



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา

เรื่อง การตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมในการลงทะเบียนลายนิ้วมือ

Focal Point Detection Based On Half Concentric Lens Model for Fingerprint Registration

นามผู้วิจัย นายณัฐวัชร บุญชัยเสรี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์วุฒิพงษ์ อารีกุล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหญิง ไทยนิมิต, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงค์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม
ในการลงทะเบียนลายนิ้วมือ

Focal Point Detection Based On
Half Concentric Lens Model for Fingerprint Registration

โดย

นายณัฐวัชร บุญชัยเสรี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2552

ณัฐวัชร บุญชัยเสรี 2552: การตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม
ในการลงทะเบียนลายนิ้วมือ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์วุฒิพงษ์ อารีกุล, Ph.D. 104 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีใหม่ในการตรวจหาจุดโฟกัส ซึ่งเป็นลักษณะเด่นที่สามารถกำหนดเป็นจุดอ้างอิงของลายนิ้วมือเพื่อใช้ในการลงทะเบียนลายนิ้วมือ โดยได้พัฒนาขั้นตอนการตรวจหาจุดโฟกัสขึ้นมาใหม่โดยใช้แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมร่วมกับสมการทิสทางของลายนิ้วมือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านความเร็วในการทำงานของระบบ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอรูปแบบการประเมินความคลาดเคลื่อนซึ่งแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบได้แก่วิธีการวัดแบบสามเหลี่ยม และวิธีการฉายจุดโฟกัสด้วยตา

จากผลการทดลองได้ทำการทดสอบกับฐานข้อมูลการแข่งขันการตรวจสอบลายนิ้วมือจำนวน 3 ฐานข้อมูล ได้แก่ FVC2000DB2a FVC2002DB2a และ FVC2004DB1a พบว่าในฐานข้อมูล FVC2000DB2a โดยภาพรวมแล้วจุดโฟกัสมีความคลาดเคลื่อนต่ำ และใช้เวลาการคำนวณที่รวดเร็ว เนื่องจากคุณภาพของลายนิ้วมือค่อนข้างดี ในฐานข้อมูล FVC2002DB2a พบว่าจุดโฟกัสที่ตรวจพบมีความคลาดเคลื่อนต่ำเช่นเดียวกัน แต่จะพบปัญหาในภาพที่มีลักษณะลายนิ้วมือแห้ว หรือขาดหายไปซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาด และสำหรับฐานข้อมูล FVC2004DB1a พบว่าจุดโฟกัสยังคงมีความคลาดเคลื่อนโดยรวมไม่สูงมากนัก แต่พบปัญหาที่เกิดขึ้นจากการบิดเบี้ยวแบบยืดหยุ่นของลายนิ้วมือ ทำให้รูปแบบการวัดความคลาดเคลื่อนแบบสามเหลี่ยมมีความคลาดเคลื่อนสูง และจุดโฟกัสในบางภาพลายนิ้วมือยังไม่แม่นยำเท่าที่ควร

ดังนั้นโดยภาพรวมแล้วจุดโฟกัสที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนต่ำ และมีเสถียรภาพที่ดีเหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในระบบรู้จำลายนิ้วมือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบการลงทะเบียนลายนิ้วมือต่อไป

Natthawat Boonchaiseree 2009: Focal Point Detection Based On Half Concentric Lens for Fingerprint Registration. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Vutipong Areekul, Ph.D. 104 pages.

This thesis proposes the novel algorithm to detect the Focal Point which is the identical feature that is used to refer the point for fingerprint registration. The new algorithms applied the procedure of focal point detection by using Half Concentric Lens model with directional field in order to increase the efficiency. Moreover, this thesis presents the formation of error measurement in 2 methods which have been separated as two types; triangle measurement and Manually-mark projection measurement.

