไปในอนาคตอันใกล้

วัตถุประสงค์

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาขั้นตอนในการหาคณลัษณะเด่นที่เป็นจุด โฟกัสหรือจุดรวมศูนย์ของลายนิ้วมือ ซึ่งนับว่าเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่ง และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่างๆในระบบรู้จำลายนิ้วมือ โดยวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. เพื่อพัฒนาขั้นตอนการหาลัษณะเด่นมหภาคของลายนิ้วมือให้มีประสิทธิภาพที่ดี โดยเฉพาะพัฒนาลัษณะเด่นของส่วน โคง้จากโครงสร้างลายนิ้วมือ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงกับฐานข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ได้ในระบบรู้จำลายนิ้วมือ
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำของขั้นตอนวิธีการหาตำแหน่งจุดโฟกัสของลายนิ้วมือ โดยเฉพาะประเภทกระโجمหรือกระโجمสูง

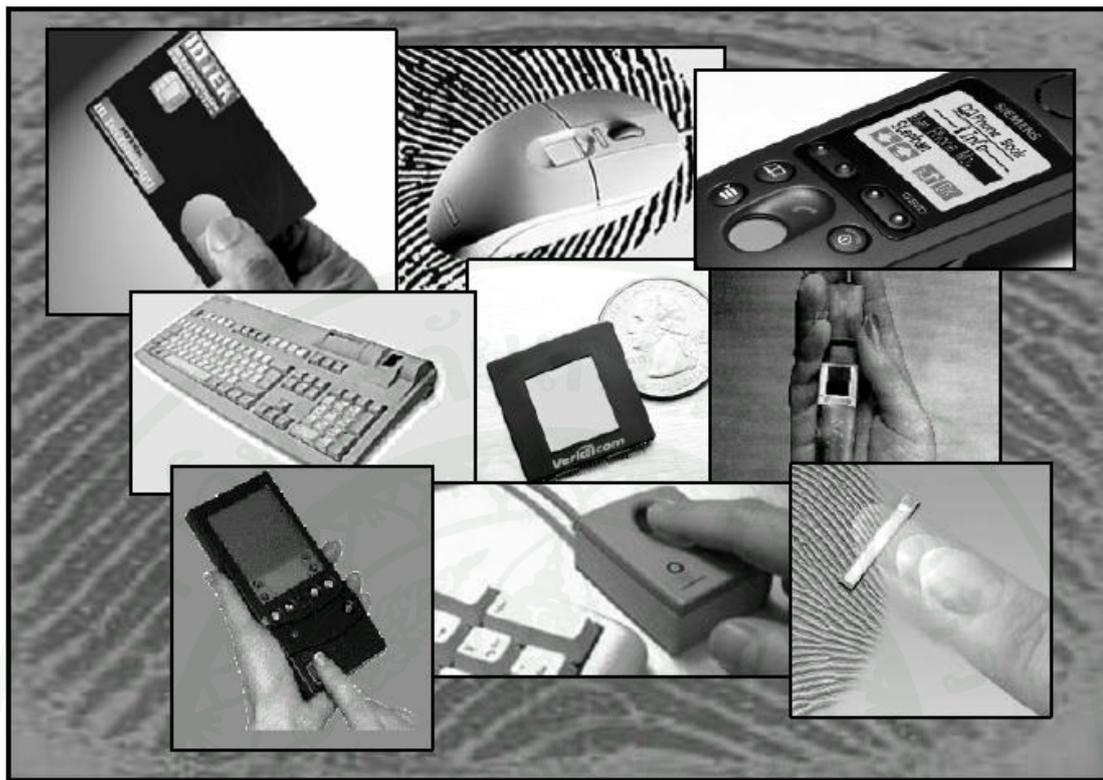
การตรวจเอกสาร

ระบบไบโอเมตริก

ระบบไบโอเมตริก (Biometric System) คือ ระบบการรู้จำตัวบุคคล ซึ่งมีรูปแบบในการตรวจหา และประมวลผลข้อมูลที่สำคัญ จากข้อมูลเฉพาะที่เป็นคุณลักษณะเด่นทางกายภาพ หรือคุณลักษณะเด่นทางพฤติกรรมในแต่ละบุคคล

จากนิยามของระบบไบโอเมตริกดังกล่าวมาข้างต้น จะพบว่าสิ่งที่สำคัญที่สุดในการออกแบบระบบไบโอเมตริกในทางปฏิบัติจริงคือ ระบบทำการรู้จำบุคคลได้ด้วยวิธีการใด เมื่อพิจารณารูปแบบการดำเนินการในระบบไบโอเมตริกที่ใช้ในทางปฏิบัติ พบว่าประกอบไปด้วย การค้นหาคุณลักษณะเด่นที่สำคัญของข้อมูลชีวภาพ, การเปรียบเทียบคุณลักษณะเด่นกับข้อมูลชีวภาพที่จัดเก็บอยู่ในฐานข้อมูล และการเปรียบเทียบข้อมูลชีวภาพที่เป็นคุณลักษณะเด่นเหล่านั้น ดังนั้นรูปแบบการดำเนินการทางไบโอเมตริกโดยทั่วไปแล้ว เมื่อพิจารณาในทางปฏิบัติจริงสามารถแบ่งรูปแบบดังกล่าว เป็นหัวข้อต่าง ๆ 4 หัวข้อหลักได้แก่ ส่วนการตรวจวัด ส่วนการประเมินคุณภาพ และการค้นหาคุณลักษณะเด่น ส่วนการเปรียบเทียบ และการตัดสินใจ และส่วนที่เกี่ยวข้องฐานข้อมูลของระบบ ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ส่วนการตรวจวัด (Sensor Module) พิจารณาอุปกรณ์ในการตรวจวัดที่ใช้ในระบบไบโอเมตริก การเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดให้มีความเหมาะสม ต้องพิจารณาตามรูปแบบของตัวบ่งชี้ทางไบโอเมตริก อาทิเช่นถ้าต้องการรับข้อมูลของลายนิ้วมือ อุปกรณ์ที่ใช้จะต้องมีลักษณะเป็นหน้าสัมผัสที่รองรับลายนิ้วมือ และเข้าถึงความแตกต่างของส่วนที่เป็นเส้นลายนิ้วมือ และร่อง หรืออาณาบริเวณที่ไม่ใช่ลายนิ้วมือได้อย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ตรวจวัดลายนิ้วมือโดยใช้แสง (Optical Sensor) ซึ่งมีลักษณะการทำงานโดยใช้การตกกระทบของแสงระหว่างหน้าสัมผัสของลายนิ้วมือไปยังหน่วยอุปกรณ์รับภาพผ่านปริซึม จะพบว่าอุปกรณ์ดังกล่าว สามารถดึงข้อมูลที่เป็นลักษณะเด่นของลายนิ้วมือได้อย่างมีประสิทธิภาพ คงทนต่อการใช้งานเนื่องจากหน้าสัมผัสเป็นปริซึม แต่มีปัญหาเรื่องต้องทำความสะอาดหน้าสัมผัส แสงรบกวนจากภายนอก และลักษณะการวางนิ้วที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของลายนิ้วมือ ดังนั้นการเลือกอุปกรณ์ตรวจวัดที่เหมาะสมนับได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาในระบบไบโอเมตริก



ภาพที่ 1 อุปกรณ์ตรวจวัดลายนิ้วมือในรูปแบบการใช้งานต่างๆ

ที่มา: Maltoni *et al.* (2009)

2. ส่วนการประเมินคุณภาพ และการค้นหาคุณลักษณะเด่น (Quality Assessment and Feature Extraction) สิ่งแรกที่ต้องพิจารณาคือคุณภาพ และความเหมาะสมของข้อมูลไบโอเมตริกที่ได้มาจากอุปกรณ์ตรวจวัดนั้นๆ ว่ามีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการดำเนินการอื่นๆต่อไปหรือไม่ โดยทั่วไปแล้วข้อมูลที่ได้มาจะถูกนำมาปรับปรุงเพื่อเพิ่มระดับคุณภาพให้ดีขึ้น แต่ในบางครั้งถ้าข้อมูลมีคุณภาพต่ำมาก (Poor Quality) จนไม่สามารถปรับปรุงให้คุณภาพของข้อมูลอยู่ในระดับที่สามารถนำมาใช้งานได้ อาจต้องทำการคัดกรองข้อมูลนั้นออก และไม่ดำเนินการใดๆต่อไป สำหรับข้อมูลที่มีระดับคุณภาพที่ดี จะนำมาทำการค้นหาคุณลักษณะเด่นเพื่อนำมาจัดเก็บเป็นรูปแบบมาตรฐานหรือเทมเพลต (Template) ลงในฐานข้อมูล เพื่อนำไปใช้งานในการทวนสอบหรือระบุตัวบุคคลต่อไป

3. ส่วนการจับคู่ และการตัดสินใจ (Matching and Decision-Making Module) ในขั้นตอนนี้จะนำคุณลักษณะเด่นที่ได้จากไบโอเมตริกเข้ามาในระบบ มาเปรียบเทียบกับคุณลักษณะเด่นที่เก็บไว้ในฐานข้อมูล เพื่อประเมินผลลัพธ์ในรูปแบบที่เป็นคะแนนของการจับคู่ (Matching Score) โดยการให้คะแนนของคุณลักษณะเด่นนั้น จะขึ้นอยู่กับการประเมินคุณภาพของคุณลักษณะเด่นในหัวข้อก่อนหน้า เมื่อพิจารณาผลการจับคู่ของข้อมูลใดๆ สองข้อมูล การตัดสินใจว่าข้อมูลข้อมูลไบโอเมตริกที่นำเข้ามาเป็นข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูลหรือไม่ จะพิจารณาจากผลคะแนนของการจับคู่ในกลุ่มต่างๆของการเปรียบเทียบ

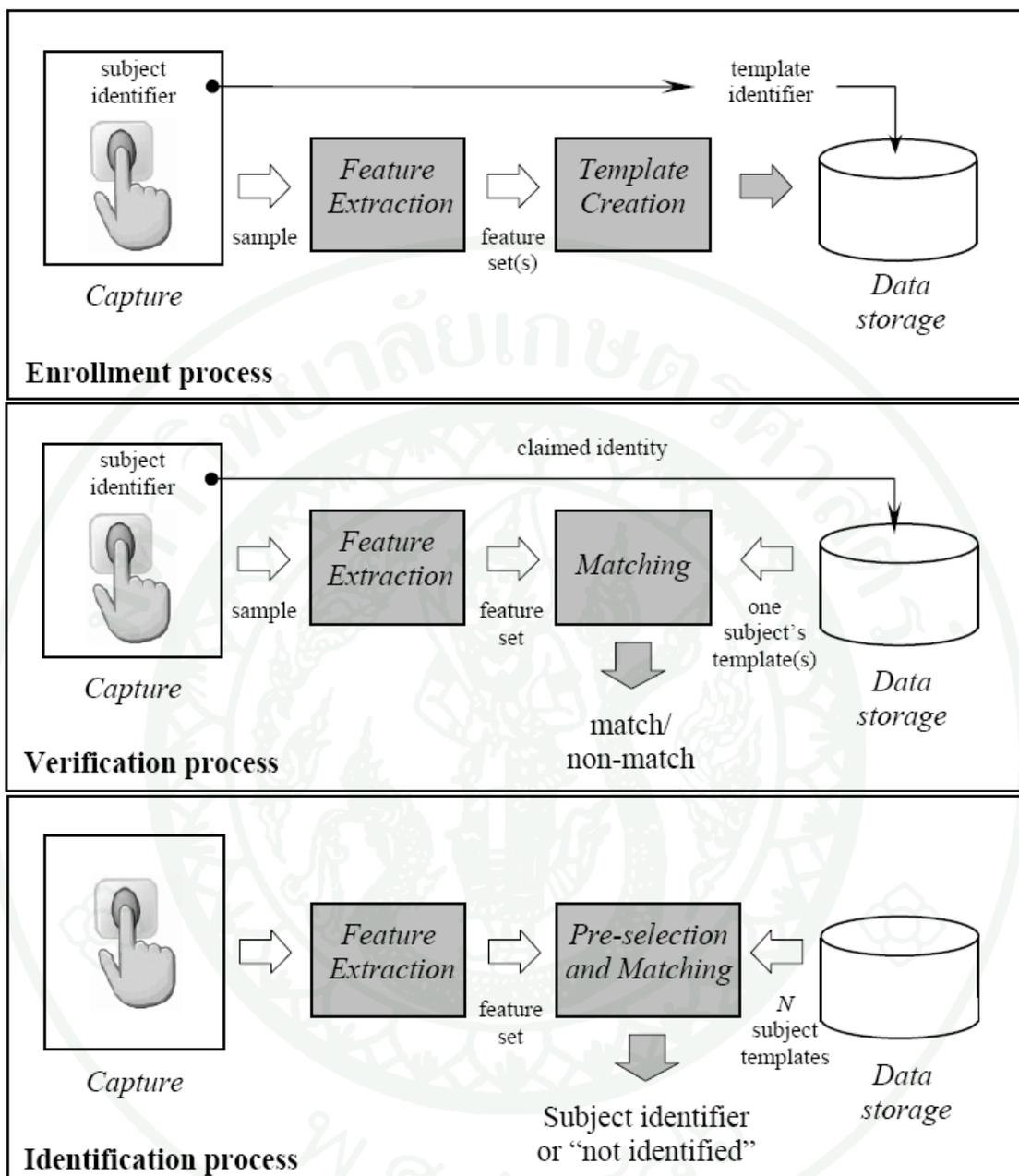
4. ส่วนฐานข้อมูลระบบ (System Database Module) ส่วนนี้มีหน้าที่จัดเก็บข้อมูลต่างๆในระบบไบโอเมตริก พิจารณาขั้นตอนวิธีขณะที่มีการลงทะเบียนข้อมูล (Enrollment) ข้อมูลในส่วนที่เป็นคุณลักษณะเด่นที่สำคัญ จะถูกดำเนินการค้นหาเพื่อทำการจัดเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูลและอุปกรณ์บางชนิด ยกตัวอย่างเช่นการเก็บข้อมูลลายนิ้วมือลงในบัตรประชาชน หรือการเก็บข้อมูลลายนิ้วมือในฐานทะเบียนข้อมูลประชาชน เป็นต้น

เมื่อพิจารณาถึงการนำระบบไบโอเมตริกมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ พบว่ารูปแบบการดำเนินการทางไบโอเมตริกดังที่กล่าวมาในข้างต้นนั้น แบ่งออกเป็นสองระบบหลักๆตามลักษณะการทำงานได้แก่ ระบบยืนยัน สอบทวน หรือพิสูจน์ตัวตนบุคคล (Verification System) และระบบระบุตัวตนบุคคล (Identification System) ซึ่งแต่ละระบบมีรายละเอียดที่น่าสนใจดังต่อไปนี้

1. ระบบยืนยัน สอบทวนหรือพิสูจน์ตัวตนบุคคล คือ ระบบที่ทำการตรวจสอบข้อมูลที่ได้จากตัวบ่งชี้ทางไบโอเมตริกของบุคคลใดบุคคลหนึ่งที่สนใจ เทียบกับข้อมูลของบุคคลนั้นที่ถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล ตัวอย่างระบบที่มีการใช้งานจริง อาทิเช่น การใช้เลขรหัสระบุตัวตนบุคคล (PIN, Personal Identification Number) ชื่อผู้ใช้งาน (Username) หรือรหัสผ่าน (Password) เป็นต้น ระบบเหล่านี้มีลักษณะการเปรียบเทียบแบบ 1 ต่อ 1 (1-to-1 Matching) เพื่อตรวจสอบ และใช้ในการอ้างสิทธิ์ว่าเป็นจริง หรือเป็นเท็จเท่านั้น (ตัวอย่างเช่น ข้อมูลลายนิ้วมือนี้เป็นของนายสมชายหรือไม่ หรือชิ้นส่วนที่มีรหัสพันธุกรรมในสถานที่เกิดนี้เหตุเป็นของนายสมปองหรือไม่ เป็นต้น) ระบบการยืนยัน หรือพิสูจน์ตัวตนบุคคลเป็นที่นิยม เพราะเป็นการรู้จำเชิงบวก (Positive Recognition) เนื่องจากมีเป้าหมายหลักคือป้องกันการใช้งานที่เกิดจากบุคคลหลายคนใช้เอกลักษณ์ หรือคุณลักษณะเด่นที่เหมือนกันเท่านั้นระบบไม่สามารถระบุได้ว่าข้อมูลที่ได้รับมาเป็นของใคร จึงไม่ส่งผลกระทบ และสร้างความเสียหายต่อผู้ใช้งานมากนัก

2. ระบบระบุตัวบุคคล คือ ระบบที่ทำการรู้จำบุคคลโดยการสืบค้นเทมเพลทของข้อมูลทั้งหมดที่จัดเก็บอยู่ในฐานข้อมูล ดังนั้นระบบนี้มีลักษณะการเปรียบเทียบแบบ 1 ต่อ N (1-to-many Matching) เพื่อที่จะระบุตัวบุคคลดังกล่าว (ระบบจะล้มเหลว หรือแสดงความผิดพลาดในกรณีที่ผู้ใช้งานไม่ได้ทำการลงทะเบียนไว้กับระบบ) ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการทราบว่าลายนิ้วมือนี้เป็นของใคร ต้องทำการเก็บข้อมูลนั้นมาตรวจสอบกับข้อมูลทั้งหมดในฐานข้อมูลเพื่อระบุว่าลายนิ้วมือนี้ดังกล่าวเป็นของบุคคลใดในฐานข้อมูลเป็นต้น ระบบการระบุตัวบุคคลอาจกล่าวได้ว่าเป็นระบบการรู้จำเชิงลบ (Negative Recognition) เนื่องจากมีการระบุว่าบุคคลดังกล่าวเป็นใคร ซึ่งเป้าหมายของการรู้จำเชิงลบนั้นมีขึ้นเพื่อใช้ในการป้องกันบุคคลใดๆก็ตาม ที่ต้องการระบุตัวเองในหลายๆรูปแบบ รวมทั้งการค้นหามูลค่าในทางนิติวิทยาศาสตร์ด้วย

พิจารณาแผนผังแบบบล็อกของระบบลงทะเบียน ระบบยืนยันหรือพิสูจน์ตัวบุคคล และระบบระบุตัวบุคคลดังภาพที่ 2

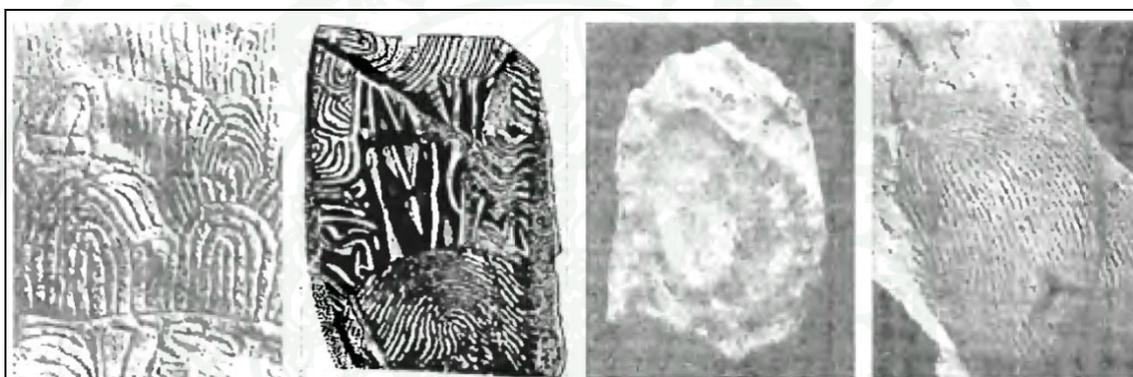


ภาพที่ 2 แผนผังการแบบบล็อกแสดงการทำงานของระบบไบโอเมตริกโดยพิจารณาการใช้งานได้แก่ระบบลงทะเบียน, ระบบการยืนยัน หรือพิสูจน์ตัวตน และระบบระบุตัวตนตามลำดับ

ที่มา: Maltoni *et al.* (2009)

ระบบรู้จำลายนิ้วมือ

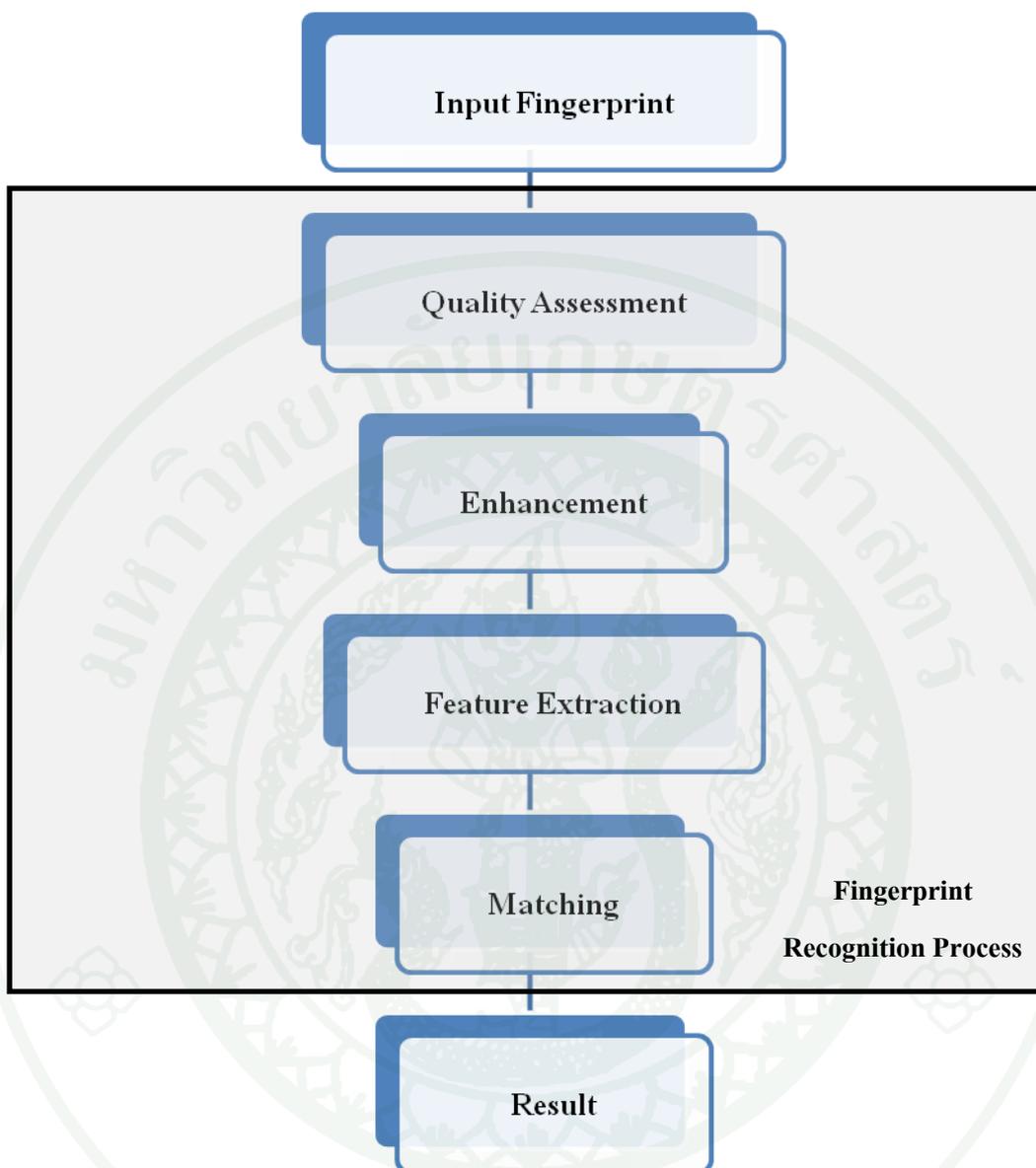
ลายนิ้วมือของมนุษย์ในอดีต ถูกค้นพบโดยนักโบราณคดี และนักประวัติศาสตร์เป็นจำนวนมากดังแสดงในภาพที่ 3 ถึงแม้ว่าการค้นพบลายนิ้วมือในอดีตจะเป็นหลักฐานบ่งชี้รูปแบบการดำรงชีวิตในอดีตได้บางส่วน แต่ในทางวิทยาศาสตร์แล้วยังไม่มีหรือนำมาวิเคราะห์หรือใช้งานโดยเจตนา จนกระทั่งในปลายศตวรรษที่ 16 การวิเคราะห์ลายนิ้วมือจึงได้ถือกำเนิดขึ้น ในปี ค.ศ. 1684 โรงงานแปรรูปในประเทศอังกฤษ ได้ตีพิมพ์รายงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับเส้นลายนิ้วมือ (Ridge) ร่องของลายนิ้วมือ (Furrow) และรูขุมขน (Pores) ที่อยู่บนลายนิ้วมือ



ภาพที่ 3 ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือโบราณในรูปแบบต่างๆกัน

ที่มา: Maltoni *et al.* (2009)

โดยส่วนประกอบต่างๆ ของลายนิ้วมือนั้นสามารถนำมาใช้เพื่อระบุตัวบุคคลแต่ละคนได้ ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการต่างๆ ทั้งหมด 4 ขั้นตอน ดังนี้



ภาพที่ 4 แผนผังการไหลขั้นตอนต่างๆ ในระบบรู้จำลายนิ้วมืออัตโนมัติ

1. การวัดคุณภาพของภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Quality Assessment) หลังจากที่ได้ทำการเก็บข้อมูลลายนิ้วมือจากอุปกรณ์ตรวจวัดแล้ว ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งเข้ามาในกระบวนการนี้เป็นกระบวนการแรก เพื่อประมวลผลว่าภาพลายนิ้วมือที่ได้รับมีความเหมาะสมที่จะนำเข้าสู่กระบวนการถัดไปหรือไม่ มีความน่าเชื่อถือมากหรือน้อยเพียงใดถ้ากระบวนการถัดไปจะนำไปใช้ ถ้าข้อมูลที่ได้มีคุณภาพที่ต่ำมาก อาจทำการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือก่อน แล้วจึงนำมาประเมินค่าอีกครั้งก็สามารถทำได้

2. การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Enhancement) ขั้นตอนนี้จะปรับปรุงภาพให้มีคุณภาพที่ดี ปรับปรุงเส้นและร่องลายนิ้วมือให้มีความชัดเจนและง่ายต่อการตรวจหาคุณลักษณะเด่นต่างๆ ในกระบวนการถัดไป

3. การตรวจหาคุณลักษณะเด่น (Fingerprint Feature Extraction) เป็นการตรวจหาคุณลักษณะเด่นของลายนิ้วมือเพื่อบันทึกจัดเก็บลงในฐานข้อมูลในขณะทำการลงทะเบียน หรือนำไปเปรียบเทียบกับงานยืนยันตัวตนบุคคล หรือ การระบุตัวตน

4. การจับคู่ลายนิ้วมือ (Fingerprint Matching) กระบวนการเปรียบเทียบคุณลักษณะที่ได้กับข้อมูลที่ถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล ผลลัพธ์จากการจับคู่จะออกมาในลักษณะของคะแนนความคล้ายคลึงซึ่งต้องนำไปพิจารณาเพื่อทำการตัดสินใจต่อไป

คุณลักษณะเด่นของลายนิ้วมือ

คุณลักษณะเด่นของลายนิ้วมือ คือลักษณะต่างๆที่เกิดขึ้นของลายนิ้วมือซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ให้เกิดความแตกต่างในลายนิ้วมือที่แตกต่างกัน และคุณลักษณะนั้นๆทำให้ลายนิ้วมือนั้นเหมาะสมที่จะเป็นตัวบ่งชี้ทางไบโอเมตริก โดยทั่วไปแล้วคุณลักษณะเด่นของลายนิ้วมือ จะแบ่งระดับการวิเคราะห์จากรายละเอียดที่เกิดขึ้นตามลักษณะการมองเห็นด้วยตาของคน คุณลักษณะที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน จะถูกจัดให้อยู่ในระดับมหภาค หรือระดับที่ 1 (Global level, 1st Level), คุณลักษณะที่ต้องใช้ความละเอียดในการมองมากขึ้นไปอีกจากระดับมหภาคและเป็นที่ยอมรับใช้ในการเปรียบเทียบ จะถูกกำหนดเป็นระดับมัธยภาค หรือระดับที่ 2 (Local level, 2nd Level) และระดับจุลภาค หรือระดับที่ 3 (Fine level, 3rd Level) ซึ่งเป็นระดับของคุณลักษณะที่ยากแก่การมองเห็นหรือไม่อาจมองได้ด้วยตาตามปกติ สำหรับรายละเอียดของคุณลักษณะที่เกิดขึ้นบนลายนิ้วมือ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ระดับมหภาค หรือระดับที่ 1 ที่ระดับนี้จะพิจารณาการวางตัวของเส้นลายนิ้วมือ (Ridge) เป็นหลัก ซึ่งคุณลักษณะเด่นต่างๆที่ตรวจพบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก) สนามทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ (Orientation Field, OF) คือทิศทางหลักของเส้นลายนิ้วมือในอาณานิคมต่างๆที่สนใจ นำเสนอครั้งแรกโดย Grasselli (1969) โดยการกำหนดค่าสนามทิศทางที่เกิดขึ้นจากภาพลายนิ้วมือทั้งหมดลงในเมตริกซ์ รูปแบบการคำนวณหาค่าสนามทิศทางโดยส่วนมากแล้ว จะพิจารณาลักษณะความไม่ต่อเนื่องในระดับบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยขนาดของบล็อกสามารถกำหนดหรือเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระตามความเหมาะสมของการวางตัวของเส้นลายนิ้วมือในแต่ละอาณานิคม ตัวอย่างการกำหนดขนาดของบล็อกอาทิเช่น บริเวณโดยทั่วไปที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของเส้นลายนิ้วมือไม่มากนัก อาจกำหนดให้บล็อกมีขนาด 16×16 จุดภาพ (Pixel) บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งสูงเช่นบริเวณที่เป็นจุดวกกลับของเส้นลายนิ้วมือ อาจกำหนดบล็อกให้มีขนาดเล็กลงเป็น 8×8 จุดภาพหรือบริเวณที่เป็นรอยแผลบนลายนิ้วมือซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นทิศทางที่แน่นอน อาจกำหนดบล็อกให้มีขนาดใหญ่กว่ารอยแผล เพื่อให้การประมาณค่าทิศทางเป็นไปได้ถูกต้องและเหมาะสมเป็นต้น จากนั้นทำการคำนวณหาค่าเกรเดียนต์ของภาพลายนิ้วมือหรือความเปลี่ยนแปลงของโทนีสี่ โดยพิจารณาสัดส่วนระหว่างค่าเกรเดียนต์ตามแนวแกนตั้งต่อแกนนอน (∇_y/∇_x) ค่าดังกล่าวนี้จะถูกกำหนดเป็นทิศทางหลักที่

เกิดขึ้น ณ บริเวณนั้นๆ ตัวอย่างผลลัพธ์ในการหาค่าสนามทิศทางโดยใช้บล็อกที่มีขนาดต่างๆกัน พิจารณาตามภาพที่ 5



ภาพที่ 5 สนามทิศทางของเส้นลายนิ้วมือที่บล็อกขนาด 8×8 , 16×16 และ 32×32 ตามลำดับ

สำหรับงานวิจัยที่ทำการค้นคว้าเกี่ยวกับการตรวจหาสนามทิศทางที่น่าสนใจได้แก่ การหาสนามทิศทางโดยใช้วิธีการที่เรียกว่า “ระเบียบวิธีของ Hong (Hong’s method)” ต่อจากนั้น Bazen และ Gerez (Bazen and Gerez, 2002) ได้ทำการปรับปรุงการหาสนามทิศทางให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยพิจารณาการปรับเปลี่ยนความละเอียดของบล็อก (Multiresolution Approach) ในบริเวณที่เส้นลายนิ้วมือมีการเปลี่ยนแปลงความโค้งแตกต่างกันไป และนอกจากนี้ยังทำการกำหนดค่าความแรงของสนามทิศทาง (Coherence of Directional Field) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความชัดเจนในทิศทางของเส้นลายนิ้วมือในอาณาบริเวณที่สนใจนั้นๆ วิธีการดังกล่าวทำให้การหาค่าสนามทิศทางมีความเหมาะสมใกล้เคียงกับเส้นลายนิ้วมือ และสามารถนำไปใช้ในการประเมินคุณภาพของสนามทิศทางที่เกิดขึ้นได้อย่างน่าสนใจ

ข. จุดเอกฐาน (Singular Point) คือจุดที่เกิดจากการวางตัวของเส้นลายนิ้วมือที่มีการขดหรือวนเข้าหากันจนเกิดการเปลี่ยนแปลงความโค้งที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน จุดเอกฐานลักษณะดังกล่าวจะถูกเรียกว่า “จุดแกน (Core Point)” ในที่นี้จุดโพกัสก็สามารถจัดอยู่ในรูปแบบของจุดแกนได้แม้ว่าจะไม่เหมือนกันจากนิยามของแต่ละตัว นอกจากนี้ในกรณีที่การวางตัวของลายนิ้วมือมีลักษณะวางตัวหลีกเลี่ยงออกจากกัน จุดเอกฐานดังกล่าวจะเรียกว่า “จุดสามเหลี่ยม (Delta Point)” พิจารณาตัวอย่างจุดเอกฐานของลายนิ้วมื่อดังภาพที่ 6



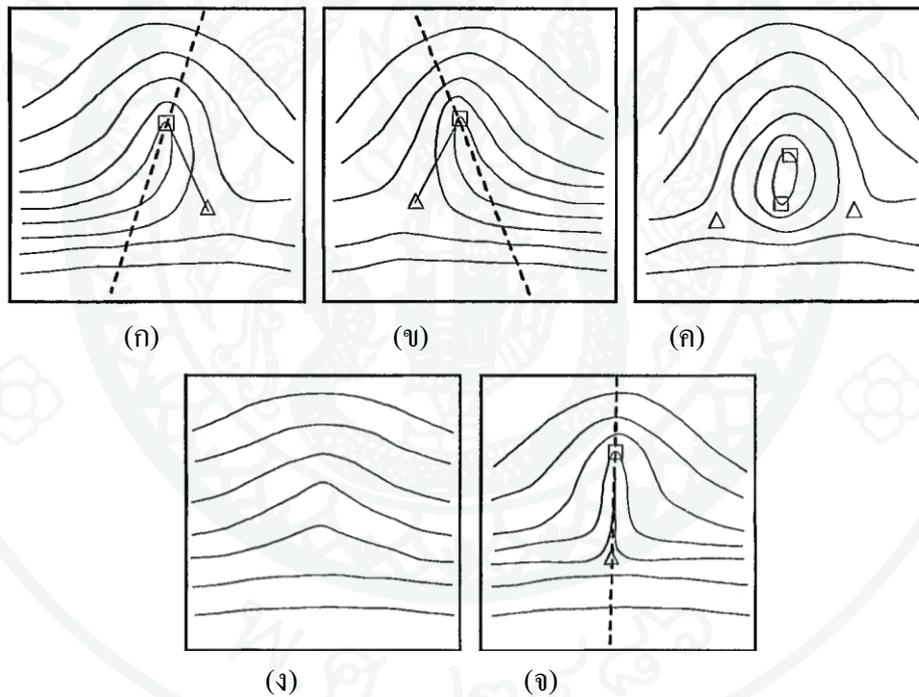
ภาพที่ 6 จุดเอกฐานของลายนิ้วมือ วงกลมสีแดงคือจุดแกน และสามเหลี่ยมสีเขียวคือจุดสามเหลี่ยม

ก. รอยแตก หรือรอยแผลเป็น (Ridge Crack, Ridge Break, or Scar) คุณลักษณะประเภทนี้มีลักษณะที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนด้วยตา ลักษณะการเกิดอาจเกิดโดยธรรมชาติ หรือเกิดขึ้นจากพฤติกรรมการใช้นิ้วในการทำกิจกรรมใดๆ อาทิเช่นการประสบอุบัติเหตุ หรือแผลเป็น เป็นต้น คุณลักษณะเด่นประเภทนี้ เริ่มมีการนำเข้ามาใช้ในระบบรู้จำลายนิ้วมือเมื่อนานมานี้ แต่อาจไม่เป็นที่นิยมเท่าใดนักเนื่องจากคุณลักษณะเด่นดังกล่าว มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามกาลเวลา ขึ้นอยู่กับลักษณะผิว ภูมิอากาศ ความชื้น การใช้งานมือ และอาจพบเห็นได้ไม่มากนัก (ในบางคนมีคุณลักษณะดังกล่าวนี้ น้อยมาก) นอกจากนี้ยังอาจแปรเปลี่ยนตามอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับภาพลายนิ้วมือ หรือแม้แต่ลักษณะการวางนิ้วมือของผู้ใช้งานขณะทำการรับภาพก็ส่งผลกระทบต่อได้เช่นเดียวกัน พิจารณาดังภาพที่ 7

เมื่อพิจารณาคุณลักษณะในระดับนี้ จะพบว่าในเบื้องต้นสามารถนำมาใช้ในการจำแนกประเภทลายนิ้วมือได้ (ตัวอย่างดังภาพที่ 8) แต่ความแม่นยำในเรื่องของรายละเอียดนั้นยังถือว่ามีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากตัวอย่างที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โครงร่างภายนอกของลายนิ้วมือ และความถี่ของเส้นลายนิ้วมือ คุณลักษณะเด่นเหล่านี้ล้วนแล้วแต่สามารถหาได้ในระดับมหภาคทั้งสิ้น



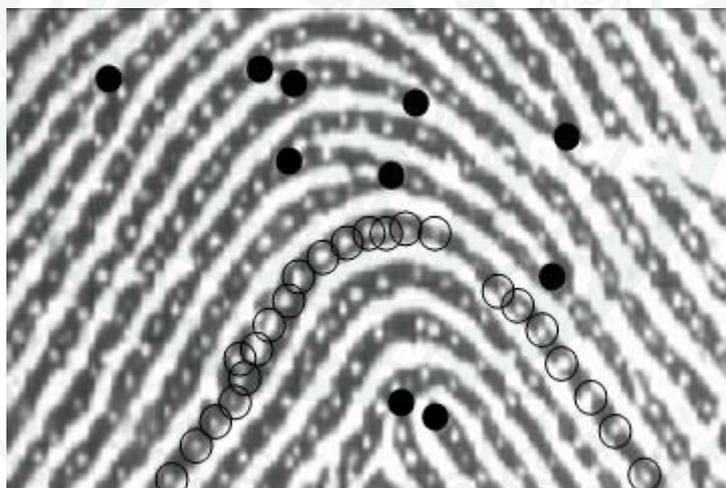
ภาพที่ 7 รอยแตก, รอยแยกหรือรอยแผลเป็นที่เกิดขึ้นบนลายนิ้วมือ



ภาพที่ 8 การจำแนกลายนิ้วมือโดยใช้คุณลักษณะระดับมหภาค หรือระดับที่ 1 (ก) วงซ้าย (Left loop), (ข) วงขวา (Right Loop), (ค) ก้นหอย (Whorl), (ง) กระโจม (Arch) และ (จ) กระโจมสูง (Tented Arch) โดยสัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยมคือจุดแกน และจุดสามเหลี่ยมตามลำดับ

2. ระดับมัธยภาค หรือระดับที่ 2 พบว่ารายละเอียดต่างๆของเส้นลายนิ้วมือที่พบในระดับนี้ได้แก่ จุดที่เส้นลายนิ้วมือมีการขาด หยุค หรือ แยกออกเป็นสองทาง ที่เรียกว่า จุดมินูเทียร์ (Minutiae) จุดนี้มีลักษณะแตกต่างกัน ในแต่ละลายนิ้วมือ เหมาะที่จะนำมาเป็นคุณลักษณะเด่นในการบ่งชี้ภาพลายนิ้วมือของตัวบุคคลได้ ถึงแม้ว่าจุดมินูเทียร์เหมาะที่จะนำมาใช้งาน แต่โดยมากแล้ว อาจพบปัญหาเรื่องคุณภาพของภาพลายนิ้วมือซึ่งทำให้ไม่สามารถตรวจพบจุดดังกล่าวได้ หรือจุดที่ได้มาเป็นข้อมูลส่วนที่เกินหรือเทียมที่เกิดจากความสกปรกของนิ้วหรือสัญญาณรบกวนต่างๆแตกต่างกันออกไปตามคุณภาพของลายนิ้วมือ

3. ระดับจุลภาค หรือระดับที่ 3 ที่ระดับนี้จะวิเคราะห์ลึกเข้าไปบนเส้นลายนิ้วมือ จะพบส่วนที่เป็น รูขุมขน (Sweat Pores) ซึ่งนับเป็นคุณลักษณะเด่นอีกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบลายนิ้วมือในรายละเอียดส่วนลึกได้เช่นเดียวกัน แต่ต้องการภาพที่มีความละเอียดถึงระดับ 1000 dpi ซึ่งทำให้ยังจำกัดการใช้งานเนื่องจากมาตรฐานการเก็บภาพลายนิ้วมือในปัจจุบันยังเก็บในระดับ 500 dpi



ภาพที่ 9 มินูเทียร์แสดงด้วยจุดสีดำ และรูขุมขนคือวงกลมที่วางตัวบนเส้นลายนิ้วมือ

ที่มา: Maltoni *et al.* (2009)

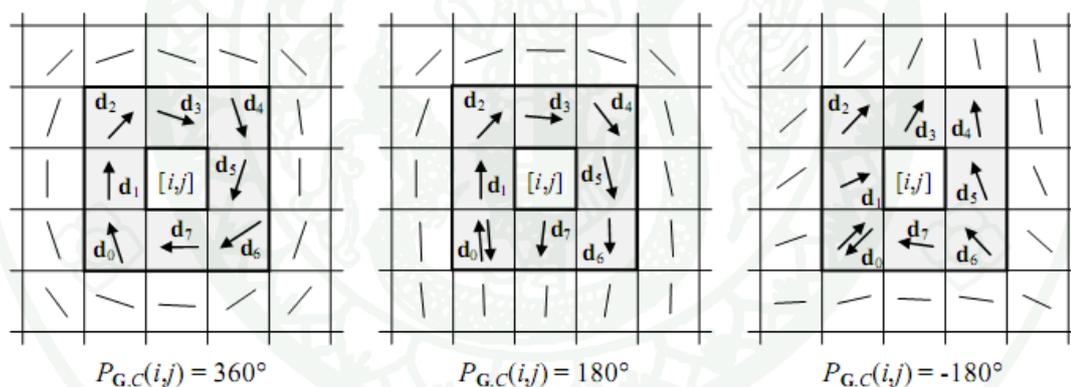
จุดอ้างอิงของลายนิ้วมือ

จุดอ้างอิงของลายนิ้วมือ คือจุดที่เปรียบเสมือนจุดศูนย์กลางของลายนิ้วมือ หรือจุดที่ใช้อ้างอิงคุณลักษณะเด่นระดับมหภาคของลายนิ้วมือได้อย่างชัดเจน พิจารณาระบบรู้อ้างอิงลายนิ้วมือที่มีฐานข้อมูลและระบบขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบการระบุตัวบุคคลนั้น ระบบที่สามารถนำมาใช้ในการปฏิบัติจริงได้นั้น ต้องเป็นระบบที่มีความรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ตามเป้าหมาย หรือวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการคำนวณหาคุณลักษณะเด่นระดับมหภาค ดังนั้นจุดอ้างอิงของลายนิ้วมือจึงนับเป็นจุดที่สำคัญ และจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบรู้อ้างอิงลายนิ้วมือ

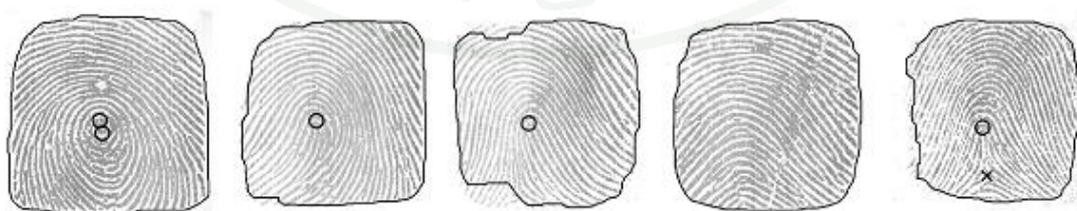
โดยทั่วไปแล้วจุดอ้างอิงของลายนิ้วมือมักจะหมายถึงจุดเอกฐานที่อยู่บนภาพลายนิ้วมือ แต่มีงานวิจัยบางส่วนที่ทำการวิเคราะห์การหาจุดอ้างอิงโดยใช้ข้อมูลอื่นที่ไม่ใช่จุดเอกฐานอาทิเช่น จุดโฟกัส หรือจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งสูงที่สุด เป็นต้น รูปแบบการหาจุดอ้างอิง และรายละเอียดในงานวิจัยต่างๆที่มีอยู่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน หากพิจารณาโดยการจำแนกตามลักษณะการตรวจหาจุดอ้างอิงแล้ว พบว่าสามารถแบ่งงานออกเป็น 3 ประเภทหลักได้แก่ การตรวจหาจุดอ้างอิงโดยใช้แนวทางการใช้แบบรูปเป็นพื้นฐาน (Pattern-based) แนวทางการพิจารณาการแบ่งส่วนเป็นพื้นฐาน (Partition-based) และแนวทางการการฉายข้อมูลเป็นพื้นฐาน (Projection-based) ซึ่งรายละเอียดการตรวจหาจุดอ้างอิงโดยการจำแนกตามแนวทางการตรวจหาทั้ง 3 ประเภทตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การตรวจหาจุดอ้างอิงโดยใช้แบบรูปเป็นพื้นฐาน (Pattern-based) วิธีการตรวจหาจุดอ้างอิงดังกล่าวโดยมากแล้วจะพบว่า มีการใช้ลักษณะการเปรียบเทียบความคล้ายคลึงกันระหว่างแบบรูปจำลองของจุดเอกฐานที่สร้างขึ้นกับ โครงสร้างทิศทางของเส้นลายนิ้วมือที่เข้ามา ซึ่งถ้าบริเวณใดให้ค่าความคล้ายคลึงกับแบบรูปจำลองมากที่สุด บริเวณดังกล่าวนั้นมีความน่าจะเป็นจุดอ้างอิง หรืออาจกำหนดเป็นอาณาบริเวณที่น่าจะมีจุดอ้างอิงตกอยู่ ตัวอย่างแบบจำลองที่สร้างขึ้นอาทิเช่น การสร้างแบบจำลองของจุดแกน และจุดสามเหลี่ยม เป็นต้น งานวิจัยที่สามารถจำแนกอยู่ในการตรวจหาในรูปแบบนี้ พิจารณาตามตัวอย่างอาทิเช่น ระเบียบวิธีการบ่งชี้พอยน์แคร์ (Poincare Index Method) ซึ่งเป็นรูปแบบการหาจุดอ้างอิงที่เป็นที่นิยมอย่างมาก ได้นำเสนอในปี ค.ศ. 1984 โดย Kawagoe และ Tojo (1984) ซึ่งมีรูปแบบการหาจุดแกน และจุดสามเหลี่ยมโดยใช้แบบจำลองต่างๆที่เกิดขึ้นจากเส้นทิศทางลายนิ้วมอดังแสดงในภาพที่ 10 และได้มีการนำมาปรับปรุงให้ดีขึ้น

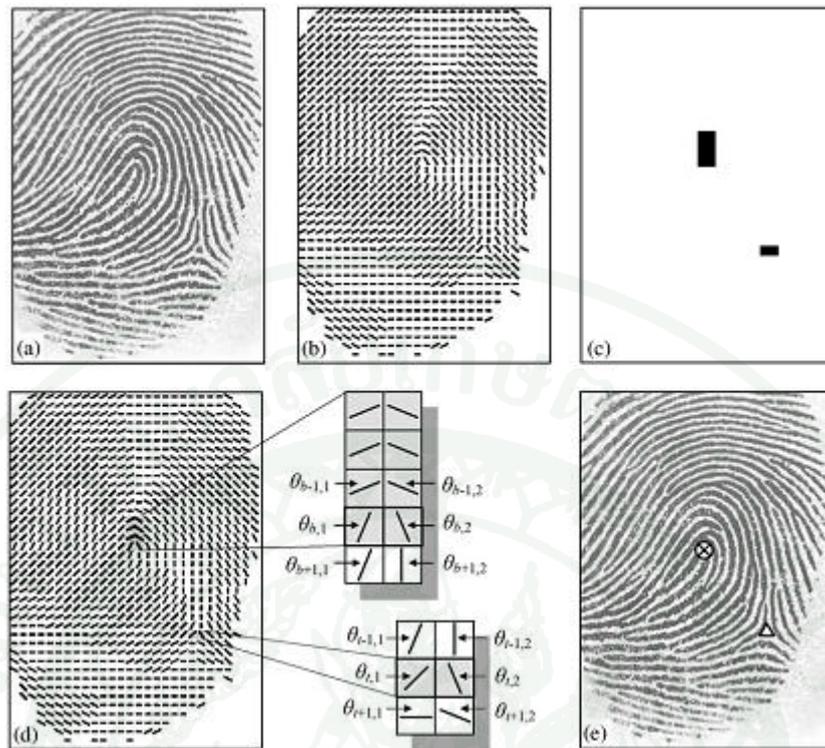
โดย Bazen และ Gerez (2002) ในปี ค.ศ. 2002 ดังแสดงในภาพที่ 11 แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อเสียคือ มีการสร้างจุดเอกฐานเทียมในภาพลายนิ้วมือที่มีคุณภาพต่ำ และไม่สามารถตรวจหาจุดเอกฐานในภาพลายนิ้วมือประเภทกระโຈມ หรือกระโຈມสูงได้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่น่าสนใจอื่นๆอีก อาทิ เช่น Park *et al.* (2005) ดังแสดงในภาพที่ 12 ได้นำเสนอวิธีการหาตรวจหาจุดเอกฐานโดยการพิจารณาแบบจำลองที่เกิดจากสนามทิศทางเป็นหลัก วิธีการดังกล่าวสามารถหาลายนิ้วมือประเภทโค้ง หรือซุ่มโค้งได้ด้วย นอกจากนี้ถ้าพิจารณารูปแบบการตรวจหาจุดอ้างอิงโดยใช้วิธีการที่คล้ายคลึงกัน จะพบว่างานที่มีลักษณะวิธีคล้ายๆกัน ได้แก่ การตรวจหาจุดเอกฐานโดยใช้รูปแบบที่เรียกว่า “ตัวกรองเชิงซ้อน (Complex Filter)” ซึ่งนำเสนอโดย Nilsson และ Bigun (2005) ดังแสดงในภาพที่ 13 วิธีการดังกล่าวนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างข้อมูลสนามทิศทาง กับตัวกรองที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งความซับซ้อนในการคำนวณขึ้นอยู่กับขนาดของหน้าต่าง และความละเอียดของบล็อกที่ใช้ในการกราดตรวจหาจุดเอกฐาน ตัวอย่างการหาจุดเอกฐานโดยใช้วิธีการต่างๆบางส่วน