According to the experiment of three FVC databases; FVC2000DB2a, FVC2002DB2a and FVC2004DB1a, It is found that the overview of FVC2000DB2a shows the good performances because fingerprint images have a good quality. Furthermore, the focal point indicates some prospect. However, It is found that some partial fingerprint image and FVC2004DB1a database has low error. However, It is found that there are elastic distortion of fingerprints which make triangular error measurement formation has such a high error and focal point in some finger print images aren't quite consistent

The overview of focal point in this presentation is very high efficiency, low complexity and good stability for applying to the fingerprint recognition, especially fingerprint registration.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

/ /

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์วุฒิพงศ์ อารีกุล ประธานกรรมการที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหญิง ไทยนิมิต กรรมการที่ปรึกษาร่วม ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่าน ผู้ซึ่งอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการทำงานวิจัย และให้แง่คิดต่างในการทำงานวิจัยต่างๆ ตลอดจนการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ข้าพเจ้าขอขอบคุณมูลนิธิ JON KEE และสำนักงานกองทุนสนับสนุนทุนวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัยให้โครงการวิจัยนี้ลุล่วงไปด้วยดี

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ณงลักษณ์, คุณป้านิสสา และคุณป้าวิมลที่คอยอบรม ตักเตือนในการทำงาน และนายณัฐธร บุญชัยเสรี น้องชายซึ่งเป็นแรงผลักดันอันมีค่า ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบคุณพี่สุขสันต์ จิระเขวง, พี่ๆ, เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนในห้องวิจัยด้านการประมวลผลสัญญาณ และการประมวลผลภาพ (KSIP Lab) ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำ และเวลาอันมีค่ายิ่งในการสนับสนุนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณห้องวิจัย KSIP Lab และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ซึ่งเป็นสถานที่อันศักดิ์สิทธิ์ และมีค่ายิ่ง ที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ และความดีงามต่างๆ ให้ข้าพเจ้าได้รู้จัก และตระหนักถึงหน้าที่การทำงาน และการทำงานร่วมกันเป็นกลุ่ม

ข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ความดีหรือประโยชน์อันใดที่มีในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ทุกท่านที่ได้กล่าวมาแล้ว ใน ณ ที่นี้ให้มีความสุข และความเจริญยิ่งต่อไป

ณัฐวัชร บุญชัยเสรี

เมษายน 2552

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| สารบัญ | (1) |
| สารบัญตาราง | (2) |
| สารบัญภาพ | (4) |
| คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ | (8) |
| คำนำ | 1 |
| วัตถุประสงค์ | 3 |
| การตรวจเอกสาร | 4 |
| อุปกรณ์และวิธีการ | 35 |
| อุปกรณ์ | 35 |
| วิธีการ | 36 |
| ผลและวิจารณ์ | 54 |
| ผล | 54 |
| วิจารณ์ | 67 |
| สรุปและข้อเสนอแนะ | 74 |
| สรุป | 74 |
| ข้อเสนอแนะ | 75 |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง | 79 |
| ภาคผนวก | 82 |
| ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณการตรวจวัดความคลาดเคลื่อนของจุด ไฟกัศ ด้วยวิธีการสามเหลี่ยม | 82 |
| ภาคผนวก ข การประยุกต์ใช้เทคนิคแบรีเซนทริกซ์ในการตรวจสอบจุดใน สามเหลี่ยม | 90 |
| ภาคผนวก ค ผลการทดลองการตรวจหาจุดไฟกัศจำแนกตามประเภทลาย นิ้วมือ | 95 |
| ประวัติการศึกษา และการทำงาน | 104 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 1 | ผลการเปรียบเทียบข้อกำหนดต่างๆ จำแนกตามคุณลักษณะเด่น หรือตัวบ่งชี้ทางไบโอเมตริก (Biometric Identifier) | 9 |
| 2 | อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ | 35 |
| 3 | รายละเอียดของฐานข้อมูล FVC ซึ่งใช้ในการทดสอบ | 54 |
| 4 | พารามิเตอร์ที่ทำการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับฐานข้อมูล FVC2000DB2a | 56 |
| 5 | ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจุดโฟกัส โดยใช้รูปแบบวัดความคลาดเคลื่อนทั้ง 2 วิธี กับงานวิจัยการหาจุดอ้างอิงรูปแบบอื่นๆ ในฐานข้อมูล FVC2000DB2a | 57 |
| 6 | เวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนของการตรวจหาจุดโฟกัส และผลการเปรียบเทียบงานวิจัยโฟกัสก่อนหน้าในฐานข้อมูล FVC2000DB2a | 58 |
| 7 | พารามิเตอร์ที่ทำการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับฐานข้อมูล FVC2002DB2a | 60 |
| 8 | เวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนของการตรวจหาจุดโฟกัส และผลการเปรียบเทียบงานวิจัยโฟกัสก่อนหน้าในฐานข้อมูล FVC2002DB2a | 61 |
| 9 | ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจุดโฟกัส โดยใช้รูปแบบวัดความคลาดเคลื่อนทั้ง 2 วิธี กับงานวิจัยการหาจุดอ้างอิงรูปแบบอื่นๆ ในฐานข้อมูล FVC2002DB2a | 61 |
| 10 | พารามิเตอร์ที่ทำการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับฐานข้อมูล FVC2004DB1a | 64 |
| 11 | เวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนของการตรวจหาจุดโฟกัส และผลการเปรียบเทียบงานวิจัยโฟกัสก่อนหน้าในฐานข้อมูล FVC2004DB1a | 65 |
| 12 | ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจุดโฟกัส โดยใช้รูปแบบวัดความคลาดเคลื่อนทั้ง 2 วิธี กับงานวิจัยการหาจุดอ้างอิงรูปแบบอื่นๆ ในฐานข้อมูล FVC2004DB1a | 65 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ | | หน้า |
|--------------|---|------|
| ก1 | พิกัดที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัส | 84 |
| ก2 | ค่าระยะทางจากส่วนของเส้นตรงต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ | 84 |
| ก3 | ค่าความชันของเส้นตรงต่างๆ | 85 |
| ก4 | จุด r, g และ b ที่ได้จากการคำนวณ | 86 |
| ก5 | ค่าระยะทางระหว่างจุดตัดที่เกิดขึ้น กับจุดโฟกัส และจุดที่กำหนดต่างๆ | 87 |
| ก6 | จุดตัดที่เกิดขึ้นในแต่ละด้านของการกำหนดมุมหลักเป็น R, G และ B ตามลำดับ | 88 |
| ก7 | จุดโฟกัสที่เกิดจากการฉายในแต่ละมุมหลัก R, G และ B ตามลำดับ | 88 |