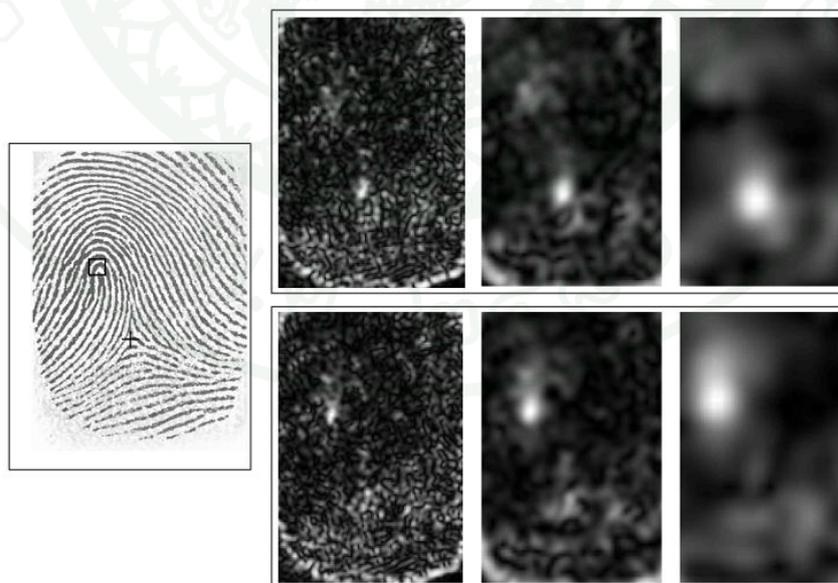
ภาพที่ 10 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าบ่งชี้พอยน์แคร์



ภาพที่ 11 ตัวอย่างผลการตรวจหาจุดเอกฐานจำแนกตามประเภทของลายนิ้วมือที่ได้จากระเบียบวิธีการบ่งชี้พอยน์แคร์ ซึ่งได้ทำการปรับปรุงแล้วโดย Bazen และ Gerez (2002)



ภาพที่ 12 การตรวจหาจุดเอกฐาน โดยการตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสนามทิศทาง (Park *et al.*, 2005)



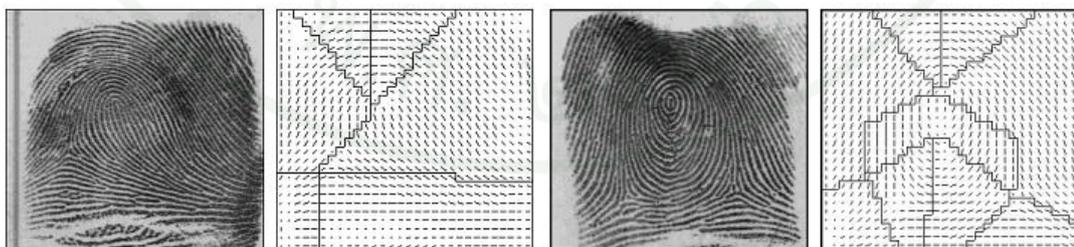
ภาพที่ 13 ตัวอย่างผลการหาจุดแกนโดยใช้ตัวกรองเชิงซ้อนที่ความละเอียดต่าง ๆ กัน นำเสนอโดย Nilsson และ Bigun (2005)

2. การตรวจหาจุดอ้างอิงโดยใช้การแบ่งส่วนเป็นพื้นฐาน (Partition-based) รูปแบบของวิธีการดังกล่าวนี้ใช้ประโยชน์จากการปรับเปลี่ยนระดับสนามทิศทาง (Directional Field Quantization) เพื่อหาจุดเอกฐานซึ่งเป็นบริเวณที่มีการปรับเปลี่ยนระดับทิศทางสูง สำหรับตัวอย่างงานวิจัย อาทิเช่น Hung และ Huang (1996) ซึ่งเสนอวิธีการหาตำแหน่งจุดเอกฐานโดยใช้เส้นแสดงความผิดพลาด (Fault-lines) ซึ่งเป็นเส้นที่ใช้แบ่งอาณาบริเวณที่อยู่ติดกันของสนามทิศทางที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการปรับระดับทิศทาง พบว่าเส้นดังกล่าวจะทำการแบ่งสนามทิศทางไปเรื่อยๆ และลู่เข้าจนถึงจุดที่มีการทับซ้อนกันของเส้นแบ่งสนามทิศทางที่สูงที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกกำหนดเป็นจุดเอกฐาน พิจารณาเพิ่มเติมอีกหนึ่งตัวอย่างซึ่งเป็นงานวิจัยที่น่าเสนอโดย Ramo *et al.* (2001) ลักษณะของการตรวจหาจุดเอกฐานจะพิจารณาการทับซ้อนกันของเส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามทิศทาง (Transition Line) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาลักษณะการตรวจหาจุดเอกฐานโดยใช้วิธีการดังกล่าวนี้ จะพบว่ามีข้อเสียดังต่อไปนี้

2.1 ภาพลายนิ้วมือที่มีคุณภาพต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสูญเสียข้อมูลในอาณาบริเวณที่เป็นจุดเอกฐาน อาจทำให้การตรวจหาจุดเอกฐานมีความคลาดเคลื่อนสูง หรือไม่สามารถตรวจหาพบได้

2.2 ภาพลายนิ้วมือประเภทกระโจม หรือกระโจมสูงไม่สามารถหาจุดเอกฐานได้ เนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมุมที่เกิดจากเส้นลายนิ้วมือในภาพนั้นมีการเปลี่ยนแปลงต่ำ ทำให้การปรับระดับผิดพลาดและส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการหาจุดเอกฐานเช่นกัน

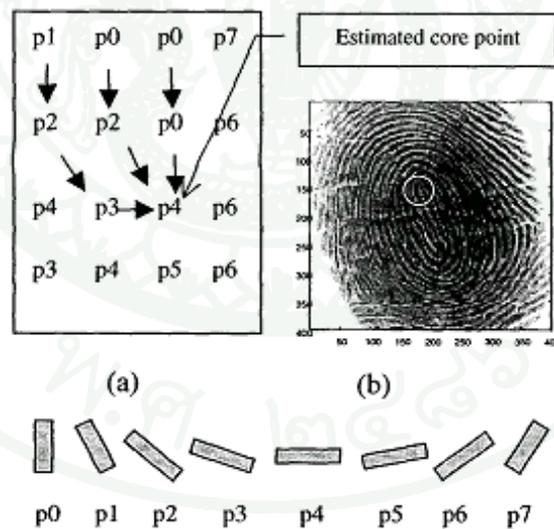
2.3 ในกรณีที่ภาพลายนิ้วมือมีส่วนที่เป็นลายนิ้วมือน้อยจนเกินไป ความน่าเชื่อถือในการคำนวณหาจุดเอกฐานอาจมีค่าต่ำ เนื่องจากปริมาณข้อมูลที่ใช้ในการตรวจวัดมีค่าน้อยจนเกินไป



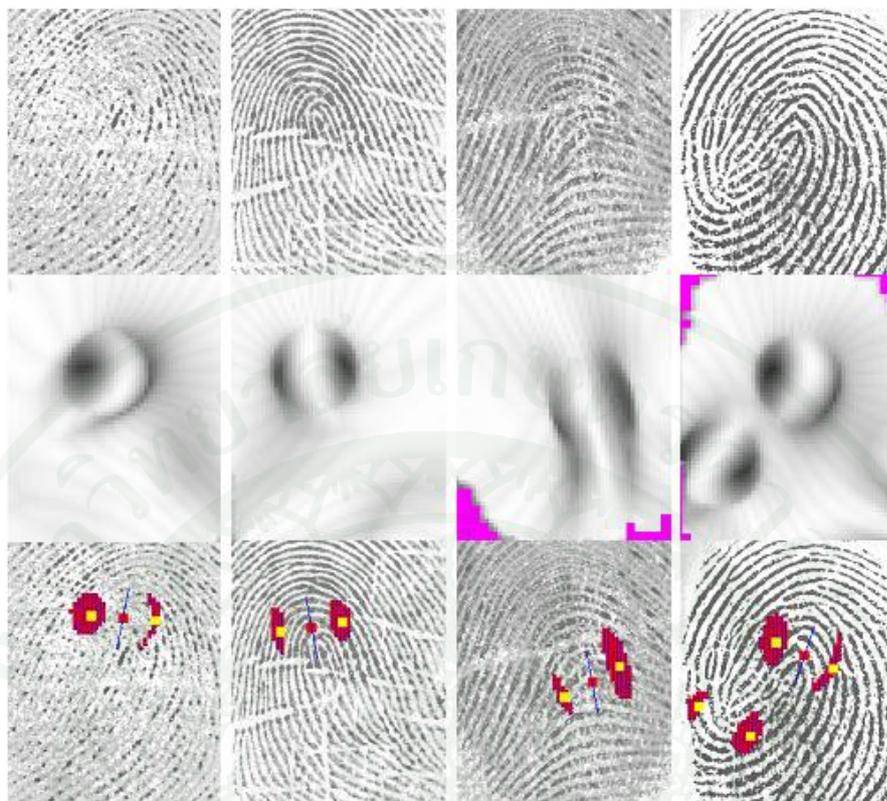
ภาพที่ 14 การตรวจหาจุดเอกฐานโดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามทิศทาง (MASK)

(Cappelli *et al.*, 1999)

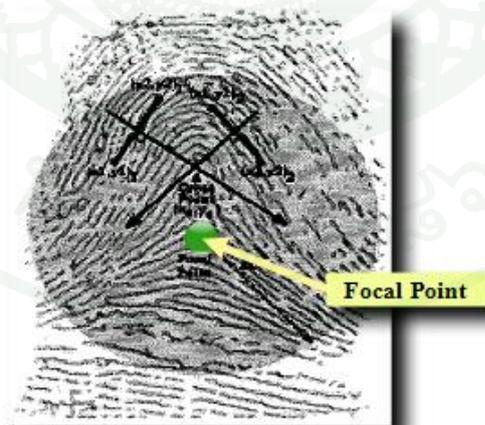
3. การตรวจหาจุดอ้างอิงโดยใช้การฉายเป็นพื้นฐาน (Projection-based) แนวคิดของวิธีการนี้คือการฉายคุณลักษณะเด่นของลายนิ้วมือ ตัวอย่างคุณลักษณะดังกล่าวซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอาทิเช่น สนามทิศทางซึ่งเป็นคุณลักษณะเด่นที่นิยมใช้ในการตรวจหาจุดอ้างอิงมากที่สุด หรือการวางตัวของเส้นลายนิ้วมือ เป็นต้น ตัวอย่างงานวิจัยอาทิเช่น Huvanandana *et al.* (2000) ซึ่งนำเสนอการหาจุดอ้างอิงโดยวิธีการฉายเส้นตั้งฉากของสนามทิศทาง และทำการตรวจหาจุดที่ทำให้เกิดการลู่เข้าจากข้อมูลดังกล่าวเพื่อกำหนดเป็นจุดอ้างอิง หรือ Jiang *et al.* (2005) ได้นำเสนอวิธีการตรวจหาจุดอ้างอิงโดยใช้การวิเคราะห์ค่าความแรง (Coherence) ของสนามทิศทางตามระดับความสำคัญ (Hierarchical), Liu *et al.* (2006) นำเสนอการหาจุดอ้างอิงโดยใช้วิธีการฉายสนามทิศทางไปยังโดเมนที่น่าสนใจ เรียกว่าวิธีการดังกล่าวว่าสนามแกนสมมาตรแบ่งส่วน Local Axial Symmetry field (LAS) รูปแบบงานวิจัยที่ทำการฉายคุณลักษณะอื่นๆ อาทิเช่น จุดโฟกัส (Focal Point) นำเสนอโดย Rerkrai และ Areekul (2000) ซึ่งทำการวิเคราะห์จุดตัดที่เกิดจากการฉายเส้นตรงที่ตั้งฉากกับสนามทิศทาง (Gradient Line or Normal Line) และได้พัฒนามาโดยตลอดจนถึงปี ค.ศ. 2009 โดย Areekul และ Boonchaiseree (2009) ได้เสนอวิธีการตรวจหาจุดโฟกัสด้วยแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม (Half Concentric Lens Model) พิจารณาตัวอย่างการหาจุดอ้างอิงโดยใช้วิธีการฉายดังตัวอย่างภาพที่ 15-17



ภาพที่ 15 การตรวจหาจุดแกนโดยใช้การลู่เข้าโดยเส้นตั้งฉากกับสนามทิศทาง (Huvanandana *et al.*, 2000)



ภาพที่ 16 การหาจุดอ้างอิงโดยใช้วิธีสนามแกนสมมาตรแบ่งส่วน Local Axial Symmetry Field, LAS (Liu *et al.*, 2006)



ภาพที่ 17 จุดโฟกัสซึ่งนำเสนอโดย Rerkrai และ Areekul (2000)

ที่มา: Rerkrai and Areekul (2000)

จุดโฟกัส

จุดโฟกัส (Focal point) คือจุดอ้างอิงที่เกิดจากการฉายคุณลักษณะเด่นของข้อมูลทางทิศทาง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความโค้งของเส้นลายนิ้วมือ ตัวอย่างคุณลักษณะเด่นที่สามารถนำมาใช้ตรวจหาจุดโฟกัส อาทิเช่นการฉายคุณลักษณะเด่นที่เป็นเส้นตั้งฉากกับเส้นลายนิ้วมือ หรือสนามทิศทาง เป็นต้น

จุดโฟกัสเริ่มมีการค้นคว้า และนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Rerkrai และ Areekul (2000) งานวิจัยดังกล่าวนี้ได้กำหนดเส้นที่แทนลักษณะของเส้นลายนิ้วมือ 2 ประเภทได้แก่ เส้นสัมผัส (Tangent Line) และตั้งฉาก (Normal Line) ของเส้นลายนิ้วมือ เมื่อพิจารณาจุดตัด (Crossing Point) ที่เกิดจากการตัดกันของเส้นตั้งฉากลายนิ้วมือทั้งหมดที่เกิดขึ้น ผนวกกับแนวคิดการลู่เข้าโดยพิจารณาจากกฎ Weak Laws of Large Number ในทางสถิติจะพบว่า จุดตัดจำนวนมากที่เกิดจากเส้นตั้งฉากต่างๆของเส้นลายนิ้วมือ เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยของจุดตัดเหล่านั้นจะพบว่าค่าเฉลี่ยจะลู่เข้าสู่จุดที่เป็นจุดศูนย์กลาง (Centroid) ของจุดตัดเหล่านั้น ซึ่งจุดศูนย์กลางดังกล่าวนี้จะถูกกำหนดเป็นจุดโฟกัสต่อไป พิจารณารายละเอียดดังสมการต่อไปนี้

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\{|(x_f, y_f) - E_n(x_c, y_c)| < \varepsilon\} = 1 \quad (1)$$

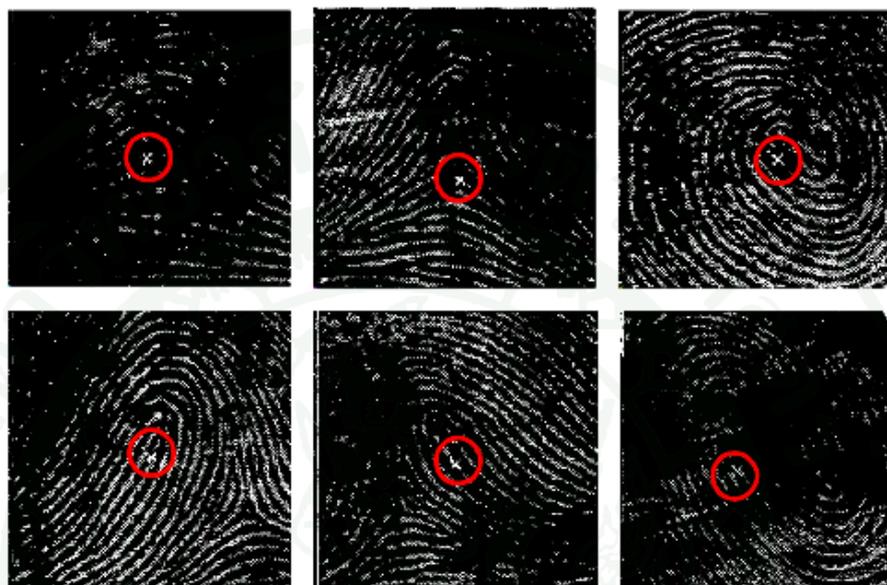
สมการที่ (1) เป็นกฎ Weak laws of large number โดยลักษณะการลู่เข้าเป็นการลู่เข้าตามความน่าจะเป็นที่เกิดจากการหาค่าระยะทางแบบยูคลิเดียนระหว่างจุดตัดใดๆ (x_c, y_c) กับค่าเฉลี่ยของจุดตัดที่เกิดขึ้น $E_n(x_c, y_c)$ ของเส้นลายนิ้วมือเมื่อมีจำนวนจุดตัดทั้งหมด n จุด โดยค่าเฉลี่ยของจุดตัดหรือจุดศูนย์กลางสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2)

$$E_n(x_c, y_c) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_c)_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_c)_i \right) \quad (2)$$

สมการที่ (2) n เป็นจำนวนจุดตัดที่เกิดขึ้น และ i เป็นลำดับของจุดตัด (x_c, y_c) ใดๆซึ่งใช้ในการหาค่าเฉลี่ย $E_n(x_c, y_c)$ หรือจุดศูนย์กลาง เมื่อพิจารณาตามเงื่อนไขที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (1) และสมการที่ (2) แล้วจะพบว่าจุดโฟกัส (x_f, y_f) ที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามการลู่เข้าตามความน่าจะเป็นดังสมการที่ (3)

$$E_n[(x_c, y_c)] \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{\text{in prob.}} (x_f, y_f) \quad (3)$$

ตัวอย่างผลการทดลองการหาจุดโฟกัสโดยใช้วิธีดังที่กล่าวมาในข้างต้น ดังภาพที่ 18



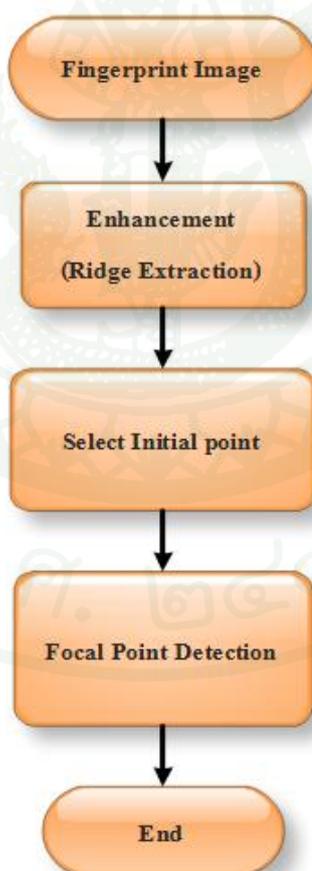
ภาพที่ 18 จุดโฟกัสโดยวิธีการของ Rerkrai และ Areekul (2000)

ที่มา: Rerkrai และ Areekul (2000)

วิธีการหาจุดโฟกัสในงานวิจัยดังกล่าว (Rerkrai และ Areekul (2000)) เน้นการพิสูจน์ความมีเสถียรภาพของจุดโฟกัส ว่ามีความสอดคล้องกับสมมุติฐานการลู่เข้าหรือไม่ โดยทำการทดลองปรับเปลี่ยนจำนวนข้อมูลของจุดตัด รวมทั้งทดสอบผลกระทบจากการเปลี่ยนจำนวนการวนรอบ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปในระบบ โดยพบว่าจุดโฟกัสที่นำเสนอขึ้นมีความเสถียร และทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี แต่ในงานวิจัยนี้ยังไม่มีรายงานการตรวจวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสในภาพลายนิ้วมือที่แตกต่างกันของนิ้วมือเดียวกัน นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณในการหาจุดโฟกัสนั้นค่อนข้างนานเนื่องจาก ต้องทำการประมวลผล และปรับปรุงภาพเพื่อให้ได้เส้นลายนิ้วมือที่สามารถนำมาใช้ในการหาเส้นตั้งฉาก, ข้อมูลของจุดตัดที่ได้มีการคำนวณแบบวนซ้ำ และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้จุดตัดปริมาณมากๆ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้แก่จุดโฟกัส ดังนั้นในกรณี

ที่ภาพถ่ายนิ้วมือมีข้อมูลที่เป็นส่วนของลายนิ้วมือน้อย ความน่าเชื่อถือของจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นตามกฎและสมมติฐานที่ตั้งไว้อาจมีค่าต่ำและไม่เสถียร

การตรวจหาจุดโฟกัสโดยวิธีดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นับว่าเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัย และการพัฒนาการหาจุดอ้างอิงซึ่งเป็นจุดโฟกัสให้สามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติจริงได้อย่างเหมาะสม ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 จุดโฟกัสจึงได้ถูกนำมาปรับปรุงเพื่อใช้ในการปฏิบัติจริงในระบบรู้จำลายนิ้วมือ นำเสนอโดย Areekul *et al.* (2006) ซึ่งทำการปรับปรุงระบบโดยยึดสมมติฐานที่มาจาก การตัดกันของเส้นตั้งฉากกับเส้นลายนิ้วมือเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ แต่ได้ทำการปรับปรุงในด้านประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในส่วนของ การคัดเลือกเส้นลายนิ้วมือ วิธีการดังกล่าวนี้ทำให้สามารถเลือกอาณาบริเวณในการกำหนดจุดโฟกัสได้มากกว่าหนึ่งจุด โดยเลือกพิจารณาเฉพาะเส้นที่มีความโค้งเหมาะสมเท่านั้น กระบวนการทำงานต่างๆในงานวิจัยดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 19



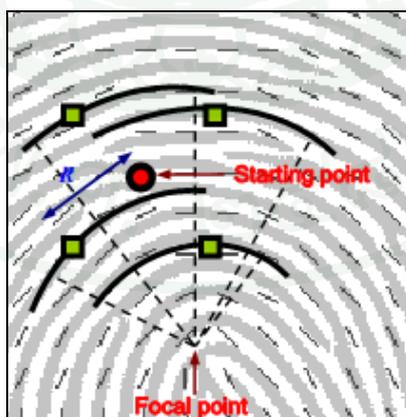
ภาพที่ 19 แผนผังการไหลแสดงการทำตรวจหาจุดโฟกัส ซึ่งนำเสนอ โดย Areekul *et al.* (2006)

แผนผังการไหลในภาพที่ 19 แสดงกระบวนการตรวจหาจุดโฟกัส ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ (Enhancement Process) ขั้นตอนนี้จะทำการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือเพื่อทำการดึงเส้นลายนิ้วมือให้มีความชัดเจน และผ่านกระบวนการทำให้บาง (Thinning) เพื่อนำมาใช้งานในขั้นตอนถัดไป

2. ขั้นตอนการกำหนดจุดเริ่มต้น ขั้นตอนนี้จะทำตรวจราดเพื่อคัดเลือกเส้นลายนิ้วมือจำนวนหนึ่ง ในงานวิจัยดังกล่าวทำการคัดเลือกจุด 4 จุดล้อมรอบจุดเริ่มต้นและทำการวิ่งตามเส้นลายนิ้วมือจำนวน 4 เส้นที่ใกล้จุดทั้ง 4 การวิ่งตามเส้นจะพิจารณาด้วยว่ามีลักษณะความโค้งที่เหมาะสม หรือเป็นไปตามเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้หรือไม่ จากนั้นทำการสร้างสมการเส้นตรงที่ตั้งฉากกับเส้นสัมผัสความโค้งทั้ง 4 เส้นดังกล่าวมาสร้างจุดตัด เพื่อนำจุดตัดทั้งหมดมาใช้ในการคำนวณหาจุดโฟกัสย่อย และประมวลผลต่างๆในขั้นตอนถัดไป

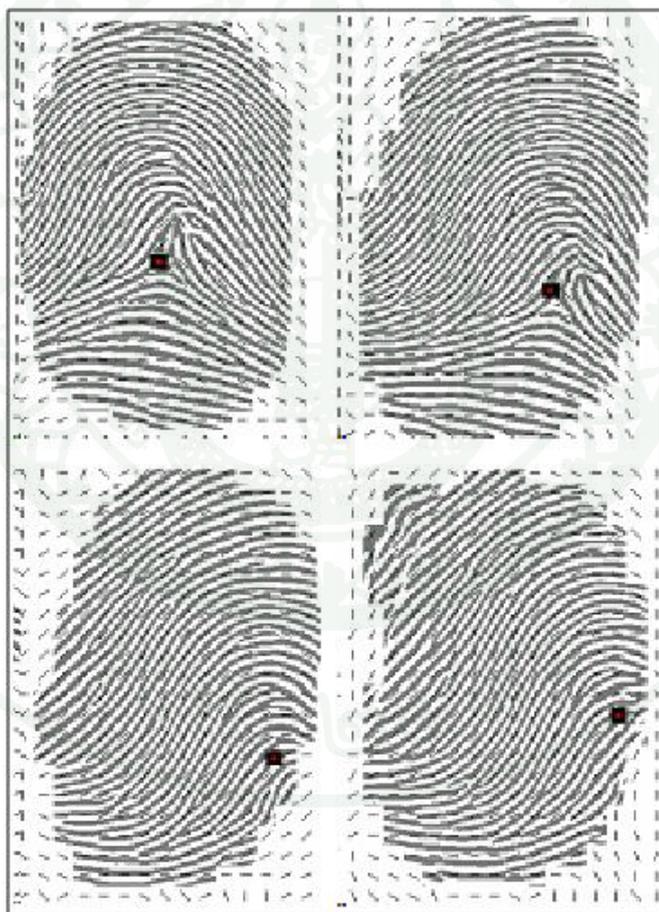
3. ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนการทำวนซ้ำ โดยทำการใช้จุดโฟกัสย่อยเป็นจุดอ้างอิง สร้างจุด 4 จุดล้อมรอบจุดโฟกัสย่อย และทำการคำนวณตามข้อ 2 อีกเพื่อทำการหาจุดโฟกัสย่อยจุดใหม่ ถ้าจุดโฟกัสย่อยจุดใหม่ที่ได้มีการเลื่อนตำแหน่งเมื่อเทียบกับจุดเดิม น้อยกว่าเกณฑ์อ้างอิงที่ได้ตั้งไว้ จะทำการหยุดการวนซ้ำ และกำหนดให้จุดนั้นเป็นจุดโฟกัส ในทางกลับกันถ้าจุดใหม่ที่เกิดขึ้นมีการปรับเปลี่ยนทางตำแหน่งมากกว่าเกณฑ์ดังกล่าว จะทำการกำหนดจุดนั้นเป็นจุดโฟกัสย่อยและทำการวนซ้ำตามขั้นตอนที่ 2 ต่อไป



ภาพที่ 20 ตัวอย่างการหาจุดโฟกัสซึ่งนำเสนอ โดย Areekul *et al.* (2006)

ที่มา: Areekul *et al.* (2006)

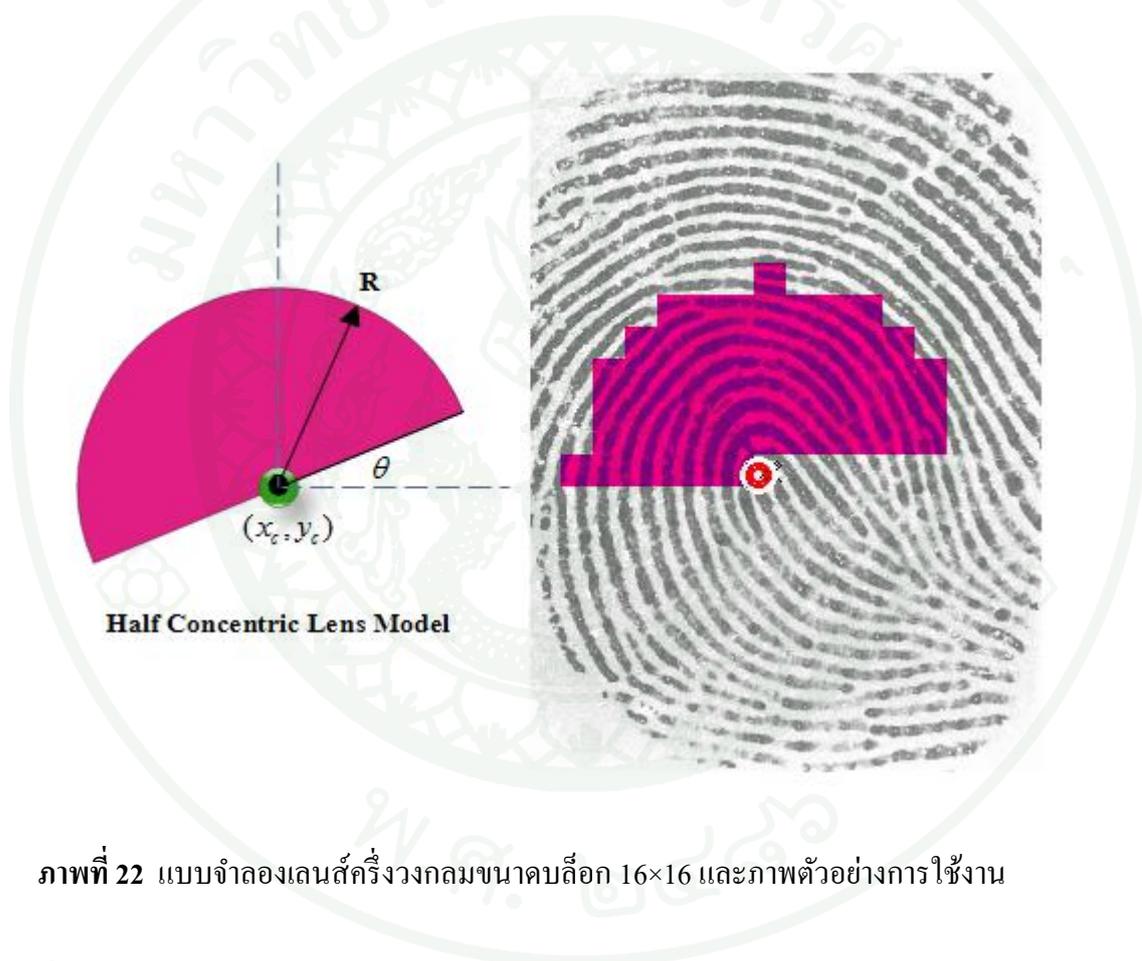
จุดโฟกัสที่ได้จากวิธีการดังกล่าวข้างต้นพบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี สามารถนำไปใช้งานจริงได้ และนอกจากนี้ยังสามารถฉายลงนอกภาพถ่ายนิ้วมือได้ในกรณีที่ภาพถ่ายนิ้วมือมีข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ อาทิเช่น มีการเว้าหรือแหงของส่วนโค้ง หรือไม่มีบริเวณจุดเอกฐานได้อีกด้วย คุณสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้จุดโฟกัส มีข้อดีกว่าการตรวจหาจุดเอกฐานโดยใช้แบบรูปเป็นพื้นฐาน หรือใช้การแบ่งเป็นพื้นฐานซึ่งไม่สามารถตรวจพบจุดเอกฐานได้ แต่อย่างไรก็ตาม จุดโฟกัสจากวิธีการดังกล่าวยังใช้เวลาคำนวณที่นานเกินไป เนื่องมาจากต้องทำการปรับปรุงภาพและใช้ลายเส้นนิ้วมือเป็นหลัก นอกจากนี้ในภาพถ่ายนิ้วมือที่เป็นกระโจม หรือกระโจมสูง ยังคงตรวจพบความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่สูง เนื่องจากลักษณะของเส้นลายนิ้วมือมีลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งน้อย (เส้นลายนิ้วมือส่วนใหญ่มีทิศค่อนข้างขนานกัน)



ภาพที่ 21 ตัวอย่างโฟกัสโดยวิธีการของ Areekul *et al.* (2006)

ที่มา: Areekul *et al.* (2006)

ต่อมาในปี ค.ศ. 2009 จุดโฟกัสได้ถูกนำมาพัฒนาขึ้นอีกครั้งโดย Boonchaiseree และ Areekul (2009) โดยมีจุดมุ่งหมายคือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในแง่เวลาการทำงาน และความแม่นยำของระบบภายใต้เงื่อนไข และทฤษฎีต่างๆของโฟกัส ขั้นตอนวิธีหลักของวิธีการนี้คือการพิจารณาเลือกจุดตัดที่เกิดจากเส้นตั้งฉากกับสนามทิศทางโดยไม่ต้องใช้เส้นลายนิ้วมือโดยตรงซึ่งอยู่ ณ อาณาบริเวณใดๆ จากเงื่อนไขการลู่เข้าโดยสมบูรณ์ (Absolutely Convergence) และมีความโค้งที่เหมาะสมคล้ายคลึงกับแบบรูปวงกลมได้มากที่สุด ตามรูปแบบลักษณะส่วนโค้งของเลนส์เรียกว่า “แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม (Half Concentric Lens Model)” ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมขนาดบล็อก 16×16 และภาพตัวอย่างการใช้งาน

ที่มา: Boonchaiseree และ Areekul (2009)

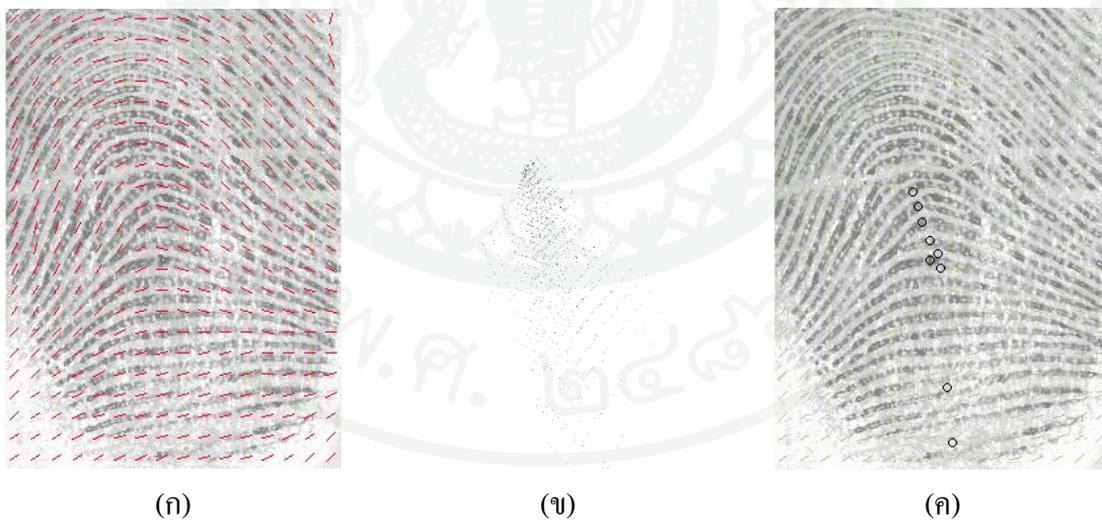
ทั้งนี้ปัญหาที่พบกับวิธีการดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลภาพลายนิ้วมือไม่สมบูรณ์เพียงพอ เกิดจากปริมาณข้อมูลของเส้นลายนิ้วมือที่ปรากฏภายในภาพมีปริมาณน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าภาพลายนิ้วมือที่เป็นส่วนโค้งด้านบนนั้นขาด

หรือหายไป ซึ่งพบว่าจะพบว่าการตรวจหาจุดโฟกัสนั้นอาจตรวจไม่พบ หรือถ้าตรวจพบได้ ความแม่นยำและความน่าเชื่อถือก็ย่อมมีค่าต่ำ และไม่สามารถนำไปใช้งานในกระบวนการอื่นๆ ได้ พิจารณาตัวอย่างดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ตัวอย่างผลการตรวจหาจุดโฟกัสที่เกิดขึ้น เมื่อภาพถ่ายนิ้วมือที่ไม่สมบูรณ์



ภาพที่ 24 ตัวอย่างการกระจายของจุดตัดในกรณีที่อาณาบริเวณสนามทิศทางสับสน หรือเป็นเส้นขนาน (ก) สนามทิศทางที่มีลักษณะทิศทางที่ค่อนข้างขนานกัน, (ข) การกระจายของจุดตัดซึ่งมีการกระจายสูงมาก และ (ค) วงกลมสีดำแสดงความคลาดเคลื่อนของจุดกึ่งกลางเฉลี่ย ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายสูง ไม่ลู่เข้าไปสู่จุดเดียวกัน

2. การไม่รวมกลุ่มกันของจุดตัดเมื่อปลายนิ้วมือมีส่วนโค้งด้านบนน้อย ปัญหานี้โดยส่วนใหญ่จะเกิดกับปลายนิ้วมือประเภทกระโอมและกระโอมสูงโดยลักษณะของจุดตัดที่คำนวณได้มีการกระจายไปทั่วบริเวณภาพปลายนิ้วมือ ทำให้ไม่สามารถหาตำแหน่งของจุดโฟกัสที่แม่นยำได้ ดังแสดงดังภาพที่ 24

ซึ่งขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้จะรวมไปถึงการนำเสนอวิธีการตรวจหาจุดโฟกัสใหม่ที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ซึ่งรายละเอียดต่างๆจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

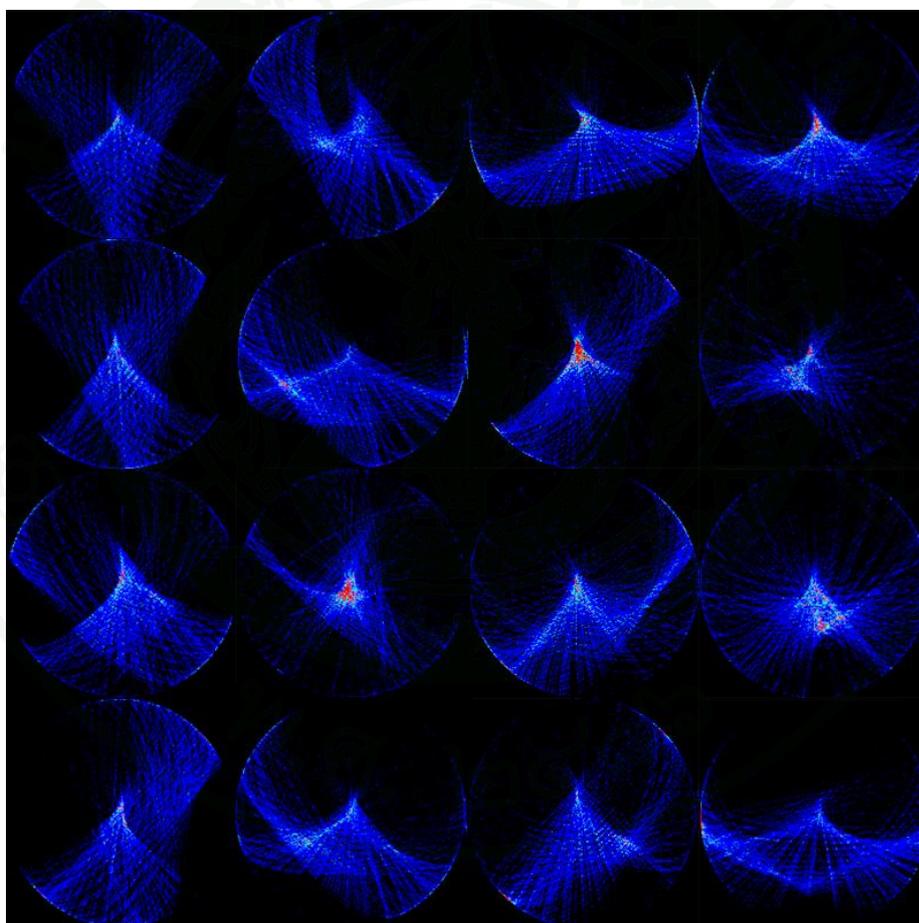
ในการพัฒนาขั้นตอนการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ มีอุปกรณ์ที่สำคัญซึ่งแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วย
1	คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer) Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU T9300 2.50GHz หน่วยความจำ 4096MBytes ระบบปฏิบัติการ Window 7	1	ชุด
2	ซอฟต์แวร์พัฒนาภาษา C++ (Microsoft Visual Studio 2008)	1	โปรแกรม
3	ซอฟต์แวร์คำนวณทางคณิตศาสตร์ (Matlab 7.6.0)	1	โปรแกรม
4	ซอฟต์แวร์ประมวลผลลายนิ้วมือเกษตรศาสตร์ (KFP version 2.1, Kasetsart Fingerprint Processing Program)	1	โปรแกรม
5	ฐานข้อมูล FVC2000DB2 ที่ใช้ในการทดลองซึ่ง ประกอบด้วยนิ้วของคนทั้งสิ้น 100 คน โดยเก็บคนละ 8 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 800 ภาพ	1	ฐานข้อมูล

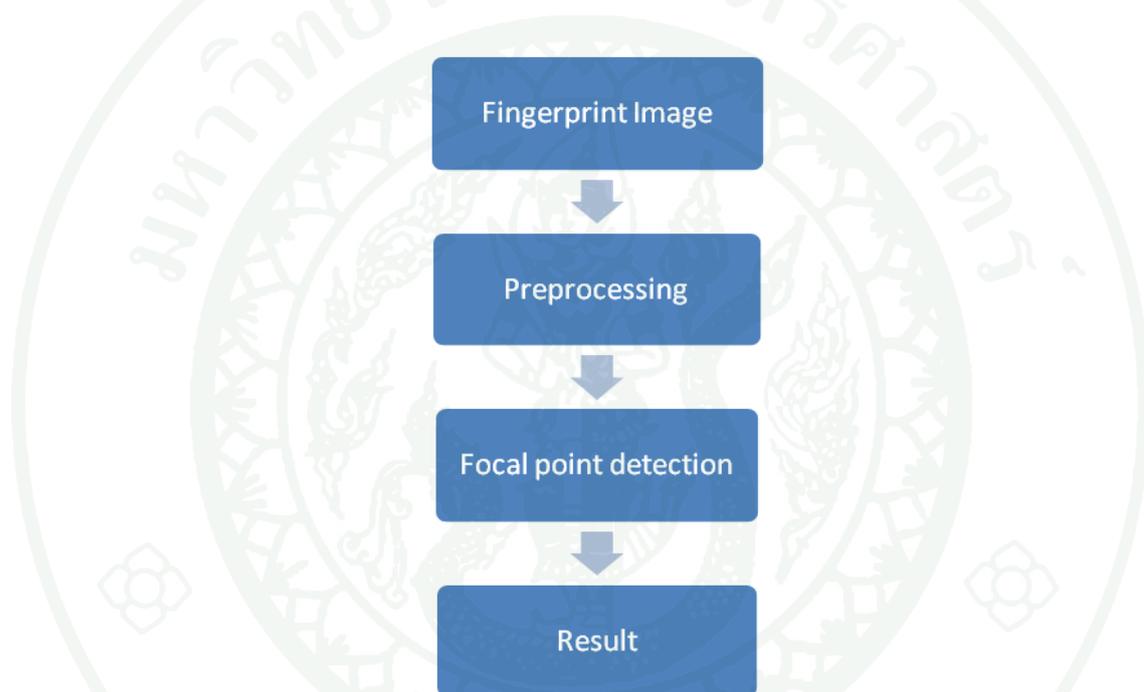
วิธีการ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอขั้นตอนในการตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัส (ตำแหน่งอ้างอิงของลายนิ้วมือ) จากการวิเคราะห์และแจกแจงความโค้งของเส้นลายนิ้วมือ โดยใช้แนวคิดในการฉายความโค้งโดยใช้เส้นตั้งฉากจากลายนิ้วมือนำมาคำนวณจุดตัดซึ่งแนวทงนี้ได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Rerkrai และ Areekul (2000) เพื่อใช้สำหรับการตรวจหาจุดอ้างอิงของลายนิ้วมือโดยเรียกว่าจุดโฟกัส (Focal point) เมื่อพิจารณาจุดตัดที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการตรวจหาจุดโฟกัสพบว่าการกระจายของจุดตัดมีความหลากหลายดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ตัวอย่างการกระจายตัวของจุดตัดของทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ โดยแต่ละวงมาจากลายนิ้วมือหนึ่งภาพ

จากตัวอย่างการกระจายตัวของจุดตัดของภาพที่ 25 เมื่อพิจารณาจะเห็นการกระจุกตัวและกระจายตัวของจุดตัดที่สร้างรูปแบบเฉพาะตัว ซึ่งมีความน่าจะเป็นที่สามารถนำไปจำแนกรูปแบบต่างๆ ของลายนิ้วมือได้ แต่ในกรณีนี้จะนำรูปแบบของจุดตัดเหล่านี้ไปพิจารณาเพื่อการตรวจหาจุดโฟกัส โดยสังเกตว่าตำแหน่งของโฟกัสจะเป็นจุดศูนย์กลางหลักของส่วนโค้งของเส้นลายนิ้วมือ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการจำแนกส่วนโค้งตามทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ เพื่อคัดเลือกบริเวณของลายนิ้วมือที่มีความสำคัญในการสร้างจุดตัด เพื่อนำไปคำนวณหาตำแหน่งของจุดโฟกัสของภาพสำหรับรายละเอียด และขั้นตอนวิธีต่างๆ ในการหาจุดโฟกัส สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 แผนผังการไหลแสดงการตรวจหาจุดโฟกัส

พิจารณาแผนผังการไหลตามภาพที่ 26 ขั้นตอนการตรวจหาจุดโฟกัสนี้จะประกอบไปด้วยขั้นตอนในการเตรียมข้อมูลลายนิ้วมือเบื้องต้น (Preprocessing) และขั้นตอนในการตรวจหาจุดโฟกัส (Focal Point Detection) โดยขั้นตอนต่างๆ จะกล่าวโดยรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนวิธีการเตรียมข้อมูลเบื้องต้นจากภาพลายนิ้วมือ (Preprocessing)

วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้มีไว้เพื่อทำการจัดเตรียมข้อมูลให้พร้อมสำหรับขั้นตอนการคำนวณหาลักษณะเด่นเพื่อใช้ในการจัดเรียงอันดับข้อมูลลายนิ้วมือ โดยคุณลักษณะเด่นที่ใช้ใน

วิทยานิพนธ์นี้คือ สนามทิศทาง (Orientation field) ซึ่งได้นำเสนอโดย Hong เรียกวิธีการดังกล่าวว่า “ระเบียบวิธีของ Hong (Hong’s method)” (Hong *et al.*, 1998) ซึ่งรูปแบบการหาค่าสนามทิศทางจะทำการแบ่งภาพออกเป็นบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $n \times n$ จุดภาพ (พิกเซล (Pixel)) โดยในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ $n = 8$ จุดภาพเป็นขนาดหลัก จากนั้นทำการคำนวณหาค่าสนามทิศทางในแต่ละบล็อก โดยกำหนดให้ $\theta_{B(r)}$ เป็นค่าสนามทิศทางมีค่าอยู่ในช่วง $[0, \pi]$ และคำนวณได้จากบล็อก ณ ตำแหน่งแถวที่ r , และหลักที่ c_r ตามลำดับ รายละเอียดของสมการมีดังนี้

$$\theta_{B(r)} = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \tan^{-1}(2G_{xy} \cdot G_{xx} - G_{yy}) \quad (4)$$

โดยมีเงื่อนไขตามรายละเอียดสมการดังนี้

$$\begin{aligned} G_{xy} &= \sum_{h=-w}^w \sum_{k=-w}^w \nabla_x(x_{r_r+h, y_{c_r}+k}) \cdot \nabla_y(x_{r_r+h, y_{c_r}+k}), \\ G_{xx} &= \sum_{h=-w}^w \sum_{k=-w}^w \nabla_x(x_{r_r+h, y_{c_r}+k})^2, \\ G_{yy} &= \sum_{h=-w}^w \sum_{k=-w}^w \nabla_y(x_{r_r+h, y_{c_r}+k})^2. \end{aligned} \quad (5)$$

พิจารณาสมการที่ (4) กำหนดให้ w เป็นขนาดของหน้าต่างที่จะนำมาใช้ในการหาสนามทิศทาง จะพบว่าค่า $\theta_{B(r)}$ ที่ทำการตรวจหานั้นจะขึ้นกับค่าที่ได้จากการหาเกรเดียนต์ของภาพลายนิ้วมือโดยตรง ซึ่งรูปแบบการคำนวณเป็นการพิจารณาค่ากำลังสองของเกรเดียนต์ในทางแกนนอน (G_{xx}) แกนตั้ง (G_{yy}) และค่าเกรเดียนต์แบบสหสัมพันธ์ (G_{xy}) พิจารณารายละเอียดตามสมการที่ (5)

หลังจากที่ได้ข้อมูลสนามทิศทางเรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อมาทำการคำนวณหาค่าความแรง (Coherence) ของสนามทิศทางในแต่ละบล็อกตามที่ได้นำเสนอใน Bazen และ Gerez (2001) โดยกำหนดให้ $Coh(r)$ เป็นค่าความแรงของบล็อก (r_r, c_r) ใดๆซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $[0, 1]$ มีรายละเอียดสมการดังต่อไปนี้

$$Coh(r) = \frac{\sqrt{(G_{xx} - G_{yy})^2 - 4G_{xy}^2}}{G_{xx} + G_{yy}} \quad (6)$$

สมการที่ (6) แสดงค่าความแรงของสนามทิศทาง โดยบล็อกที่มีค่าสีค่าทุกจุดภาพจะมีค่าความแรงของสนามทิศทางเป็น 0 ส่วนบล็อกที่มีจุดภาพเป็นสีขาวทั้งหมด จะมีค่าความแรงของสนามทิศทางเป็น 1 เมื่อได้ค่าความแรงของสนามทิศทางเรียบร้อยแล้ว ต่อมาทำการพิจารณาเฉพาะบล็อกที่มีค่าความแรงของสนามทิศทางมากกว่าเกณฑ์อ้างอิงดังสมการต่อไปนี้

$$Coh(r) > \beta \quad (7)$$

สมการที่ (7) กำหนดให้ค่า β เป็นเกณฑ์อ้างอิงที่ใช้ในการคัดกรองบล็อกที่มีค่าความแรงของสนามทิศทางตามเงื่อนไข (ในการทดลองที่ภาพลายนิ้วมือคุณภาพโดยรวมดี อาจไม่จำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวนี้ได้) หลังจากที่ได้ทำการคัดกรองบล็อกแล้ว จะพบว่าสนามทิศทางบางส่วนซึ่งมีความผิดพลาด อาทิเช่น สนามทิศทางที่เกิดจากบริเวณที่ไม่มีลายนิ้วมือ หรือเป็นบริเวณที่เป็นรอยแผลเป็นขนาดใหญ่จะถูกกำจัดออก และไม่นำมาคำนวณในขั้นตอนวิธีต่อไป เมื่อได้ค่าสนามทิศทางที่เหมาะสมแล้ว ทำการจัดเตรียมพารามิเตอร์พื้นฐานที่สำคัญคือ เส้นตั้งฉาก (Normal Line or Perpendicular Line) โดยกำหนดให้ $\varphi_{B(r)}$ เป็นค่ามุมที่ตั้งฉากกับสนามทิศทาง $\theta_{B(r)}$ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

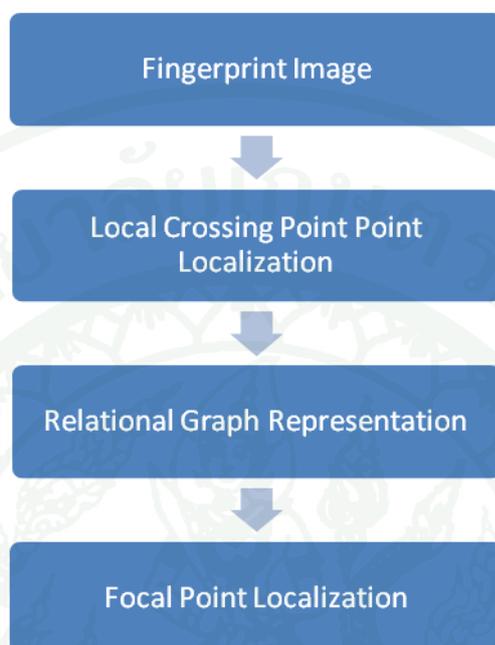
$$\varphi_{B(r)} = \begin{cases} \theta_{B(r)} + \pi/2 ; \theta_{B(r)} < \pi/2 \\ \theta_{B(r)} - \pi/2 ; \theta_{B(r)} > \pi/2 \end{cases} \quad (8)$$