| ก8 | ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการฉายจุดเมื่อกำหนดมุมหลักเป็น R, G และ B | 89 |
| ค1 | ผลการวัดความคลาดเคลื่อน โดยวิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมในฐานะข้อมูล FVC2000DB2a ที่นำเสนอ โดยวิทยานิพนธ์นี้ | 96 |
| ค2 | ผลการวัดความคลาดเคลื่อน โดยวิธีการวัดแบบฉายจุดด้วยตาในฐานะข้อมูล FVC2000DB2a ที่นำเสนอ โดยวิทยานิพนธ์นี้ | 97 |
| ค3 | ผลการวัดความคลาดเคลื่อน โดยวิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมในฐานะข้อมูล FVC2000DB2a ที่นำเสนอ โดย Boonchaiseree <i>et al.</i> (2009) | 98 |
| ค4 | ผลการวัดความคลาดเคลื่อน โดยวิธีการวัดแบบฉายจุดด้วยตาในฐานะข้อมูล FVC2000DB2a ที่นำเสนอ โดย Boonchaiseree <i>et al.</i> (2009) | 99 |
| ค5 | ผลการวัดความคลาดเคลื่อน โดยวิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมในฐานะข้อมูล FVC2002DB2a ที่นำเสนอ โดยวิทยานิพนธ์นี้ | 100 |
| ค6 | ผลการวัดความคลาดเคลื่อน โดยวิธีการวัดแบบฉายจุดด้วยตาในฐานะข้อมูล FVC2002DB2a ที่นำเสนอ โดยวิทยานิพนธ์นี้ | 101 |
| ค7 | ผลการวัดความคลาดเคลื่อน โดยวิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมในฐานะข้อมูล FVC2004DB1a ที่นำเสนอ โดยวิทยานิพนธ์นี้ | 102 |
| ค8 | ผลการวัดความคลาดเคลื่อน โดยวิธีการวัดแบบฉายจุดด้วยตาในฐานะข้อมูล FVC2004DB1a ที่นำเสนอ โดยวิทยานิพนธ์นี้ | 103 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 1 | ตัวอย่างของคุณลักษณะเด่นในไบโอเมตริก | 5 |
| 2 | แผนภูมิวงกลมแสดงส่วนแบ่งทางการตลาดจำแนกตามประเภทไบโอเมตริกในปี ค.ศ. 2009 | 8 |
| 3 | อุปกรณ์ตรวจวัดลายนิ้วมือในรูปแบบการใช้งานต่างๆ | 11 |
| 4 | แผนผังการแบบบล็อกแสดงการทำงานของระบบไบโอเมตริกโดยพิจารณาตามการใช้งาน ได้แก่ระบบลงทะเบียน, ระบบการยืนยัน หรือพิสูจน์ตัวตนบุคคล และระบบระบุตัวบุคคล ตามลำดับ | 13 |
| 5 | ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือโบราณ ในรูปแบบ และยุคสมัยที่แตกต่างกัน | 14 |
| 6 | แผนผังการไหลแสดงกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบรู้จำลายนิ้วมือ | 17 |
| 7 | สนามทิศทางของเส้นลายนิ้วมือที่บล็อกขนาด 8×8, 16×16 และ 32×32 ตามลำดับ | 19 |
| 8 | จุดเอกฐานของลายนิ้วมือ วงกลมสีแดงคือจุดแกน และสามเหลี่ยมสีเขียวคือจุดสามเหลี่ยม | 20 |
| 9 | รอยแตก, รอยแยก หรือรอยแผลเป็นที่เกิดขึ้นบนลายนิ้วมือ | 20 |
| 10 | การจำแนกลายนิ้วมือโดยใช้คุณลักษณะระดับมหภาค หรือระดับที่ 1 | 21 |
| 11 | มินูเทียร์ แสดงด้วยจุดสีดำ และรูขุมขนคือวงกลมที่วางตัวบนเส้นลายนิ้วมือ | 22 |
| 12 | ตัวอย่างการคำนวณหาค่าบ่งชี้พอยน์แคร์ | 24 |
| 13 | ตัวอย่างผลการตรวจหาจุดเอกฐานจำแนกตามประเภทของลายนิ้วมือที่ได้จากระเบียบวิธีการบ่งชี้พอยน์แคร์ ซึ่งได้ทำการปรับปรุงแล้วโดย Bazen และ Gerez (2002) | 24 |
| 14 | การตรวจหาจุดเอกฐานโดยการตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสนามทิศทาง (Park <i>et al.</i> , 2005) | 25 |
| 15 | ตัวอย่างผลการหาจุดแกนโดยใช้ตัวกรองเชิงซ้อนที่ความละเอียดต่างๆกัน นำเสนอโดย Nilsson และ Bigun (2005) | 25 |
| 16 | การตรวจหาจุดเอกฐานโดยใช้เส้นการเปลี่ยนแปลง (Ramo <i>et al.</i> , 2001) | 26 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 17 | การตรวจหาจุดแกนโดยใช้การลู่อู่เข้าโดยเส้นตั้งฉากกับสนามทิศทาง (Huvanandana <i>et al.</i> , 2000) | 27 |
| 18 | การหาจุดอ้างอิงโดยใช้วิธี “Local axial symmetry field” (Liu <i>et al.</i> , 2006) | 28 |
| 19 | จุดโฟกัสซึ่งนำเสนอโดย Rerkrai และ Areekul (2000) | 28 |