ค่า $\varphi_{B(r)}$ ที่ได้จากสมการที่ (8) เป็นการปรับมุมที่ได้จาก $\theta_{B(r)}$ เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการพิจารณา การคำนวณลักษณะเด่นจากจุดตัดในขั้นตอนวิธีการในหัวข้อต่อไป

ขั้นตอนวิธีการตรวจหาจุดโฟกัส (Focal Point Detection)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการอธิบายถึงวิธีการตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัส ซึ่งสามารถพิจารณาขั้นตอนการทำงานดังแผนผังการไหลในภาพที่ 27 พบว่าการตรวจหาจุดดังกล่าวประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน ได้แก่ การคำนวณหาจุดตัดแบบท้องถิ่น (Local Crossing Point Localization) การหาความสัมพันธ์ของเส้นลายนิ้วมือด้วยการแทนกราฟ (Relational Graph Representation) และการหาตำแหน่งจุดโฟกัส (Focal Point Localization) ซึ่ง 2 ขั้นตอนแรกจะเป็น

การพิจารณาโครงสร้างของลายนิ้วมือระดับมหภาค (ระดับที่ 1, Global structure) ก่อนที่จะทำการคำนวณหาจุดโฟกัสในระดับมัธยภาค (ระดับที่ 2, Local structure) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 27 แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการคำนวณหาตำแหน่งจุดโฟกัสจากทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ

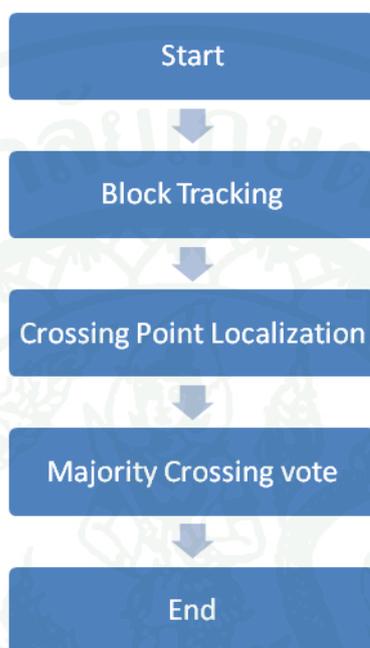
1. ขั้นตอนการคำนวณจุดตัดแบบเฉพาะที่ (Local Crossing Point)

จากการศึกษาวิจัยของ Boonchaiseree และ Areekel (2009) ซึ่งนำเสนอวิธีการตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัสในขั้นตอนการหาจุดเริ่มต้น (Initial Point Localization) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณหาจุดตัดใดๆ ที่เกิดจากเส้นตรงที่ตั้งฉากกับสนามทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ 2 เส้นมาตัดกัน โดยพบว่าจำนวนจุดตัดทั้งหมด (Φ_{MAX}) สามารถประมาณได้ดังนี้

$$\Phi_{MAX} \approx \left(r_{max} \times c_{max} \right) \quad (9)$$

เมื่อ r_{max} เป็นจำนวนบล็อกรทางด้านแนวและ c_{max} เป็นจำนวนบล็อกรทางด้านหลักของภาพลายนิ้วมือ เมื่อพิจารณาสมการที่ (9) พบว่าจุดตัดที่สามารถคำนวณได้ทั้งหมดมีจำนวนมากเกินไปซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับใช้เป็นลักษณะเด่น เพื่อเป็นการลดจำนวนจุดตัด

ดังกล่าวขั้นตอนการคำนวณจุดตัดแบบเฉพาะที่จึงถูกนำเสนอขึ้น โดยวิธีนี้จะเป็นการประมาณส่วนโค้งของเส้นลายนิ้วมือแต่ละพื้นที่โดยขั้นตอนการกำหนดจุดตัดแบบเฉพาะที่นั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้



ภาพที่ 28 แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการคำนวณหาจุดตัดแบบเฉพาะที่

จากแผนผังการไหลในภาพที่ 28 ขั้นตอนการคำนวณจุดตัดแบบเฉพาะที่จะประกอบไปด้วย การติดตามเส้นลายลายนิ้วมือแบบบล็อก (Block Tracking) การคำนวณจุดตัด (Crossing Point Localization) และการเลือกจุดตัดอ้างอิงเสียงข้างมาก (Major Crossing Voting) ซึ่งสามารถอธิบายโดยละเอียดได้ดังนี้

1.1 การติดตามเส้นลายนิ้วมือแบบบล็อก (Block Tracking) ขั้นตอนการคำนวณจุดตัดแบบเฉพาะที่มีจุดประสงค์หลักในการประมาณตำแหน่งของจุดตัดที่เกิดจากส่วนของเส้นลายนิ้วมือใดๆ โดยการคำนวณจะทำการพิจารณาเป็นบริเวณเล็กๆ ตามทิศทางของเส้นลายนิ้วมือแต่เนื่องจากภาพลายนิ้วมือได้ถูกแบ่งพื้นที่ออกเป็นบล็อกสี่เหลี่ยมจตุรัสและแต่ละบล็อกแทนทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ (Orientation field) การพิจารณาเส้นลายนิ้วมือจึงเป็นการคำนวณในรูปแบบของการติดตามเส้นลายนิ้วมือแบบบล็อก (Block tracking) กำหนดให้ $B(r)$ เป็นบล็อกใดๆที่จะทำการติดตามเส้นลายนิ้วมือโดยมีทิศทาง $\theta_{B(r)}$ ในการคำนวณจะทำการหาบล็อกของลายนิ้วมือที่ $B(r+i)$

และ $B(r-i)$ ซึ่งเป็นบล็อกที่ติดกับบล็อก $B(r)$ ตามทิศทาง $\theta_{B(r)}$ และ $\theta_{B(r)} + \pi$ ตามลำดับ ในการทดลองจะทำการติดตามลายนิ้วมือเป็นจำนวน 5 คู่บล็อก ($i = 5$)

1.2 การคำนวณหาจุดตัด (Crossing Point Localization) จากขั้นตอนการติดตามเส้นลายนิ้วมือแบบบล็อก ในขั้นตอนนี้จะเป็นการคำนวณหาลักษณะเด่นของจุดตัดที่เกิดจาก คู่บล็อกแต่ละคู่

$$y - y_{B(r,i)} = m_{B(r,i)}(x - x_{B(r,i)}), \quad m_{B(r,i)} = \tan(\varphi_{B(r,i)}) \quad (10)$$

พิจารณาสมการที่ (10) ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงที่จะนำมาใช้ในการหาจุดตัด โดยกำหนดให้ $(x_{B(r,i)}, y_{B(r,i)})$ เป็นตำแหน่งกึ่งกลางของบล็อก $B(r,i)$ และ $\varphi_{B(r,i)}$ เป็นทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือของบล็อกดังกล่าว ส่วน (x, y) เป็นตำแหน่งของจุดตัด เมื่อพิจารณาลายนิ้วมือโดยทั่วไปจะพบว่าความโค้งของเส้นลายนิ้วมือนั้นประกอบด้วยบริเวณที่เส้นลายนิ้วมือมีการเปลี่ยนแปลงความชัน และบริเวณที่เส้นลายนิ้วมามีลักษณะการวางตัวคล้ายเส้นขนานหรือไม่เปลี่ยนแปลงความชัน ในกรณีที่เส้นลายนิ้วม้วางตัวเป็นเส้นตรงจะไม่สามารถคำนวณจุดตัดได้ ดังเกณฑ์ในการตัดสินใจตามสมการที่ (11)

$$Abs_{diff}(\varphi_{B(r+i)} - \varphi_{B(r-i)}) \neq 0 \quad (11)$$

เมื่อ $Abs_{diff}(\cdot)$ เป็นฟังก์ชันในการคำนวณความแตกต่างกันของทิศทางของเส้นตรง ทั้งหากคู่บล็อกที่ทำให้สมการที่ (11) เป็นจริงจะทำการคำนวณจุดตัดในขั้นตอนต่อไป โดยกำหนดให้ $(x_{(r,i)}, y_{(r,i)})$ เป็นจุดตัดที่เกิดจากคู่บล็อกใดๆ (i) ดังที่กล่าวมาข้างต้น จะสามารถคำนวณหาจุดตัดได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$x_{(r,i)} = \frac{m_{B(r+i)}x_{B(r+i)} - m_{B(r-i)}x_{B(r-i)} - (y_{B(r+i)} - y_{B(r-i)})}{m_{B(r+i)} - m_{B(r-i)}} \quad (12)$$

$$y_{(r,i)} = \frac{m_{B(r+i)}(y_{B(r-i)} - m_{B(r-i)}x_{B(r-i)}) + m_{B(r-i)}(y_{B(r+i)} - m_{B(r+i)}x_{B(r+i)})}{m_{B(r+i)} - m_{B(r-i)}} \quad (13)$$

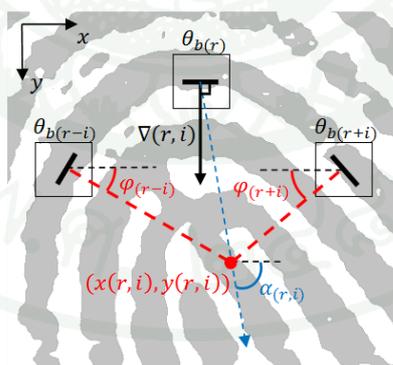
สมการที่ (12) และ (13) แสดงการหาจุดตัดที่เกิดจากคู่บล็อก $B(r+i)$ และ $B(r-i)$ ซึ่งลักษณะการแก้สมการเป็นการจัดรูปทางเมตริกและเมื่อพิจารณาจุดตัดดังภาพที่ 29 พบว่าอัตราส่วนของมุมที่สร้างจุดตัด ($\rho_{(r,i)}$) และทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ (Gradient field, GF)

$(\nabla_{(r,i)})$ สามารถนำมาสร้างเป็นลักษณะเด่นในการบอกคุณลักษณะของความโค้งของลายนิ้วมือได้ดี
 สมการต่อไปนี้เป็น

$$\rho_{(r,i)} = 1 - \frac{\varphi_{B(r+i)} + \varphi_{B(r-i)}}{\pi} \quad (14)$$

$$\nabla_{(r,i)} = \begin{cases} \varphi_{B(r)} & , \left| \alpha_{B(r,i)} - \varphi_{B(r)} \right| < \frac{\pi}{2} \\ \varphi_{B(r)} + \pi & , \left| \alpha_{B(r,i)} - \varphi_{B(r)} \right| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (15)$$

สมการที่ (14) แสดงการคำนวณ $\rho_{(r,i)}$ จากทิศทางของ $\varphi_{B(r+i)}$ และ $\varphi_{B(r-i)}$ เมื่อพิจารณาค่าของ ρ จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณความโค้งของการตัดกันของกลุ่มลวดลายนิ้วมือสามารถอธิบายได้ว่าในบริเวณใดที่มีค่า ρ เข้าใกล้ 1 ($\rho \rightarrow 1$) บริเวณดังกล่าวจะมีความโค้งของเส้นลายนิ้วมือสูง ทำให้สามารถประมาณได้ว่าบริเวณดังกล่าวเป็นจุดศูนย์กลางรวมความโค้งหรือจุดเอกฐานในทางตรงกันข้ามเมื่อค่า ρ เข้าใกล้ 0 ($\rho \rightarrow 0$) บริเวณดังกล่าวจะมีความโค้งของเส้นลายนิ้วมือต่ำหรือเป็นบริเวณที่เส้นลายนิ้วมือมีลักษณะวางตัวเป็นเส้นขนาน และสมการที่ (15) แสดงการคำนวณทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือโดยทิศทางดังกล่าวแสดงถึงทิศทางพุ่งเข้าสู่ศูนย์กลางของเส้นลายนิ้วมือ เมื่อพิจารณาทิศทางดังกล่าวสามารถแบ่งทิศทางของลายนิ้วมือได้เป็น 360 องศาด้วยการแบ่งทิศทางของเส้นลายนิ้วมือที่มากขึ้นลักษณะเด่นนี้จะถูกใช้ในการแบ่งพื้นที่ของลายนิ้วมือในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 29 การคำนวณจุดตัดของลวดลายทิศทางลายนิ้วมือ

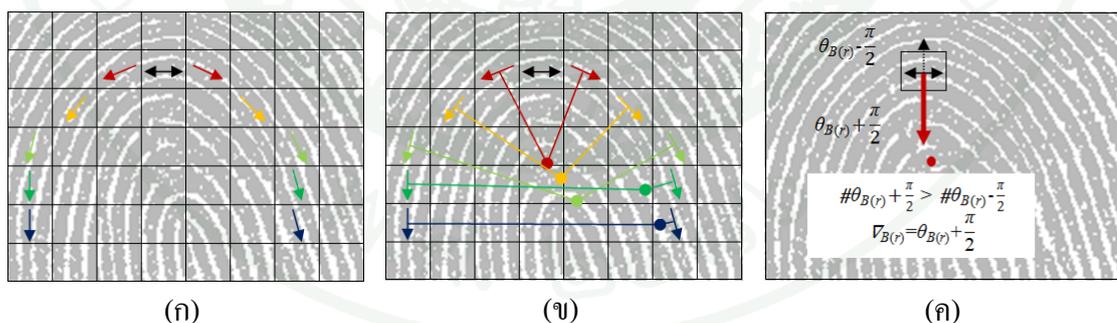
1.3 การเลือกจุดตัดอ้างอิง (Major Crossing Voting) ในขั้นตอนนี้จะเป็นการกำหนดจุดตัดแบบเฉพาะที่ในบล็อกใดๆ ($B(r)$) เนื่องจากจุดตัดที่ได้จากการคำนวณจะมีทั้งหมด i ตำแหน่ง

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนด $i = 5$ ดังนั้นจุดตัดอ้างอิงจะเป็นการเลือกจุดตัดจากจุดตัดทั้งหมดที่อยู่ในเกณฑ์การเลือกจุดตัดอ้างอิงดังนี้

1) จุดตัดอ้างอิงจะต้องมีทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ ($V_{(r,i)}$) อยู่ในทิศทางส่วนมากของทั้งหมด หมายความว่าจุดตัดแต่ละตำแหน่งของกลุ่มล๊อค i ใดๆจะมีค่า $V_{(r,i)}$ เท่ากับ $\theta_{B(r)} + \frac{\pi}{2}$ หรือ $\theta_{B(r)} - \frac{\pi}{2}$ ดังนั้นถ้าทิศทางใดมีทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ ($V_{(r,i)}$) จากกลุ่มล๊อคทั้งหมดมีเสียงข้างมาก จุดตัดที่มีทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมืออยู่ในทิศทางนั้นๆจะมีสิทธิ์ถูกเลือกเป็นจุดตัดอ้างอิง

2) จุดตัดอ้างอิงจะต้องมีอัตราส่วนของมุมที่สร้างจุดตัด ($\rho_{(r,i)}$) ที่มากที่สุด จากจุดตัดที่ผ่านเกณฑ์ข้อที่ 1) จุดตัดอ้างอิงจะเลือกจากการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของมุมที่สร้างจุดตัดที่มากที่สุด เนื่องมาจากการคำนวณจุดตัดแบบท้องถิ่นเป็นการประมาณจุดตัดของบริเวณเส้นลายนิ้วมือบริเวณพื้นที่แคบๆ ดังนั้นค่าอัตราส่วนของมุมที่สร้างจุดตัดที่มากที่สุดจะสามารถบ่งชี้ถึงลักษณะความโค้งของเส้นลายนิ้วมือบริเวณนั้นๆได้เป็นอย่างดี

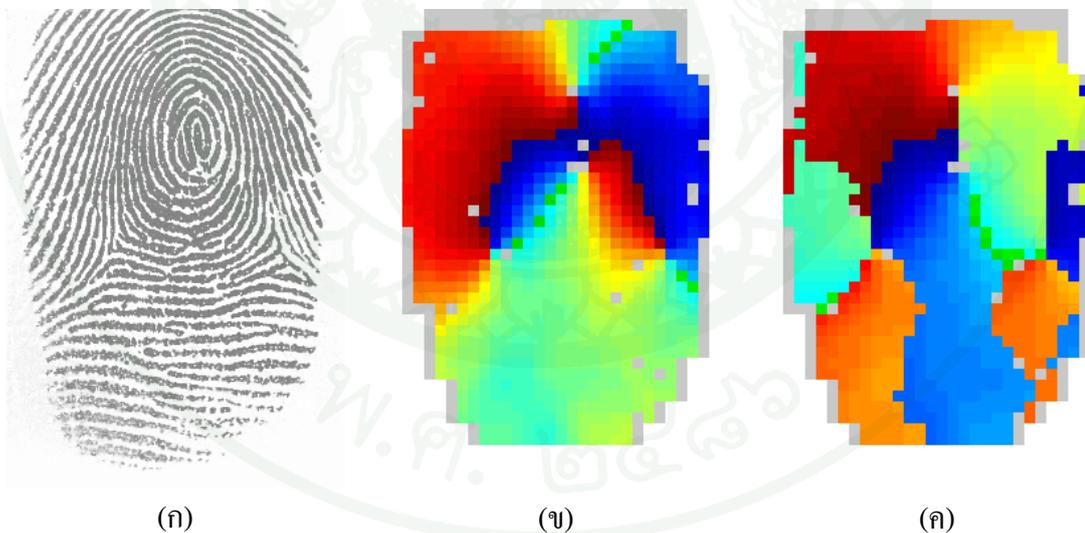
ลักษณะเด่นจากจุดตัดของเส้นลายนิ้วมือแบบเฉพาะที่แต่ละบล็อกล็อก ($p(r) = \{x_{B(r)}, y_{B(r)}, V_{B(r)}, \rho_{B(r)}\}$) จะถูกใช้เป็นลักษณะเด่นเริ่มต้นในการสร้างโครงสร้างของลายนิ้วมือด้วยกราฟ โดยจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 30 ขั้นตอนการพิจารณาการคำนวณจุดตัดของเส้นลายนิ้วมือแบบท้องถิ่น (ก) ขั้นตอนการติดตามเส้นลายนิ้วมือแบบบล็อกล็อก (ข) ขั้นตอนการคำนวณหาจุดตัด และ (ค) ขั้นตอนการเลือกจุดตัดอ้างอิง

2. ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ของเส้นลายนิ้วมือด้วยการแทนกราฟ (Relational Graph Representation) ในขั้นตอนนี้จะอธิบายถึงการแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือตามทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ (GF) โดยพื้นที่ดังกล่าวจะเป็นลักษณะเด่นสำคัญในการกำหนดโครงสร้างลายนิ้วมือด้วยกราฟ

จากงานที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้เส้นลายนิ้วมือจะมีทิศทางอยู่ในช่วง $0 - \pi$ ดังแสดงในภาพที่ 31(ข) ตามทิศทางของสนามทิศทาง (Orientation field, OF) เมื่อพิจารณาการแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือด้วยสนามทิศทางพบว่าพื้นที่ของลายนิ้วมือจะถูกแบ่งออกเป็นพื้นที่ใหญ่ๆ และไม่สามารถแยกย่อยพื้นที่ดังกล่าวได้อย่างชัดเจนเนื่องจากสนามทิศทางเดียวกันแทนความชันเส้นหนึ่งซึ่งสามารถไปได้สองทิศทาง อาทิเช่นสนามทิศทางในแนวแกนอน สามารถไปทางซ้ายหรือขวาก็ได้ แต่จากขั้นตอนการคำนวณหาจุดตัดแบบเฉพาะที่ ที่ได้นำเสนอมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ลักษณะเด่นของทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ (Gradient field, GF) ซึ่งมีทิศทางอยู่ในช่วง $0 - 2\pi$ ทำให้ปัญหาดังกล่าวหมดไป ดังแสดงในภาพที่ 31(ค) ทำให้ลายนิ้วมื่อดังกล่าวถูกแบ่งด้วยพื้นที่ที่ละเอียดขึ้นตามทิศทางความโค้งของลายนิ้วมือ



ภาพที่ 31 ตัวอย่างการแบ่งพื้นที่ภาพลายนิ้วมือโดยสีแต่ละสีแสดงทิศทาง (ก) ภาพลายนิ้วมือฐานข้อมูล FVC2000Db2: 60_1 (ข) การแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือด้วยสนามทิศทาง (DF) (ค) การแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือด้วยทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ (GF)

เนื่องจากโครงสร้างของลายนิ้วมือมีลักษณะเป็นเส้นที่ยาวต่อเนื่องกัน เมื่อทำการพิจารณาในลักษณะดังกล่าวพบว่ากราฟสามารถจำลองลักษณะต่างๆ ของเส้นลายนิ้วมือได้ โดยการแทนกราฟที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างของลายนิ้วมือจะประกอบด้วยส่วนหลักๆ 2 ส่วน ได้แก่ โหนด (node, V) และรอยต่อ (edge, E) โดยโหนดจะจำลองในส่วนของบริเวณพื้นที่ของลายนิ้วมือเมื่อทำการแบ่งด้วยทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ และรอยต่อของกราฟจะจำลองถึงการเชื่อมต่อกันในเส้นลายนิ้วมือ ซึ่งแสดงถึงลักษณะเด่นจากความสัมพันธ์เชิงกราฟของพื้นที่ลายนิ้วมือ ($G(V, E)$) สำหรับขั้นตอนการคำนวณลักษณะเด่นจากการแทนกราฟสามารถอธิบายได้ตามแผนผังการไหลดังต่อไปนี้

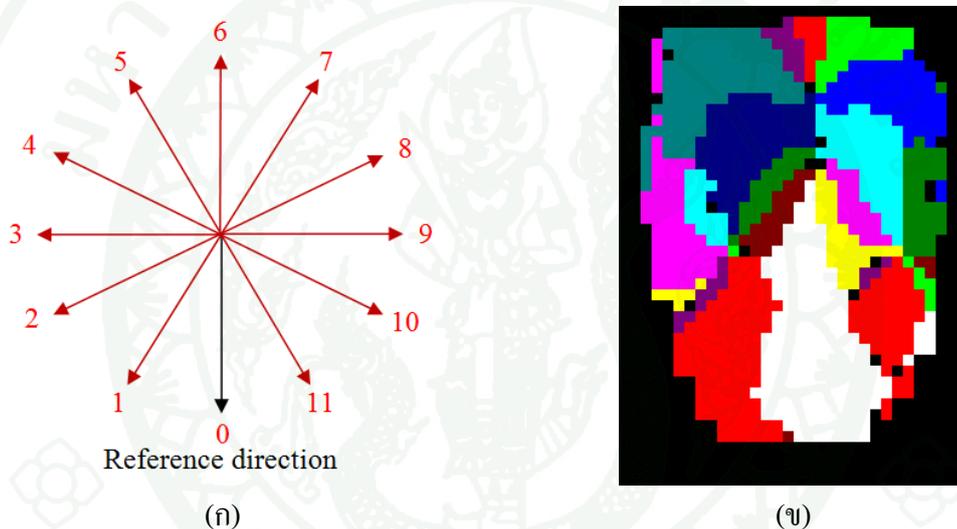


ภาพที่ 32 แผนผังการไหลแบบบล็อกแสดงการหาการแทนกราฟของการแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือ

2.1 ขั้นตอนการควอนไทซ์ของทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ (GF Quantization) เนื่องจากทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมามีค่าอยู่ระหว่าง $0 - 2\pi$ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการควอนไทซ์ของทิศทางดังกล่าว เพื่อลดความละเอียดของทิศทางลงให้สะดวกแก่การวิเคราะห์ลักษณะเด่นของพื้นที่ลายนิ้วมือด้วยกราฟ โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดระดับของทิศทาง (n_q) เท่ากับ 12 ระดับ สำหรับเงื่อนไขในการควอนไทซ์ของทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมามีดังนี้

$$q_{B(r)} = Q \text{ if } \text{Abs}_{diff} \left(\varphi_{B(r)} \cdot \left(\frac{2\pi \times Q}{n_q} \right) - \vartheta \right) < \frac{2\pi}{n_q}, Q \in n_q \quad (16)$$

สมการที่ (16) กำหนดให้ $q_{B(v)}$ เป็นค่าระดับของทิศทางของบล็อคดีๆ ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง $0 - n_q$ และ $Abs_{dir}(\cdot)$ เป็นฟังก์ชันในการคำนวณความแตกต่างของทิศทาง (ผลลัพธ์มีค่าอยู่ระหว่าง $0-180$ องศา) โดยระดับทิศทางของทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 33(ก) เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงของภาพลายนิ้วมือ, θ โดยในวิทยานิพนธ์กำหนด $\theta = -\frac{\pi}{2}$ โดยใช้แกนของภาพเป็นแกนอ้างอิง หลักจากทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ (GF) ได้ผ่านกระบวนการควอนไทซ์ทิศทางแล้วภาพของลายนิ้วมือจะถูกแบ่งเป็นบริเวณพื้นที่ที่แสดงในภาพที่ 33 (ข) โดยพื้นที่ของลายนิ้วมุดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นลักษณะเด่นทางการแทนกราฟในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 33 (ก) ตัวอย่างการควอนไทซ์ทิศทางของทิศทางตั้งฉากของลายนิ้วมือ โดยแบ่งเป็น 12 ระดับ (ข) พื้นที่ของลายนิ้วมือเมื่อทำการแบ่งตามระดับทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ

2.2 ขั้นตอนการแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือด้วยระดับทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ (Directional Clustering) ในขั้นตอนนี้จะอธิบายถึงวิธีการจับกลุ่มกันของทิศทางลายนิ้วมือ เพื่อกำหนดโหนด (Node, n) ของโครงสร้างกราฟ โดยโหนดแต่ละโหนดจะแสดงถึงพื้นที่ของลายนิ้วมือที่มีระดับทิศทางเดียวกันและมีบริเวณอาณาเขตต่อเนื่องกัน โดยมีหลักเกณฑ์ในการกำหนดลักษณะเด่นจากบริเวณพื้นที่ลายนิ้วมุดังต่อไปนี้

1) กลุ่มของพื้นที่ลายนิ้วมือแต่ละโหนดจะต้องมีสมาชิกไม่ต่ำกว่าค่าหนึ่ง โดยในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดสมาชิกของแต่ละโหนดไม่ต่ำกว่า 10 บล็อก ถ้าน้อยกว่าจะพิจารณาว่าบริเวณพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่รบกวน (Noise Area)

2) ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของโหนด (Centroid) สามารถคำนวณได้โดย

$$(\tilde{x}_n, \tilde{y}_n) = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_n(j), \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_n(j) \right) \quad (17)$$

พิจารณาสมการที่ (17) เมื่อ $(\tilde{x}_n, \tilde{y}_n)$ เป็นจุดศูนย์กลางถ่วงของโหนด, $(x_n(j), y_n(j))$ เป็นจุดศูนย์กลางของบล็อก j ใดๆที่เป็นสมาชิกของโหนดที่ n และ N เป็นจำนวนสมาชิกทั้งหมดของโหนด

3) ค่าเฉลี่ยของทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ (\tilde{v}_n) เป็นลักษณะเฉพาะที่ใช้แทนทิศทางโดยเฉลี่ยทิศทางทั้งหมดของสมาชิกภายในโหนด สามารถคำนวณได้จาก

$$\tilde{v}_n = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_n(j) \quad (18)$$

พิจารณาสมการที่ (18) เมื่อ $v_n(j)$ เป็นเวกเตอร์ทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือของบล็อก j ใดๆ ภายในสมาชิกของโหนดที่ n

4) ค่าประมาณความโค้งของพื้นที่เส้นลายนิ้วมือภายในโหนด ($\tilde{\rho}_n$) เพื่อเป็นตัวชี้วัดปริมาณความโค้งของลายนิ้วมือบริเวณพื้นที่ต่างๆ โดยค่า $\tilde{\rho}_n$ จะถูกพิจารณาเลือกจากค่าของอัตราส่วนของมุมที่สร้างจุดตัด ($\rho_n(j)$) ของบล็อก j ใดๆ ภายในสมาชิกของโหนดที่ n ที่มีค่ามากที่สุดเป็นตัวกำหนดปริมาณความโค้งของลายนิ้วมือบริเวณนั้นๆ

2.3 ขั้นตอนเชื่อมรอยต่อของโหนดในการแทนกราฟ (Edge Linking) เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างของลายนิ้วมือที่มีลักษณะเป็นเส้นเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว ในขั้นตอนนี้จะเป็นการจำลองการเชื่อมต่อกันของทิศทางของลายนิ้วมื่อด้วยรอยต่อของโครงสร้างกราฟ โดยพิจารณาจากสมการดังต่อไปนี้

$$q_d = |q_n(r_1) - q_m(r_2)| \quad (19)$$

สมการที่ (19) กำหนดให้ $q_n(r_1)$ และ $q_m(r_2)$ เป็นบล็อกที่ r_1 ของโหนดที่ n และบล็อกที่ r_2 ของโหนดที่ m ตามลำดับ โดยบล็อกทั้งสองเป็นบล็อกที่อยู่ติดกันและโหนด n ไม่เป็นโหนดเดียวกันกับโหนด m ($n \neq m$) ค่า q_d เป็นผลต่างทิศทางของเวกเตอร์ทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ สำหรับเกณฑ์พิจารณาในการเชื่อมต่อกันของแต่ละโหนดสามารถพิจารณาดังต่อไปนี้

1) $q_d = 1$ แสดงว่าโหนดสองโหนดมีทิศทางที่ต่อเนื่องกัน โดย $E_n = \{V_m\}$ หมายถึงโหนดที่ m เป็นรอยต่อของโหนดที่ n ที่เชื่อมต่อกันได้

2) $q_d = \frac{n_d}{2}$ แสดงว่าโหนดสองโหนดมีทิศทางที่ตรงกันข้ามกัน แต่ยังสามารถพิจารณาว่าทั้งคู่เชื่อมต่อกันได้

3) q_d เท่ากับจำนวนเต็มใดๆ นอกเหนือจาก 1 และ $\frac{n_d}{2}$ แสดงว่าการเชื่อมต่อกันของทิศทางของลายนิ้วมือบริเวณนั้นมีความผิดปกติ เนื่องจากโดยธรรมชาติของเส้นลายนิ้วมือแล้ว จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทิศทางของเส้นลายนิ้วมือทีละน้อยๆ เมื่อการเชื่อมต่อกันของทิศทางลายนิ้วมือไม่เป็นแบบดังกล่าวทำให้พิจารณาได้ว่าพื้นที่ลายนิ้วมือบริเวณนั้นมีความผิดปกติและตัดสินใจให้ทั้งสองโหนดไม่เชื่อมต่อกัน

2.4 ขั้นตอนการปรับการแทนกราฟให้เรียบ (Smoothing) ภาพลายนิ้วมือที่มีคุณภาพต่ำหรือภาพลายนิ้วมือที่ถูกทำให้ผิดเพี้ยนจนทำให้สนามทิศทางบางส่วนเกิดความเสียหาย ในขั้นตอนนี้เป็นวิธีการสำหรับพิจารณาบริเวณดังกล่าวเพื่อตัดสินใจเลือกใช้ หรือไม่ใช้บริเวณดังกล่าว โดยสามารถสรุปเกณฑ์ในการเลือกพื้นที่ได้ดังนี้

1) ตามธรรมชาติลายนิ้วมือจะมีลักษณะของเส้นลายนิ้วมือที่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นถ้าหากพบโหนดใดที่ไม่เชื่อมต่อกันโหนดอื่นๆ เลย สามารถพิจารณาเพื่อขจัดบริเวณดังกล่าวทิ้งไปได้

2) ในลักษณะเดียวกันกับข้อที่ 1) จากการสังเกตพบว่าแต่ละโหนดสามารถเชื่อมต่อกับโหนดอื่นๆ ได้มากที่สุดเพียง 4 โหนด ถ้าโหนดใดมีจำนวนรอยต่อมากกว่าที่กำหนดสามารถพิจารณาว่าบริเวณดังกล่าวมีความผิดปกติและสามารถขจัดทิ้งได้เช่นกัน

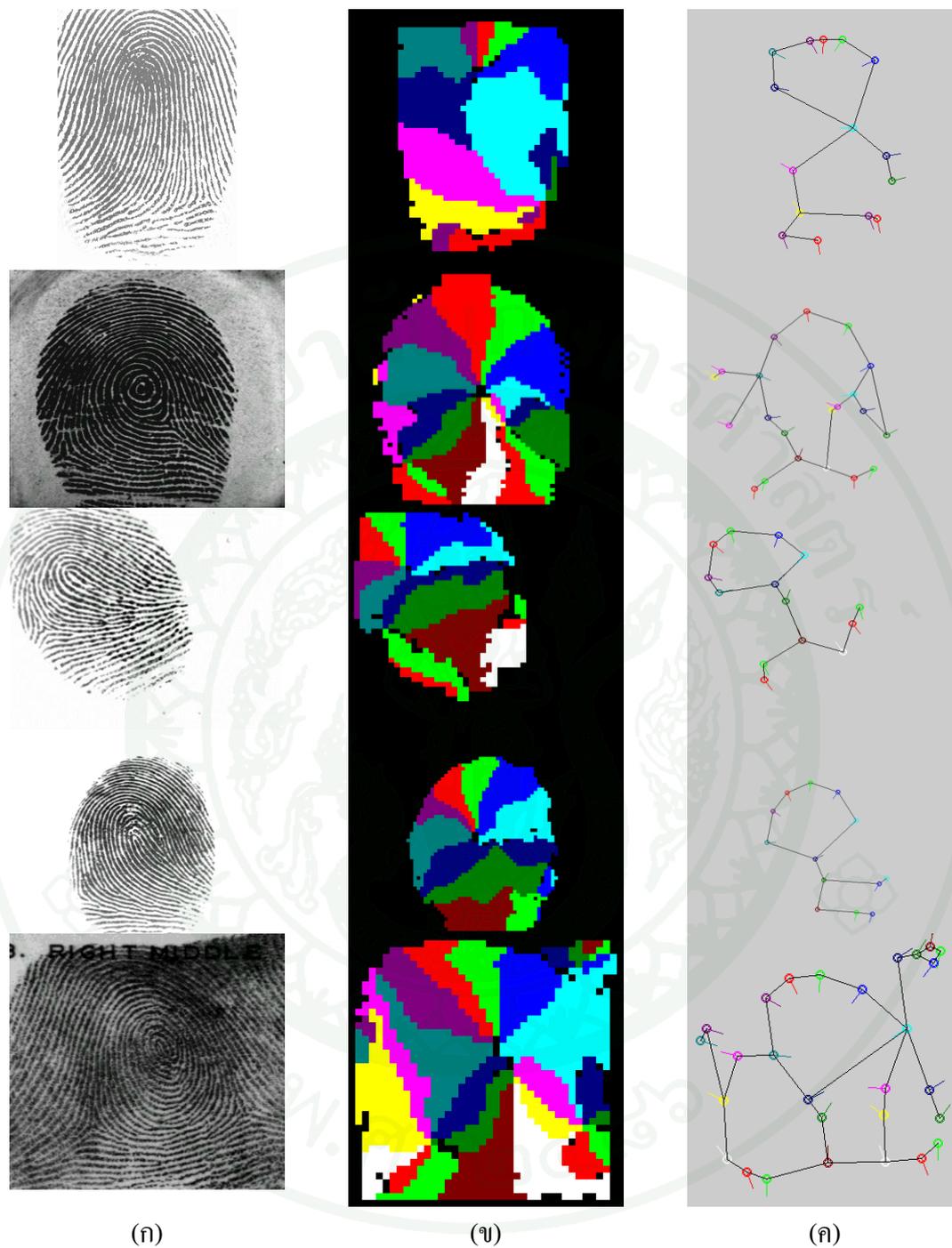
3) ถ้าหากพบว่าโหนดใดมีการเชื่อมต่อของโหนดเพียงโหนดเดียวและมีค่า $q_d = \frac{n_d}{2}$ สามารถพิจารณาขจัดระหว่างโหนดสองโหนดนี้ได้เนื่องจากลักษณะความแตกต่างของระดับทิศทางลายนิ้วมุดังกล่าวสามารถคำนวณได้ว่าบริเวณพื้นที่ของโหนดทั้งสองนั้นมีความเป็นไปได้ว่าเส้นลายนิ้วมือมีลักษณะที่ขนานกัน

จากลักษณะเด่นของการจำลองภาพลายนิ้วมือด้วยโครงสร้างกราฟ พบว่าลักษณะเด่นดังกล่าวสามารถทนต่อการหมุน (Rotation Invariance) การเลื่อนตำแหน่ง (Translation Invariance) และการขยายขนาดได้ (Scaling Invariance) ซึ่งเป็นปัญหาพื้นฐานของการรู้จำแบบรูปทั้งหลาย นอกเหนือจากนั้น โครงสร้างดังกล่าวยังส่งผลดีต่อการวิเคราะห์โครงสร้างของภาพลายนิ้วมือในระดับมหภาค (Global Structure) อีกด้วยเนื่องจากมีเสถียรภาพและมีการลดรูปเวกเตอร์คุณลักษณะ (Feature Vector) จากลักษณะเด่นดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนากระบวนการต่างๆ ในระบบพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคลด้วยภาพพิมพ์ลายนิ้วมือ อาทิเช่น ใช้ในการวิเคราะห์ทิศทางการไหลของลายนิ้วมือในส่วนของ การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Enhancement) การจำแนกประเภทของลายนิ้วมือ (Fingerprint Classification) ด้วยโครงสร้างกราฟหรือแม้กระทั่งการยืนยันตำแหน่งของจุดมินูเทียร์ในการบวนการเปรียบเทียบลายนิ้วมือ (Fingerprint Matching) เป็นต้น

3. ขั้นตอนการตรวจหาตำแหน่งจุดโฟกัส (Focal Point Localization)

จากการศึกษาพบว่าตำแหน่งของจุดอ้างอิง (Reference Point) มีความสำคัญในกระบวนการจัดเรียงอันดับข้อมูลลายนิ้วมือ ในหลายๆวิธีจุดอ้างอิงถูกใช้ในการจัดวางตำแหน่ง (Alignment) หรือใช้เป็นส่วนประกอบในการคำนวณหาลักษณะเด่นสำหรับการจำแนกประเภทลายนิ้วมือ

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการตรวจหาจุดโฟกัสในงานของ Boonchaiseree และ Areekul (2009) พบว่าวิธีการกำหนดจุดอ้างอิงด้วยตำแหน่งของจุดโฟกัสมีประสิทธิภาพของความแม่นยำที่สูงมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ แต่ถึงอย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวยังมีปัญหาในเรื่องของความไม่สมบูรณ์ของภาพลายนิ้วมือซึ่งทำให้เกิดปัญหาความผิดพลาดของจุดโฟกัสจากการเลือกส่วนโค้งของลายนิ้วมือผิด และปัญหาความไม่เสถียรของลายนิ้วมือประเภทกระโจมดังที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ จากปัญหาดังกล่าวพบว่าเมื่อนำลักษณะเด่นของโครงสร้างกราฟที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มาประยุกต์ใช้สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 34 ตัวอย่างการคำนวณลักษณะจากโครงสร้างลายนิ้วมือในฐานข้อมูลต่างๆ หลัก (ก) ภาพลายนิ้วมือต้นฉบับ หลัก (ข) ภาพการแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือด้วยทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ และหลัก (ค) ภาพลักษณะเด่นของลายนิ้วมือจากการแทนกราฟ โดยแต่ละแถวเป็นลายนิ้วมือจากฐานข้อมูล FVC2000db2 FVC2002db1 FVC2002db2 FVC2004db1 และ NIST4

จากการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดจุดโฟกัสของลายนิ้วมือพบว่าบริเวณของเส้นลายนิ้วมือที่มีส่วนสำคัญในการสร้างจุดโฟกัสนั้นเป็นบริเวณของลายนิ้วมือที่มีลักษณะความโค้งค่อยข้างสูงและอยู่บริเวณส่วนโค้งด้านบนของจุดโฟกัสดังแสดงในภาพที่ 35 ซึ่งจะเห็นว่าเส้นลายนิ้วมือทุกๆเส้น ในบริเวณดังกล่าวมีทิศทางตั้งฉากกับตำแหน่งของจุดโฟกัส ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำของจุดโฟกัสความสามารถในการเลือกบริเวณลายนิ้วมือที่คาดว่าจะสนับสนุนการสร้างจุดโฟกัสจากวิธีการแทนกราฟที่ได้นำเสนอไปแล้ว จึงถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการตรวจหาจุดโฟกัสด้วยการแทนกราฟ สำหรับขั้นตอนวิธีการโดยละเอียดมีดังนี้

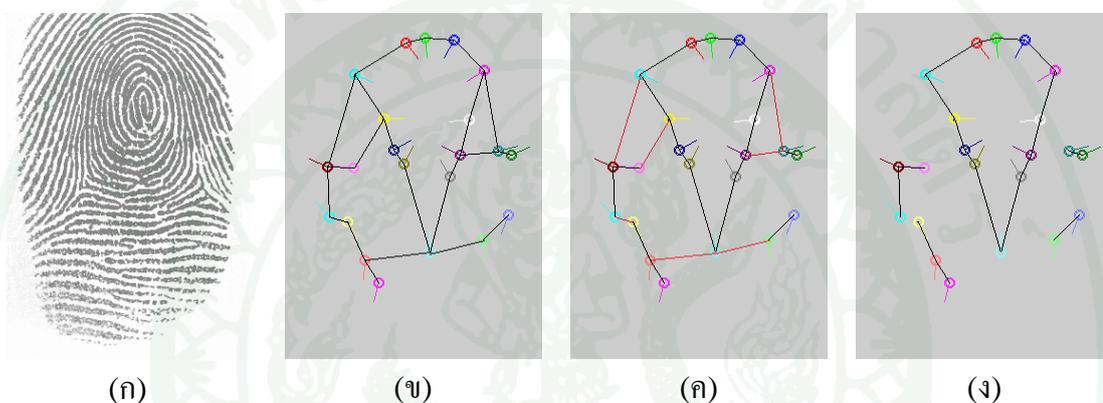


ภาพที่ 35 บริเวณเส้นลายนิ้วมือที่สำคัญที่สนับสนุนการสร้างจุดตัดเพื่อตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัส

3.1 ขั้นตอนการเลือกบริเวณลายนิ้วมือที่มีปริมาณความโค้งมากที่สุด (Region of Highest Curvature Detection, RoHC)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเลือกบริเวณของลายนิ้วมือที่คาดว่าจะเป็นส่วนโค้งสำคัญที่สร้างจุดโฟกัสจากการแทนกราฟ จากการสังเกตพบว่าบริเวณดังกล่าวจะประกอบด้วยพื้นที่ลายนิ้วมือ (โหนด) ที่เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวและมีค่าอัตราส่วนของมุมที่สร้างจุดตัดเฉลี่ย ($\bar{\alpha}_n$) ในแต่ละโหนดค่อนข้างสูง

จากการจำลองลายนิ้วมือด้วยการแทนกราฟ โหนดทุกๆ โหนดจะเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวตามลักษณะของเส้นลายนิ้วมื่อดังภาพที่ 36(ข) แต่จากคุณสมบัติของรอยต่อ (Edge) ของโหนดจะประกอบด้วยรอยต่อ 2 ประเภทคือ รอยต่อแบบทิศทางต่อเนื่องกัน (เส้นตรงสีดำ) และรอยต่อแบบทิศทางกลับทิศกัน (เส้นตรงสีแดง) ดังภาพที่ 36(ค) สำหรับการพิจารณาเส้นลายนิ้วมือที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งต่อเนื่องกันนั้นจะทำการพิจารณาเพียงรอยต่อแบบทิศทางต่อเนื่องกันดังภาพที่ 36(ง) จากโครงสร้างดังกล่าวทำให้สามารถกำหนดเกณฑ์ในการเลือกพื้นที่ลายนิ้วมือที่มีปริมาณความโค้งมากที่สุดได้ดังนี้



ภาพที่ 36 (ก) ภาพลายนิ้วมือ (FVC2000Db2a 60_1) (ข) แบบจำลองลายนิ้วมือด้วยการแทนกราฟ (ค) เส้นสีแดงรอยต่อแบบทิศทางต่อเนื่อง (สีดำ) และทิศทางตรงกันข้าม (สีแดง) (ง) การแทนกราฟของลายนิ้วมือเมื่อพิจารณาเฉพาะโหนดที่มีทิศทางแบบต่อเนื่อง

ก) กำหนดพื้นที่ลายนิ้วมือที่มีจำนวนของโหนดต่อเนื่องกันยาวที่สุดเป็นบริเวณที่ต้องการหา (m โหนด)

ข) หากการแทนกราฟของลายนิ้วมือใดมีการเชื่อมต่อของโหนดที่ยาวที่สุดมากกว่า 1 เส้น ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของมุมที่สร้างจุดตัดเฉลี่ยดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{\rho}_{avg} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{\rho}(i) \quad (20)$$

กำหนดให้ $\bar{\rho}_{avg}$ เป็นค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของมุมที่สร้างจุดตัดเฉลี่ย และ $\bar{\rho}(i)$ เป็นอัตราส่วนของมุมที่สร้างจุดตัดเฉลี่ยของแต่ละโหนดทั้งหมด m โหนด การกำหนดพื้นที่

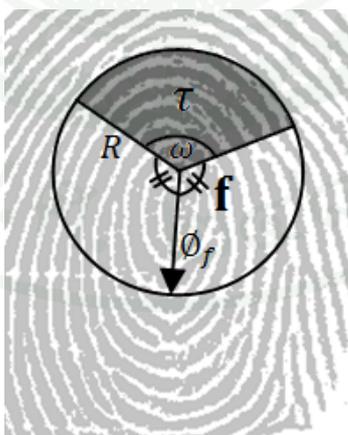
ลายนิ้วมือดังกล่าวจะเลือกจากบริเวณที่ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของมุมที่สร้างจุดตัดเฉลี่ย ($\bar{\rho}_{avg}$) ที่มีค่ามากที่สุด

3.2 ขั้นตอนการตรวจหาตำแหน่งจุดโฟกัส (Focal Point Localization)

จุดตัดที่สร้างจากบริเวณลายนิ้วมือที่มีปริมาณความโค้งมากที่สุด (RoHC) จะถูกกำหนดเป็นจุดโฟกัสเมื่อผ่านการตัดสินใจด้วยกระบวนการวนซ้ำดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1) ขั้นตอนการเลือกตำแหน่งของจุดตัดเริ่มต้น (Focal Point Estimation) ตำแหน่งใดๆที่มีการกระจุกตัวของจุดตัดแบบเฉพาะที่ (Local Crossing Point) มากที่สุด (จากการกระจายตัวของจุดตัดแบบท้องถิ่นของสมาชิก (บล็อก) ในแต่ละพื้นที่ที่อยู่ในบริเวณลายนิ้วมือที่มีปริมาณความโค้งมากที่สุด) จะถูกกำหนดให้เป็นตำแหน่งที่คาดว่าจะจะเป็นจุดโฟกัส ($f_c = (f_x, f_y)$)

ขั้นที่ 2) ขั้นตอนการกำหนดพื้นที่ส่วนโค้งด้านบนของลายนิ้วมือ (Region of North Curvature Estimation) จากที่ได้กล่าวไปแล้วบริเวณที่สำคัญในการสร้างจุดตัดจะเป็นบริเวณของส่วนโค้งด้านบนของลายนิ้วมูดังนั้นในขั้นตอนนี้เป็นการประมาณบริเวณเพื่อตรวจสอบตำแหน่งของจุดที่คาดว่าจะจะเป็นจุดโฟกัส พื้นที่ส่วนโค้งด้านบนของลายนิ้วมือ ($\tau = RONC(f_c, \theta_{f_c}, R, \omega)$) จะประมาณได้จากพื้นที่ด้านบนของลายนิ้วมือ ซึ่งตรงข้ามกับทิศทางของจุดโฟกัส, θ_{f_c} จากวงกลมรัศมี R จุดภาพจากตำแหน่งที่คาดว่าจะจะเป็นจุดโฟกัส (f_c) และกึ่งทำมุม ω องศาแสดงในภาพที่ 37 โดยในวิทยานิพนธ์กำหนดให้ $R = 60$ จุดภาพและ $\omega = 120$ องศา



ภาพที่ 37 บริเวณพื้นที่ด้านบนของลายนิ้วมือ (Region of North Curvature)

พิจารณาทิศทางของจุดโฟกัส (θ_j) สามารถคำนวณจากวิธีการหาแกนสมมาตรของทิศทางลายนิ้วมือ (Local Axial Symmetry Technique, LAS) ซึ่งนำเสนอโดย Liu *et al.* (2006) ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Sym}(\theta) = \frac{2}{\sigma} \sum_{j=0}^{\sigma/2} \sum_d^R \cos \left[\theta(\text{Pos}(f,d,\theta+j)) + \theta(\text{Pos}(f,d,\theta-j)) - \frac{8\pi\theta}{\sigma} \right] \quad (21)$$

$$\text{Pos}(f,d,\theta) = [u(f_x,d,\theta), v(f_y,d,\theta)] \quad (22)$$

$$u(f_x,d,\theta) = [f_x + d \cos(\theta) + d \sin(\theta)] \quad (23)$$

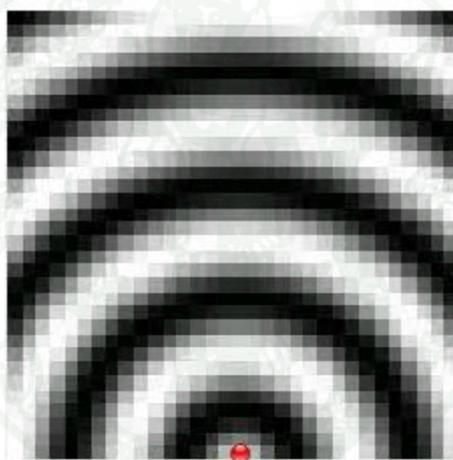
$$v(f_y,d,\theta) = [f_y + d \cos(\theta) - d \sin(\theta)] \quad (24)$$

สมการที่ (21) $\text{Sym}(\cdot)$ เป็นฟังก์ชันการคำนวณความสมมาตรของสนามทิศทางลายนิ้วมือที่องศา (θ) ใดๆ สำหรับพารามิเตอร์ต่างๆ ประกอบด้วย d คือระยะห่างจากตำแหน่งของจุดโฟกัส และ i คือทิศทางรอบจุดโฟกัส โดยค่าคะแนนของฟังก์ชันจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่าคะแนนบริเวณใดมีความสมมาตรของสนามทิศทางลายนิ้วมือนั้นค่าคะแนนของฟังก์ชันจะเข้าใกล้ 1 ตรงกันข้ามถ้าบริเวณลายนิ้วมือใดมีความสมมาตรของสนามทิศทางน้อยค่าคะแนนของฟังก์ชันก็จะเข้าใกล้ 0 โดย $\theta(\text{POS})$ เป็นองศาของสนามทิศทางบริเวณตำแหน่งใดๆ $\text{Pos}(\text{center}, \text{radian}, \text{degree})$ เป็นฟังก์ชันในการคำนวณหาตำแหน่งรอบจุดศูนย์กลางของจุดโฟกัสใดๆ เพื่อคำนวณหาความสมมาตรของสนามทิศทางบริเวณพื้นที่นั้นๆ R เป็นรัศมีของพื้นที่วงกลมที่สนใจและ σ เป็นระดับความละเอียดของทิศทาง โดยสำหรับวิทยานิพนธ์นี้กำหนด $\sigma = 360$ ระดับ

ขั้นที่ 3) ขั้นตอนการตรวจสอบตำแหน่งของจุดโฟกัส (Convergence Test) ในขั้นตอนนี้จะทำการคำนวณทิศทางของลายนิ้วมือนี้ด้วยรูปแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม (Half Concentric Lens Model) ดังรูปที่ 37 ซึ่งนำเสนอโดย Boonchaiseree และ Areekul (2009) ในการทำการคำนวณจะเลือกคำนวณเพียงบริเวณพื้นที่ส่วนโค้งด้านบนของลายนิ้วมือ (τ) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2) โดยพิจารณาว่าบริเวณดังกล่าวของเส้นลายนิ้วมือนั้นทิศทางการวางตัวคล้ายคลึงกับแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมมากน้อยเพียงใด โดยสามารถพิจารณารายละเอียดได้จากสมการดังต่อไปนี้

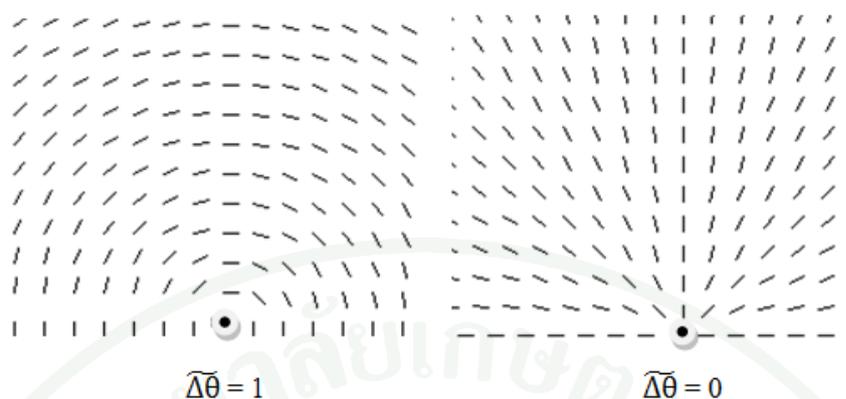
$$\tilde{\Delta\theta} = \frac{1}{N} \left(\sum_{r \in \tau} \left(1 - \frac{\text{Abs}_{dir}(\text{ang}_f(r), \varphi(r))}{\pi/2} \right) \right) \quad (25)$$

สมการที่ (25) กำหนดให้ r เป็นบล็อกใดๆที่อยู่ภายในพื้นที่บริเวณส่วนโค้งด้านบนของจุดโฟกัสมีจำนวน N บล็อก ค่า $\tilde{\Delta\theta}$ ที่ได้จากสมการมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$ กล่าวคือ ในกรณีที่ค่า $\tilde{\Delta\theta} = 0$ หมายความว่าทิศทางต่างๆในอาณาบริเวณรูปเลนส์ครึ่งวงกลมไม่มีความคล้ายคลึงกับแบบจำลองเลข หรือเส้นลายนิ้วมือมีลักษณะตั้งฉากกับแบบจำลองลายนิ้วมือ ส่วนในกรณีที่ค่า $\tilde{\Delta\theta} = 1$ จะพบว่าทิศทางเส้นลายนิ้วมือที่ทำการวิเคราะห์อยู่นั้น มีลักษณะเป็นเลนส์ครึ่งวงกลมที่สมบูรณ์ หรือเส้นลายนิ้วมือเรียงตัวตามแบบจำลองลายนิ้วมือ ตัวอย่างค่า $\tilde{\Delta\theta}$ ที่เกิดจากการจำลองสนามทิศทางพิจารณาดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ภาพจำลองเส้นลายนิ้วมือที่มีลักษณะการวางตัวเป็นวงกลมโดยสมบูรณ์

ที่มา: Boonchaiseree และ Areekul (2009)



ภาพที่ 39 ค่าแฟกเตอร์แสดงความคล้ายคลึงกับเลนส์ครึ่งวงกลมในอาณาบริเวณที่ลักษณะของสนามทิศทางแตกต่างกัน

ที่มา: Boonchaiseree และ Areekul (2009)

ค่าแฟกเตอร์ดังกล่าวจะใช้เพื่อตรวจสอบว่าทิศทางของเส้นลายนิ้วมือบริเวณดังกล่าวมีปริมาณความโค้งของเส้นลายนิ้วมือเกินกว่าเกณฑ์อ้างอิงที่กำหนดไว้หรือไม่ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดเกณฑ์อ้างอิงสำหรับส่วนโค้งที่สร้างจุดโฟกัสไว้ที่ 0.85 ถ้าปริมาณความโค้งที่ได้มากกว่าค่าเกณฑ์อ้างอิงที่กำหนดไว้ จุดตัดที่คาดว่าจะเป็นตำแหน่งของจุดโฟกัสจะถูกกำหนดให้เป็นจุดโฟกัสของลายนิ้วมือ (Focal point) ถ้าไม่ถึงเกณฑ์จะทำการคำนวณในขั้นที่ 1) ใหม่เพื่อหาจุดที่คาดว่าจะเป็นตำแหน่งของจุดโฟกัสอื่นๆ แล้ววนซ้ำในขั้นตอนการตรวจหาจุดโฟกัสจนกว่าจะกำหนดจุดโฟกัสได้ สำหรับลายนิ้วมือที่ไม่สามารถผ่านเกณฑ์อ้างอิงต่างๆ ได้ อัลกอริทึมจะรายงานว่าไม่สามารถตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัสได้ จากลักษณะเด่นที่ได้จากการตรวจหาจุดโฟกัสประกอบด้วย 2 ลักษณะเด่นคือตำแหน่งของจุดโฟกัสและทิศทางของจุดโฟกัสดังรูปที่ 40 นอกจากการนำลักษณะเด่นดังกล่าวมาใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อจัดเรียงอันดับข้อมูลลายนิ้วมือแล้ว ลักษณะเด่นจากทิศทางของจุดโฟกัสยังสามารถใช้เป็นทิศทางอ้างอิงในการแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือตามทิศทางของจุดตัดแบบเฉพาะที่อีกด้วย



ภาพที่ 40 ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการตรวจหาจุดโฟกัส

ในการทดลองจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแม่นยำของจุดโฟกัสจากรูปแบบการคำนวณด้วยวิธีต่างๆ 4 ประเภทด้วยกันโดยจะกล่าวในรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การสร้างจุดตัดแบบทั่วไป (Global crossing)

วิธีการนี้เป็นการคำนวณจุดตัดจากทิศทางตั้งฉากของเส้นลายนิ้วมือ (Directional Field, DF) โดยจะทำการเลือกคู่ของบล็อกลายนิ้วมือใดๆ ที่สามารถคำนวณหาจุดตัดได้ จากนั้นทำการตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัสด้วยวิธีการตรวจหาจุดโฟกัส (Focal Point Detection) ที่ได้กล่าวไปข้างต้น ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวิธีนี้เป็นวิธีพื้นฐานในการคำนวณจุดโฟกัสที่นำเสนอโดย Rerkrai และ Areekul (2000)

2. การสร้างจุดตัดแบบทั่วไปโดยมีการคัดเลือกบริเวณความโค้ง (Global Crossing Using RoHC)

วิธีการนี้จะเป็นการนำสนามทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ (DF) มาทำการคำนวณหาการแทนกราฟด้วยวิธีการหาความสัมพันธ์ของพื้นที่ลายนิ้วมือด้วยการแทนกราฟ (Graph Representation) ซึ่งจะแบ่งทิศทางของลายนิ้วมือออกได้เพียง 6 ทิศทาง (เนื่องจาก DF มีระดับของทิศทางเพียง 0-180 องศา) หลังจากนั้นจึงนำบริเวณที่คัดเลือกไปคำนวณหาจุดตัดแบบทั่วไปเพื่อกำหนดตำแหน่งของจุดโฟกัสต่อไป

3. การใช้จุดตัดแบบเฉพาะที่ตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัสโดยไม่มีการคัดเลือกบริเวณ (Local Crossing Without Using RoHC)

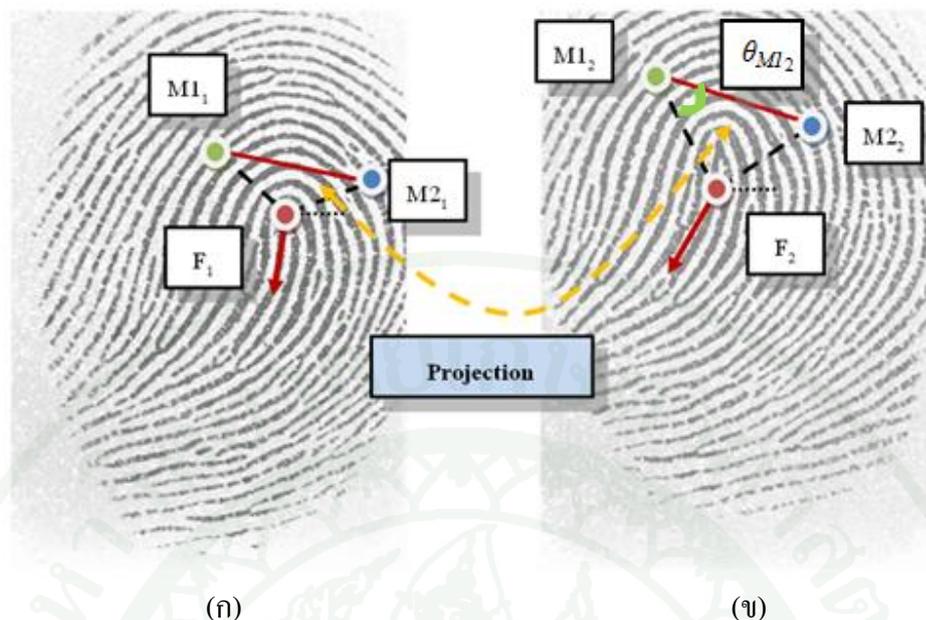
ในขั้นตอนนี้จะนำจุดตัดที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนการคำนวณจุดตัดแบบเฉพาะที่ (Local Crossing Point) มาทำการตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัสโดยไม่มีการลดจำนวนจุดตัดด้วยการพิจารณาการแทนกราฟ โดยจะใช้การกระจายตัวของจุดตัดเหล่านั้นไปตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัสเลย

4. การใช้จุดตัดแบบเฉพาะที่โดยคัดเลือกบริเวณความโค้งในการตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัส (Local Crossing Using RoHC)

สำหรับขั้นตอนนี้เป็นการนำการแบ่งทิศทางลายนิ้วมือด้วยจุดตัดแบบเฉพาะที่ (Local Crossing) และทำการคัดเลือกบริเวณความโค้ง (Region of Highest Curvature Zone) ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มาทำการตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัสของภาพลายนิ้วมือ

การตรวจสอบประสิทธิภาพความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสด้วยวิธีการสามเหลี่ยม

พิจารณาจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นบนภาพลายนิ้วมือใดๆจะพบว่า จุดโฟกัสไม่สามารถกำหนดได้ด้วยการมองตามปกติ (Manually Mark Detection) เนื่องจากเมื่อพิจารณาสมมุติฐาน และทฤษฎีที่นำมาใช้ในการคำนวณหาจุดโฟกัสจากขั้นตอนที่กล่าวมาแล้ว จะพบว่าจุดโฟกัสที่เกิดขึ้น เกิดจากการคำนวณหาจุดกึ่งกลางของจุดตัดที่เกิดจากอาณาบริเวณที่เส้นลายนิ้วมือใดๆ ที่มีลักษณะการวางตัวใกล้เคียงกับแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมมากที่สุด ด้วยเหตุนี้เองการมองด้วยตาเปล่าและกำหนดจุดลงด้วยตา จึงเป็นเรื่องที่ใช้เวลามาก และส่งผลต่อประสิทธิภาพของผลลัพธ์โดยตรง ดังนั้นการวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ผลลัพธ์จากการวัดที่ออกมานั้นเป็นที่น่าเชื่อถือในทางทฤษฎีและปฏิบัติ ในที่นี้จะนำเสนอการวัดประสิทธิภาพความแม่นยำของตำแหน่งจุดโฟกัสด้วยการฉาย (Projection) จุดโฟกัสด้วยรูปสามเหลี่ยม โดยรูปแบบการวัดสามารถพิจารณารายละเอียดการคำนวณได้ดังตัวอย่างการคำนวณต่อไปนี้



ภาพที่ 41 การวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสด้วยวิธีการสามเหลี่ยมของภาพลายนิ้วมือของบุคคลคนเดียวกัน (ก) ลายนิ้วมือที่ 1 และ (ข) ลายนิ้วมือที่ 2

พิจารณาพิสัยของจุดต่างๆที่เกิดขึ้นจากภาพภาพที่ 41 ตำแหน่งของจุด $M1$ และ $M2$ หาได้จากการกำหนดตำแหน่งใดๆ ตามความเหมาะสมโดยใช้การสังเกตโดยตรงและทำการกำหนดตำแหน่งลงโดยบุคคล โดยตำแหน่งดังกล่าวสามารถพบได้ในทุกๆ ภาพลายนิ้วมือของนิ้วเดียวกัน ในฐานข้อมูลเพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงของทุกๆ ภาพ

สำหรับการคำนวณหาค่าระยะส่วนของเส้นตรงต่างๆที่สำคัญได้ตั้งวิธีการตามสมการ

$$\overline{p_1 p_2} = \sqrt{(x_{p_1} - x_{p_2})^2 + (y_{p_1} - y_{p_2})^2} \quad (26)$$

พิจารณาสมการที่ (26) เมื่อ p_1 และ p_2 เป็นตำแหน่งของจุดใดๆของภาพลายนิ้วมือที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากนั้นคำนวณหาค่าอัตราส่วนระหว่างด้านของสามเหลี่ยม โดยกำหนดให้ด้าน $\overline{M1_1 M2_1}$ และ $\overline{M1_2 M2_2}$ มีระยะทางเท่ากันก่อนที่จะเปรียบเทียบหาระยะทางของด้านที่เหลือ สำหรับรูปแบบการคำนวณสามารถพิจารณาตามตัวอย่างต่อไปนี้

$$m_{12} = \frac{\overline{M1_2 M2_2}}{\overline{M1_1 M2_1}} \quad (27)$$

$$\overline{MI_2F_2}_{\text{projection}} = m_{12} \times \overline{MI_2F_2} \quad (28)$$

$$\overline{M2_2F_2}_{\text{projection}} = m_{12} \times \overline{M2_2F_2} \quad (29)$$

โดย F_2 คือจุดโฟกัสที่หาได้ของภาพลายนิ้วมือที่ 2 โดยต้องการที่จะทำการประมาณเชิงเส้นที่จะทำให้จุด F_2 นี้ไปอยู่ในภาพลายนิ้วมือที่ 1 พิจารณาสมการที่ (26) กำหนดให้ m_{12} เป็นอัตราส่วนของด้านอ้างอิง ($\overline{MI_1M2_1}$ และ $\overline{MI_2M2_2}$) สำหรับ $\overline{MI_2F_2}_{\text{projection}}$ และ $\overline{M2_2F_2}_{\text{projection}}$ เป็นระยะทางของด้านที่เหลือที่ได้จากการเปรียบเทียบระยะทาง ในขั้นสุดท้ายจะเป็นการเปรียบเทียบรูปสามเหลี่ยมทั้งสองเพื่อคำนวณความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสดังสมการต่อไปนี้

$$x_{F_2\text{projection}} = x_{F_1} + \overline{MI_2F_2}_{\text{projection}} \cos(\theta_{M2_2}) \quad (30)$$

$$y_{F_2\text{projection}} = y_{F_1} + \overline{MI_2F_2}_{\text{projection}} \sin(\theta_{M2_2}) \quad (31)$$

$$DE = \sqrt{(x_{F_1} - x_{F_2\text{projection}})^2 + (y_{F_1} - y_{F_2\text{projection}})^2} \quad (32)$$

พิจารณาสมการที่ (30) และ (31) เป็นการเปรียบเทียบตำแหน่งของจุดโฟกัสของภาพลายนิ้วมือที่ 2 ให้มาอยู่ในภาพลายนิ้วมือที่ 1 ($x_{F_2\text{projection}}, y_{F_2\text{projection}}$) เมื่อ θ_{M2_2} เป็นมุมของสามเหลี่ยม ในสมการที่ (32) ค่า DE เป็นระยะทางคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของจุดโฟกัสภาพลายนิ้วมือที่ 2 เมื่อเทียบกับตำแหน่งของจุดโฟกัสภาพลายนิ้วมือที่ 1 (Distance Error, DE)

เมื่อทำการฉายจุดตัดเพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งของจุดโฟกัสเรียบร้อยแล้ว ต่อมาจะเป็นการคำนวณหาทิศทางคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัส (Orientation Error, OE) โดยจะใช้ทิศทางของจุดโฟกัสทั้งสองหลังจากทำการฉายรูปสามเหลี่ยมไปยังภาพลายนิ้วมือที่ 1 แล้วด้วยสมการดังนี้

$$OE = |\theta_{F_1} - \theta_{F_2\text{projection}}| \quad (33)$$

พิจารณาสมการที่ (33) ค่า OE จำนวนได้จากความแตกต่างของทิศทางโพกัสของทั้งสอง โดยผลของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง (DE) และผลของความคลาดเคลื่อนของทิศทาง (OE) จะสามารถนำมากำหนดเป็นค่าเฉลี่ยเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ได้โดยตรง



ผลและวิจารณ์

ผล

การทดลองการตรวจหาจุดโฟกัสด้วยการแทนกราฟจะใช้ฐานข้อมูลลายนิ้วมือ FVC2000DB2a ในการทดสอบประสิทธิภาพของการหาตำแหน่งจุดโฟกัส โดยฐานข้อมูลดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2 รายละเอียดของฐานข้อมูล FVC2000DB2 ซึ่งใช้ในการทดสอบ

รายละเอียดที่สำคัญ	ฐานข้อมูล
	FVC2000DB2a
จำนวนภาพทั้งหมด	800
จำนวนลายนิ้วมือ	100
จำนวนภาพลายนิ้วมือ/คน	8
ชื่ออุปกรณ์ตรวจวัด	TouchChip
เทคโนโลยีเก็บลายนิ้วมือ	Capacitive Sensor
บริษัทผู้ผลิต	ST Microelectronics
ขนาดของภาพ (จุดภาพ)	256×364
ความละเอียดภาพ(dpi)	500

ที่มา: Fingerprint Verification Competition FVC2000

พิจารณาตารางที่ 2 พบว่าในการวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นในแต่ละภาพนั้น จะต้องพิจารณาร่วมกับจุดโฟกัสของภาพอื่นๆ ที่เป็นลายนิ้วมือเดียวกัน ดังนั้นในกรณีที่แต่ละลายนิ้วมือมี 8 ภาพ ค่าทางสถิติที่เกิดจากการวัดผลต่างๆ ต้องทำการวิเคราะห์ร่วมกันกับอีก 7 ภาพที่เหลือด้วย ยกตัวอย่างเช่น ถ้าคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากภาพที่ 1 กับภาพที่ 2 ของลายนิ้วมือเดียวกันเรียบร้อยแล้ว ค่าดังกล่าวยังไม่สามารถสรุปทันทีได้ ต้องพิจารณาภาพที่ 1 กับภาพที่ 3 จนถึง 8 ร่วมกัน แล้วนำค่าดังกล่าวทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าดังกล่าวนี้เองคือผลลัพธ์ของการหา

จุดโฟกัสของภาพที่ 1 ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์จริง เช่นเดียวกัน ภาพที่เหลือ (ได้แก่ ภาพที่ 2 ถึง 8) ทำการวัดกับภาพอื่นในลายนี้นี้มือเดียวกันให้ครบจากนั้นจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ต่อไป (ยกเว้น ภาพลายนี้นี้มือภาพเดียวกันเอง) สาเหตุที่ต้องทำการวัดดังที่กล่าวมาแล้วก็เพื่อให้ผลลัพธ์มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด และไม่ให้เกิดการเอนเอียงไปในทางใดทางหนึ่งมากเกินไป เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมอีก จะพบว่าคุณลักษณะของแต่ละฐานข้อมูลมีรายละเอียดที่แตกต่างกันไปตามอุปกรณ์รับภาพ ซึ่งไม่สามารถนำภาพลายนี้นี้มือจากฐานข้อมูลต่างๆมารวมกัน แล้ววัดประสิทธิภาพพร้อมกันได้, พารามิเตอร์ต่างๆ รวมทั้งวิธีการย่อยในการหาจุดโฟกัสที่มีหลากหลายรูปแบบ และต้องปรับเปลี่ยนตามฐานข้อมูล ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการนำเสนอวิธีวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของจุดโฟกัสด้วยวิธีการวัดแบบสามเหลี่ยม ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

การวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสจะใช้ค่าความแตกต่างของระยะทาง (Distance error, DE) และความแตกต่างของทิศทาง (Orientation error, OE) เป็นตัววัดประสิทธิภาพ และยังได้นำเอาวิธีการปรับปรุงภาพลายนี้นี้มือรูปแบบอื่นที่ได้กล่าวในหัวข้อการตรวจเอกสารเป็นตัวเปรียบเทียบ โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบหาจุดอ้างอิงโดยใช้การวิเคราะห์ค่าความแรง (Coherence) ของสนามทิศทางตามระดับความสำคัญ (Hierarchical Analysis) โดย M. Liu *et al.* (2005)
2. ตรวจสอบหาจุดอ้างอิงด้วยความสมมาตรของเส้นลายนี้นี้มือ (Local Axial Symmetry, LAS) โดย T. Liu *et al.* (2006)
3. การตรวจสอบหาจุดโฟกัสโดยใช้ค่าเฉลี่ยจุดกึ่งกลางของการกระจายตัวของจุดตัด โดย Areekul *et al.* (2006)
4. การตรวจสอบหาจุดโฟกัสโดยใช้แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม โดย Boonchaiseree *et al.* (2009)
5. การตรวจสอบหาจุดโฟกัสโดยใช้จุดตัดแบบเฉพาะที่ (Local Crossing Point, LCP) เป็นการนำการกระจายตัวของจุดตัดแบบเฉพาะที่ไปคำนวณหาจุดโฟกัสตามที่ได้เสนอในหัวข้อขั้นตอนการตรวจสอบหาจุดโฟกัส (Focal Point Detection)
6. การตรวจสอบหาจุดโฟกัสจากการสร้างจุดตัดแบบทั่วไปโดยมีการคัดเลือกบริเวณความโค้ง (DF+graph) เป็นการคัดเลือกพื้นที่ที่สนใจจากโครงสร้างกราฟโดยใช้สนามทิศทางในการแบ่งพื้นที่ลายนี้นี้มือ (DF จะมีทิศทางอยู่ระหว่าง 0-180 องศา) ก่อนที่จะนำทิศทางตั้งฉากของสนามทิศทางมาคำนวณหาจุดตัดด้วยการคำนวณหาจุดตัด

7. การตรวจหาจุดโฟกัสจากจุดตัดแบบเฉพาะที่โดยการคัดเลือกบริเวณความโค้ง (LCP +graph) เป็นวิธีที่นำลักษณะเด่นที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มาทำการตรวจหาคำแหน่งของจุดโฟกัส

โดยในวิธีการที่ 5-7 เป็นการนำเสนอเพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสที่สามารถคำนวณได้จากในวิทยานิพนธ์นี้ สำหรับรายละเอียดผลการทดลองทั้งหมดสามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

ผลการทดลองจากฐานข้อมูลลายนิ้วมือ FVC2000DB2a

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่ทำการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับฐานข้อมูล FVC2000DB2a

พารามิเตอร์	ค่าที่ทำการทดสอบ	ค่าที่ดีที่สุด	หน่วย
ขนาดบล็อกจตุรัส (N)	8, 16, 32	8	จุดภาพ(Pixel)
*ค่าความแรงของสนามทิศทาง(β)	คงที่	0.3	-
ค่าระดับทิศทาง (n_q)	คงที่	12	-
เกณฑ์คัดกรองค่าเฉลี่ยความโค้ง ($\tilde{\rho}_{Threshold}$)	คงที่	0.75	-
ค่าระดับความละเอียดของทิศทาง (σ)	คงที่	360	องศา (Degree)
รัศมีของพื้นที่ที่สนใจรอบจุดโฟกัส (R)	5 – 10	8	บล็อก
รัศมีรอบจุดตัด (l)	5,10,15,20	10	จุดภาพ(Pixel)
ขอบเขตของความแตกต่างของทิศทาง (ω)	$0 - \pi$	$\frac{2}{3}\pi$	องศา (Degree)
เกณฑ์คัดกรองจำนวนของจุดตัด ($E_{threshold}$)	5,10,20	5	ตำแหน่ง
ระดับความละเอียดในการบิด ($\omega_{threshold}$)	45,90,145,180	45	องศา (Degree)

หมายเหตุ *ค่าคงที่กำหนดตาม Areekeul et al. (2008) และ Boonchaiseree et al. (2009)

พิจารณาตารางที่ 3 แสดงการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ทำการทดลองภายในวิทยานิพนธ์นี้ โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามรายละเอียดของช่วงที่ทดสอบตามตาราง

และจากผลการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าว จะพบค่าที่ดีที่สุดของพารามิเตอร์ที่ทำให้ผลการตรวจหาจุดโฟกัสนั้นมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรวมต่ำที่สุด โดยผลลัพธ์ของค่าความคลาดเคลื่อน, ความเสถียรของทิศทางอ้างอิง และเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะแสดงดังตารางที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจุดโฟกัสโดยการวัดความคลาดเคลื่อนแบบสามเหลี่ยมกับงานวิจัยการหาจุดอ้างอิงรูปแบบอื่นๆ ในฐานข้อมูล FVC2000DB2a

Algorithms	Distance Error (pixels)					Accuracy (%)	
	[0, 10]	(10, 20]	(20, 40]	> 40	Fail	≤ 10 pixel	≤ 20 pixel
Areekul (2008)	610	124	44	21	1	76.25	91.75
T. Liu <i>et al.</i> (2006)	654	91		46	9	81.75	93.13
Proposed (LCP)	656	105	21	14	4	82.00	95.13
M. Liu <i>et al.</i> (2005)	659	90	25	13	13	82.38	93.63
Boonchaiseree <i>et al.</i> (2009)	668	101	26	5	-	83.50	96.12
Proposed (DF+graph)	675	91	15	13	6	84.38	95.75
Proposed (LCP+ graph)	714	64	11	6	5	89.25	97.25

Algorithm	Distance Error (pixels)		Accuracy (%)
	[0, 15)	> 15	< 15 pixels
Proposed (LCP)	733	67	91.625
Proposed (DF+graph)	747	53	93.375
K. Nilsson <i>et al.</i> (2003)	749	51	93.625
Boonchaiseree <i>et al.</i> (2009)	751	49	93.875
Proposed (LCP+ graph)	763	37	95.375

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบทิศทางอ้างอิงของจุดโฟกัสกับงานวิจัยการหาจุดอ้างอิงรูปแบบอื่นๆ
 ในฐานข้อมูล FVC2000DB2a

ขั้นตอนวิธี	Orientation Error, OE (degree)			Accuracy (%)	
	[0, 11.25]	(11.25, 22.5]	> 22.5	Fail	< 22.5 pixels
Boonchaiseree <i>et al.</i> (2009)	521	136	143	-	82.125
T. Liu <i>et al.</i> (2006)	690	47	50	13	93.647
Proposed (LCP)	751	29	16	4	97.5
Proposed (DF+graph)	753	26	15	6	97.37
Proposed (LCP+ graph)	767	20	8	5	98.375

ตารางที่ 6 เวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนของการตรวจหาจุดโฟกัสในฐานข้อมูล
 FVC2000DB2a

ขั้นตอนวิธี	เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนวิธี (มิลลิวินาที, ms)		
	LCP	DF+graph	LCP+graph
คำนวณจุดตัดแบบทอจกัน	3.98	-	3.98
โครงสร้างกราฟ	-	1.43	1.64
การตรวจหาจุดโฟกัส	11.8	148.60	9.29
เวลาเฉลี่ยรวม	15.08	150.03	14.91

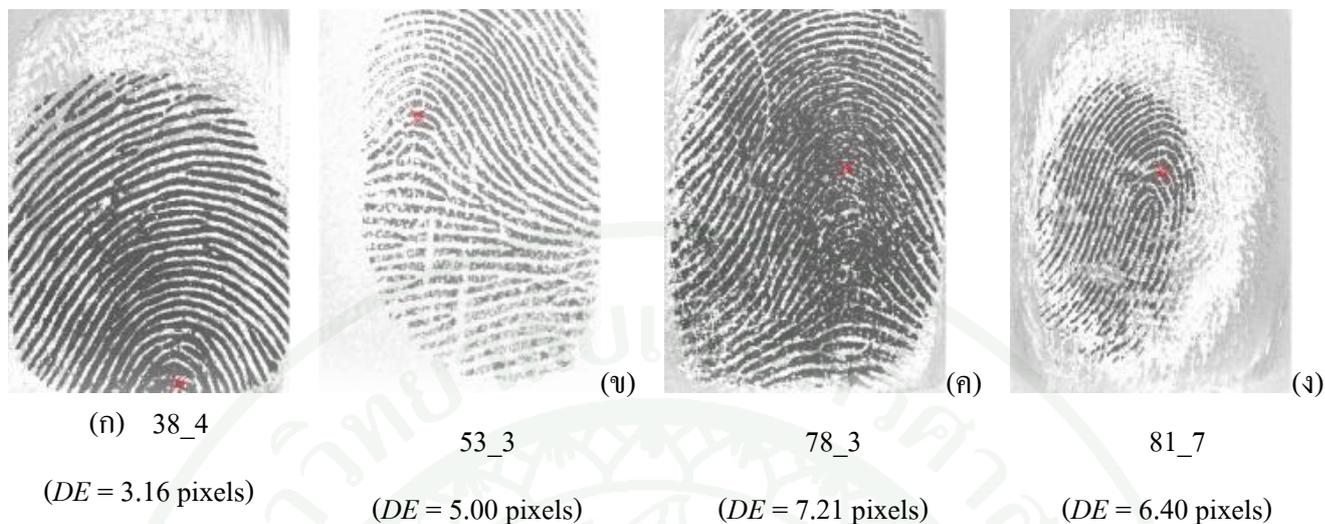
ตารางที่ 7 เวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนของการตรวจหาจุดโฟกัส และผลการเปรียบเทียบงานวิจัยการหาจุดโฟกัสก่อนหน้าในฐานข้อมูล FVC2000DB2a

ขั้นตอนวิธี	เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนวิธี (มิลลิวินาที, ms)			
	Areekul <i>et al.</i> (2006)	Areekul <i>et al.</i> (2008)	Boonchaiseree <i>et al.</i> (2009)	Proposed Alg. (LCP+graph)
การคัดเลือกบริเวณลายนิ้วมือ	26.98	-	-	-
การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ	548.82	13.10	13.10	13.10
การตรวจหาจุดโฟกัส	30.10	29.52	61.94	14.91
เวลาเฉลี่ยรวม	605.90	42.62	75.04	28.01

หมายเหตุ ทดสอบจับเวลาโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Centrino Duo 1.6 GHz หน่วยความจำ 2 GBytes ระบบปฏิบัติการ Window Vista Service Pack 1

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าการตรวจหาตำแหน่งของจุดโฟกัสด้วยจุดตัดแบบเฉพาะที่และผ่านการคัดเลือกบริเวณความโค้งของเส้นลายนิ้วมือ (LCP+graph) ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดในทุกๆ ผลการทดลอง โดยค่าความคลาดเคลื่อนในช่วง 0-10 จุดภาพมีปริมาณข้อมูลความแม่นยำสูงถึง 89.25% ซึ่งมากกว่าวิธีอื่นๆอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้พบว่า 98.375% ของภาพลายนิ้วมือมีค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางอ้างอิงในช่วง 0-11.25 องศา ซึ่งบ่งชี้ว่าการตรวจหาจุดโฟกัสด้วยวิธีที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้มีความเสถียรของตำแหน่งและทิศทางของจุดโฟกัสอย่างมาก และเมื่อพิจารณาสำหรับประสิทธิภาพของเวลาการทำงานพบว่าระยะเวลาในการคำนวณยังน้อยกว่าวิธีการตรวจหาตำแหน่งจุดโฟกัสด้วยวิธีอื่นๆอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีภาพลายนิ้วมือที่ไม่สามารถตรวจพบจุดโฟกัสจำนวน 5 ภาพเนื่องมาจากข้อมูลสนามทิศทางไม่สมบูรณ์ โดยปริมาณของภาพลายนิ้วมือบริเวณส่วนโค้งด้านบนไม่เพียงพอ) ทำให้ไม่สามารถกำหนดตำแหน่งของจุดโฟกัสได้ พิจารณาภาพตัวอย่างผลลัพธ์การตรวจหาจุดโฟกัสดังแสดงในภาพที่ 42 ทั้งนี้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเนื่องมาจากการแก้ปัญหาจุดตัดที่เกิดจากลายนิ้วมือประเภทกระโจມและกระโจມสูงดังภาพที่ 43



ภาพที่ 42 ตัวอย่างจุดโฟกัสที่ทำการตรวจหาในฐานข้อมูล FVC2000DB2a



ภาพที่ 43 ตัวอย่างการกระจายตัวของจุดตัดจากลายนิ้วมือประเภทกระโจม (ก) สีแดงแสดงถึงบริเวณเส้นลายนิ้วมือที่มีจุดตัดตัดกันบนบริเวณพื้นที่สีฟ้า (ข) แสดงถึงพื้นที่สีฟ้าซึ่งมีบริเวณที่เล็กกว่าจากการตัดกันของจุดตัดแบบเฉพาะที่

เมื่อพิจารณาภาพที่ 43 พบว่าบริเวณการกระจายตัวของจุดตัดที่เกิดจากการคำนวณจุดตัดแบบเฉพาะที่มีการกระจายตัวของจุดตัดที่มากกว่าเนื่องจากการคำนวณจุดตัดแบบเฉพาะที่ทำให้สามารถทราบได้ว่าส่วนโค้งแต่ละเส้นของลายนิ้วมือมีความโค้งประเภทใด ซึ่งอาจเป็น โค้งขึ้น

ด้านบนหรือโค้งลงด้านล่าง ทำให้ประสิทธิภาพของลายนิ้วมือประเภทดังกล่าวมีความแม่นยำมากขึ้น

วิจารณ์

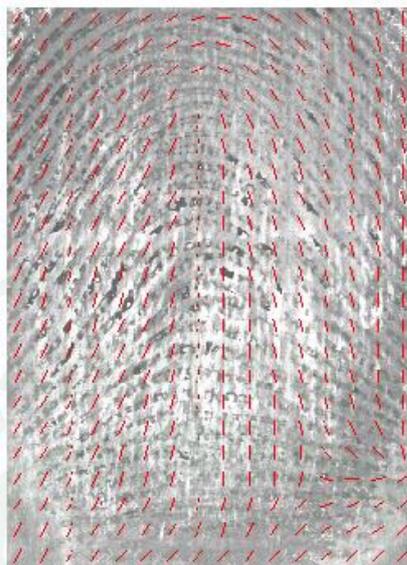
จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่แล้วพบว่า การตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้จุดตัดแบบเฉพาะที่และทำการคัดเลือกบริเวณความโค้งของเส้นลายนิ้วมือด้วยการแทนกราฟ ที่ได้ นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ทดสอบกับฐานข้อมูล FVC2000DB2a พบว่ามีประสิทธิภาพที่ดีในเรื่องของความแม่นยำและความรวดเร็วในการทำงาน สามารถนำไปใช้งานในทางปฏิบัติจริงได้

อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณา ปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้ 2 หัวข้อใหญ่ได้แก่ ปัญหาที่เกิดจากคุณภาพของภาพลายนิ้วมือ และปัญหาที่เกิดจากรูปแบบขั้นตอนวิธีการตรวจหาจุดโฟกัส วิจารณ์รายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ปัญหาที่เกิดจากคุณภาพของลายนิ้วมือ นับว่าเป็นปัญหาหลักของการประมวลผลภาพ และเป็นปัญหาที่มีผลกระทบต่อระบบรู้จำลายนิ้วมืออย่างมาก เนื่องจากในกรณีที่ถ้าภาพลายนิ้วมือมีคุณภาพต่ำมาก อาจทำให้ระบบปฏิเสธการทำงานในกระบวนการต่างๆทั้งหมด หรือถ้าเข้ามาในระบบ อาจทำให้ระบบเกิดความผิดพลาดได้ เช่นเดียวกัน ในแง่ของการหาจุดอ้างอิง ภาพลายนิ้วมือที่มีคุณภาพต่ำ มักจะทำให้ไม่สามารถหาจุดอ้างอิงได้ หรือถ้าหาได้ก็อาจไม่แม่นยำเท่าที่ควร สำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับคุณภาพของลายนิ้วมือ สามารถแบ่งเป็นหัวข้อย่อยต่างๆ ดังนี้

1.1 สนามติศทางมีความผิดพลาดสูง

ปัญหาเรื่องความผิดพลาดของสนามติศทางมักจะเกิดจากการที่เส้นลายนิ้วมือ อนุญาตบริเวณต่างๆที่ได้ทำการคำนวณนั้น มีคุณภาพต่ำ ตัวอย่างเช่น นิ้วมือมีลักษณะเปียก หรือแห้งมากจนเกินไป และรอยแตก หรือรอยแยกของลายนิ้วมือเป็นต้น เมื่อสนามติศทางมีความผิดพลาดสูงมากจะส่งผลกระทบต่อลักษณะการหาจุดโฟกัสโดยตรง เพราะพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการสร้างจุดตัดต่างๆในการตรวจหาจุดโฟกัสคือสนามติศทางที่มีความไม่ถูกต้องนั่นเอง วิจารณ์ตัวอย่างดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 ตัวอย่างสนามทิศทางของภาพลายนิ้วมือที่มีคุณภาพต่ำ

1.2 ข้อมูลภาพลายนิ้วมือไม่สมบูรณ์เพียงพอ

โดยทั่วไปแล้วลักษณะปัญหาดังกล่าวมักเกิดจากการที่ผู้ใช้งานมีทักษะ และความชำนาญในการใช้งานน้อย ทำให้การวางนิ้วลงบนตัวอุปกรณ์รับภาพไม่เหมาะสม ภาพลายนิ้วมือที่ได้จึงมีลักษณะขาดหายไป ถ้าพิจารณาตามทฤษฎีการตรวจหาจุดโฟกัสจะพบว่า จุดโฟกัสที่เสถียรภาพดี และมีความน่าเชื่อถือขึ้น เกิดจากปริมาณข้อมูลของเส้นลายนิ้วมือที่เข้ามาว่ามากหรือน้อยเพียงใด ดังนั้นถ้าภาพลายนิ้วมือที่เข้ามามีน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าภาพลายนิ้วมือที่เป็นส่วนโค้งด้านบนนั้นขาด หรือหายไปแล้ว จะพบว่าการตรวจหาจุดโฟกัสนั้น อาจตรวจไม่พบ หรือถ้าตรวจพบได้ ความแม่นยำและความน่าเชื่อถือก็ย่อมมีค่าต่ำ และไม่สามารถนำไปใช้งานในกระบวนการอื่นๆ ได้ พิจารณาตัวอย่างดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือที่ไม่สมบูรณ์

1.3 ความผิดเพี้ยนยืดหยุ่นของลายนิ้วมือ

ลักษณะปัญหาดังกล่าวเกิดจากปัญหาทางกายภาพของลายนิ้วมือ กล่าวคือ ลายนิ้วมือเมื่อมีการกระทบ หรือกดลงบนหน้าสัมผัสจะเกิดความยืดหยุ่นของผิวหนัง ณ บริเวณนั้น ทำให้หน้าภาพลายนิ้วมือที่ได้จากอุปกรณ์รับภาพมีการบิดเบี้ยวไปจากเดิม ปัญหาดังกล่าวนี้จะส่งผลกระทบต่อตรงกันสนามทิศทางเนื่องจาก ความผิดเพี้ยนยืดหยุ่นนี้ทำให้ทิศทางซึ่งเป็นตัวสร้างจุดตัดเพื่อทำให้เกิดจุดโฟกัสนั้นเปลี่ยนแปลงไป จุดโฟกัสที่ตรวจหามาได้จึงมีความคลาดเคลื่อนสูงตามไปด้วย พิจารณาตัวอย่างดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 จุดโฟกัสที่เกิดขึ้นในนิ้วเดียวกันเมื่อภาพลายนิ้วมือมีความผิดเพี้ยนยืดหยุ่นแตกต่างกัน



(a) 22_1



(b) 32_1



(c) 33_1



(d) 57_1



(e) 69_4

ภาพที่ 47 ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือซึ่งไม่สามารถหาคำแหน่งของจุดโฟกัสได้ เนื่องจากข้อมูลภาพลายนิ้วมือไม่สมบูรณ์

2. ปัญหาที่เกิดจากรูปแบบขั้นตอนวิธีการตรวจหาจุดโฟกัส

จากผลการทดลองภาพถ่ายนิ้วมือจำนวน 5 ภาพที่ไม่สามารถตรวจหาจุดโฟกัสได้นั้น เมื่อทำการพิจารณาโดยละเอียดพบว่าภาพถ่ายนิ้วมือทั้ง 5 ภาพดังแสดงในภาพที่ 48 จุดโฟกัสของภาพนั้นไม่สามารถคำนวณหาได้เนื่องจากบริเวณส่วนโค้งด้านบนของลายนิ้วมือขาดหายไป ซึ่งจากหลักการของการคำนวณจุดตัดเพื่อตรวจหาจุดโฟกัสนั้น ภาพดังกล่าวจะไม่สามารถตรวจหาได้เลย หรือเมื่อมองอีกด้านหนึ่งพบว่าสามารถบอกได้ว่าภาพดังกล่าวไม่มีบริเวณที่สามารถคำนวณหาตำแหน่งอ้างอิงจากจุดโฟกัสได้



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การพัฒนาขั้นตอนการหาจุดโฟกัสด้วยการใช้จุดตัดแบบท้องถิ่นแบบทำการแบ่งพื้นที่ความโค้งเส้นลายนิ้วมือด้วยโครงสร้างกราฟที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ นับเป็นแนวทางใหม่ที่ทำการคำนวณหาจุดอ้างอิงของภาพลายนิ้วมือโดยพิจารณาถึง โครงสร้างระดับมหภาคก่อนที่จะเจาะลึกลงไปในระดับสามัญของภาพลายนิ้วมือ ทำให้ประสิทธิภาพความถูกต้องแม่นยำมีความถูกต้องที่สูงและรวดเร็วกว่าการตรวจหาจุดโฟกัสด้วยวิธีอื่นๆ จึงนับได้ว่าขั้นตอนการตรวจหาจุดโฟกัสที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติจริง แต่อย่างไรก็ตามจุดโฟกัสที่เสนอโดยวิทยานิพนธ์นี้ยังประสบปัญหาความแม่นยำในภาพลายนิ้วมือที่มีคุณภาพต่ำหรือภาพลายนิ้วมือที่มีปัญหาดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในผลการทดลอง ด้วยเหตุนี้เอง จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบ่งชี้คุณภาพของจุดโฟกัส ให้ชัดเจน เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบรู้จำลายนิ้วมือในแง่อื่นๆ อาทิเช่น การจำแนกประเภทลายนิ้วมือ, การจับคู่ลายนิ้วมือ หรือการเข้าถึงข้อมูล ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดต่อไปในอนาคตอันใกล้

ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้จะเสนอแนะถึงแนวทางการแก้ไขในปัญหาที่เกิดขึ้นจากที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของการวิจารณ์ผล และนำเสนอการแนวทางการนำจุดโฟกัสไปประยุกต์ใช้ในงานรู้จำลายนิ้วมือด้านอื่นซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

1.1 ปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของภาพลายนิ้วมือ

เนื่องจากการตรวจหาจุดตัดแบบเฉพาะที่เป็นการเลือกบริเวณของจุดตัดที่มีการกระจุกตัวของจุดตัดมากที่สุด ดังนั้นถ้าสามารถระบุได้ว่าตำแหน่งของจุดตัดใดมีคุณภาพของภาพ

ลายนิ้วมือที่ไม่สูงพอ การไม่นำจุดตัดเหล่านี้มาคำนวณน่าจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการตรวจหาจุดโฟกัสสูงขึ้นไปอีก

1.2 ปัญหาจากการไม่สามารถกำหนดจุดโฟกัสได้

ในหลักการของการกำหนดตำแหน่งของจุดโฟกัส ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการกำหนดเกณฑ์อ้างอิงเพื่อใช้ในการตัดสินใจสำหรับเลือกจุดโฟกัส ดังนั้นหากสามารถปรับเกณฑ์อ้างอิงดังกล่าวให้เข้ากับภาพลายนิ้วมือแต่ละภาพ เช่นบริเวณภาพลายนิ้วมือใดมีส่วนโค้งด้านบนของลายนิ้วมือที่น้อยเกณฑ์อ้างอิงดังกล่าวก็จะถูกปรับลงให้มีค่าน้อยตาม หรือในทางตรงกันข้าม บริเวณภาพลายนิ้วมือใดมีส่วนโค้งด้านบนของลายนิ้วมือมากกว่าก็กำหนดให้เกณฑ์อ้างอิงมีค่าสูงขึ้น

2. แนวทางการนำลักษณะเด่นไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ

2.1 การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ

เนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างลายนิ้วมือเป็นการพิจารณารูปลายนิ้วมือโดยรวมทั้งหมดทั้งนี้หากวิเคราะห์ถึงทิศทาง ลักษณะความโค้งรวมถึงความต่อเนื่องของการเปลี่ยนแปลงลายนิ้วมือ น่าจะทำให้การคาดคะเนทิศทางของลายนิ้วมือเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

2.2 การจำแนกภาพลายนิ้วมือ

เมื่อวิเคราะห์ถึงลักษณะเด่นจากอัตราความโค้งของเส้นลายนิ้วมือ นอกเหนือจากโครงสร้างโดยรวมของทิศทางลายนิ้วมือ จุดศูนย์รวมความโค้งของเส้นลายนิ้วมือ หรือจุดโฟกัสย่อมน่าจะบ่งชี้ถึงประเภทของลายนิ้วมือแต่ละประเภทมากขึ้นกว่าปกติ

2.3 การเรียงลำดับลายนิ้วมือเพื่อการเข้าถึง

การแทนความโค้งของเส้นลายนิ้วมือด้วยกราฟ สามารถนำไปทำดัชนีบ่งชี้เพื่อแยกลักษณะของลายนิ้วมือประเภทต่าง ๆ ได้ดี สมควรนำไปใช้เพื่อการลดการเปรียบเทียบของลายนิ้วมือและคัดเลือกกลุ่มที่เหมาะสมมาทำการเปรียบเทียบเท่านั้น จะทำให้ลดเวลาในการค้นหาลายนิ้วมือได้อีกมาก

2.4 การเปรียบเทียบลายนิ้วมือ

การพิจารณาโครงสร้างลายนิ้วมือ โดยรวมและการแบ่งพื้นที่ลายนิ้วมือ ออกเป็นพื้นที่ย่อยๆ ทำให้การระบุตำแหน่งของจุดมินูเทียร์ได้เจาะจงมากขึ้น ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ร่วมกับข้อมูลของมินูเทียร์น่าจะทำให้การเปรียบเทียบตำแหน่งของจุดมินูเทียร์มี ประสิทธิภาพมากขึ้น



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

Areekul V., K. Suuprasriwasuseth and S. Jirachaweng. 2006. The New Focal point Localization Algorithm for Fingerprint Registration. pp. 497-500. *In 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR2006)*, vol. 4. 20-24 August 2006, Hongkong.

Areekul, V., Boonchaiseree, N. 2008. Fast Focal Point Localization Algorithm for Fingerprint Registration, pp. 2089-2094. *In Proc. 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2008)*. 3-5 June 2008, Singapore.

Bazen, A.M., Gerez. S.H. 2002. Systematic Methods for the Computation of the Directional Fields and Singular Points of Fingerprints. **IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.** 24 (7): 905-919.

Boonchaiseree N., Areekul V. 2009. Focal point Detection Based on Half Concentric Lens Model for Singular Point Extraction in Fingerprint. pp. 637-646. *In 3rd IAPR/IEEE International Conference on Biometric (ICB2009)*. 2-5 June 2009, Italy.

Cappelli R., Lumini A., Maio D. 1999 Fingerprint Classification by Directional Image Partitioning. *In IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 21 (5): 402-421.

FVC2000. 2000. **Fingerprint Verification Competition 2000**. Available Source: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2000>. April 8, 2009.

Henry E. 1900. **Classification and Uses of Finger Prints**. Routledge, London.

Hong, L., Wang, Y., Jain, A.K. 1998. Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation. *In IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20 (8): 777-789.

- Hung, D.C.D., Huang, C. 1996. A Model "Optimized Singular Point Detection Algorithm for Fingerprint Images. pp. 444-448. *In Proc. 9th Florida Artificial Intelligence Research Symposium (FLAIRS1996)*. May 1996, Florida, USA.
- Huvanandana, S., Kim, C., and Hwang, J.N. 2000. Reliable and Fast Fingerprint Identification for Security Applications. pp. 503-506 *In Proc. International Conference on Image Processing (ICIP2000)*. vol. 2. 10-13 September 2000, Canada.
- Kawagoe, M., Tojo, A. 1984. Fingerprint Pattern Classification. *In Pattern Recognition*, 17: 295-303.
- Lee H. C. and R.E. Gaensslen. 2001. **Advances in Fingerprint Technology**, 2nd ed. Elsevier, New York.
- Liu M., X. Jiang and A. C. Kot. 2005. Fingerprint Reference-Point Detection. *In EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. 4: 498-509.
- Liu T., Zhang C., Hao P. 2006. Fingerprint Reference Point Detection Based on Local Axial Symmetry. pp. 1050-1053. *In 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR2006)*, vol. 4. 20-24 August 2006, Hongkong.
- Maltoni D., D. Maio, A. K. Jain, and S. Prabhakar. 2003. **Handbook of Fingerprint Recognition**, 1st ed. Springer-Verlag Inc., New York, USA.
- Maltoni D., D. Maio, A. K. Jain, and S. Prabhakar. 2009. **Handbook of Fingerprint Recognition**, 2nd ed. Springer-Verlag Inc., London, England.
- Nilsson, K., Bigun, J. 2005. Registration of Fingerprints by Complex Filtering and by 1D Projections of Orientation Images. pp. 171-183. *In Proc. Int Audio- and Video-Based Biometric Person Authentication (AVBPA2005)*. 20-22 July 2005, New York, USA.

Park, C.H., Lee, J.J., Smith, M.T.J., Park, K.H. 2005. Singular Point Detection by Shape Analysis of Directional Fields in Fingerprint. *In Pattern Recognition*. 39: 839-855.

Rerkrai, K. and V. Areekul, 2000. A New Reference Point for Fingerprint Recognition. pp. 499-502. *In Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2000)*, vol. 2. 10-13 September 2000, Canada.

Rämö, P., Tico, M., Onnia, V., Saarinen, J. 2001. Optimized Singular Point Detection Algorithm for Fingerprint Images. pp. 242-245 *In Proc. Int'l Conf. Image Processing (ICIP2001)*, vol 3. 7-10 October 2001, Thessaloniki, Greece.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นายศรุต รุ่งรัตนอุบล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	19 กันยายน 2527
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักศึกษาปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ชั้น 8 ตึก 2 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-