| 20 | จุดโฟกัสโดยวิธีการของ Rerkrai และ Areekul (2000) | 30 |
| 21 | แผนผังการไหลแสดงการตรวจหาจุดโฟกัส ซึ่งนำเสนอโดย Areekul <i>et al.</i> (2006) | 31 |
| 22 | ตัวอย่างการหาจุดโฟกัสซึ่งนำเสนอโดย Areekul <i>et al.</i> (2006) | 32 |
| 23 | ตัวอย่างโฟกัสโดยวิธีการของ Areekul <i>et al.</i> (2006) | 33 |
| 24 | แผนผังการไหลแสดงการตรวจหาจุดโฟกัส | 36 |
| 25 | แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการตรวจหาจุดเริ่มต้น | 40 |
| 26 | การกระจายตัวของจุดตัด และการปรับระดับเพื่อทำการหาจุดเริ่มต้น | 42 |
| 27 | แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมขนาดบล็อก 16×16 และภาพตัวอย่างการใช้งาน | 43 |
| 28 | ภาพจำลองเส้นลายนิ้วมือที่มีลักษณะการวางตัวเป็นวงกลมโดยสมบูรณ์ | 44 |
| 29 | คำปัจจัยแสดงความคล้ายคลึงกับเลนส์ครึ่งวงกลมในอาณาบริเวณที่ลักษณะ ของสนามทิศทางแตกต่างกัน | 45 |
| 30 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า ε | 46 |
| 31 | ค่า α ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนทิศทางเป็น $-\pi/4$, $-\pi/8$, 0 , $\pi/8$ และ $\pi/4$ ตามลำดับ | 47 |
| 32 | แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการวนซ้ำเพื่อตรวจหาจุดสิ้นสุด | 49 |
| 33 | วิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมในกรณีจุดโฟกัสตกอยู่ในอาณาบริเวณ สามเหลี่ยม | 51 |
| 34 | วัดแบบสามเหลี่ยมในกรณีที่จุดโฟกัสตกอยู่นอกอาณาบริเวณสามเหลี่ยม | 52 |
| 35 | ตัวอย่างจุดโฟกัสที่ทำการตรวจหาในฐานข้อมูล FVC2000DB2a | 59 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 36 | ตัวอย่างภาพถ่ายนิ้วมือซึ่งแสดงตำแหน่งจุดโฟกัสที่มีผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งสูงในฐานข้อมูล FVC2000DB2a เนื่องมาจากข้อมูลภาพถ่ายนิ้วมือไม่สมบูรณ์ | 59 |
| 37 | ตัวอย่างจุดโฟกัสที่ทำการตรวจหาในฐานข้อมูล FVC2002DB2a | 62 |
| 38 | ตัวอย่างภาพถ่ายนิ้วมือซึ่งแสดงตำแหน่งจุดโฟกัสที่มีผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งสูง หรือไม่สามารถตรวจพบได้ในฐานข้อมูล FVC2000DB2a | 63 |
| 39 | ตัวอย่างจุดโฟกัสที่ทำการตรวจหาในฐานข้อมูล FVC2004DB1a | 66 |
| 40 | ตัวอย่างจุดโฟกัสที่มีผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งสูงในฐานข้อมูล FVC2004DB1a | 66 |
| 41 | ตัวอย่างสนามทิศทาง และจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นในภาพถ่ายนิ้วมือคุณภาพต่ำ | 68 |
| 42 | ตัวอย่างผลการตรวจหาจุดโฟกัสที่เกิดขึ้น เมื่อภาพถ่ายนิ้วมือที่ไม่สมบูรณ์ | 69 |
| 43 | จุดโฟกัสที่เกิดขึ้น ในนิ้วเดียวกันเมื่อภาพถ่ายนิ้วมือมีความผิดเพี้ยนยืดหยุ่นแตกต่างกัน | 69 |
| 44 | ตัวอย่างการกระจายของจุดตัด, ผลกระทบที่เกิดขึ้นในการกำหนดจุดเริ่มต้น และจุดโฟกัส | 70 |
| 45 | ตัวอย่างการกระจายของจุดตัดในกรณีที่อาณาบริเวณสนามทิศทางสับสน หรือเป็นเส้นขนาน | 71 |
| 46 | ปัญหาที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม | 72 |
| 47 | ปัญหาการเลือกจุดสิ้นสุดที่ไม่เหมาะสมซึ่งมักเกิดในภาพถ่ายนิ้วมือประเภทกระโอม หรือกระโอมสูง | 73 |
| 48 | การปรับความละเอียดของอาณาบริเวณที่สนใจในแบบจำลองเลนส์รูปครึ่งวงกลม | 76 |
| 49 | ตัวอย่างเปรียบเทียบตำแหน่งของจุดโฟกัสที่เกิดขึ้น | 77 |
| 50 | คุณลักษณะของบล็อกที่เกี่ยวข้อง (Contribution block) ต่อการนำมาจำแนกภาพถ่ายนิ้วมือ | 78 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ | | หน้า |
|------------|--|------|
| ก1 | การวัดความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการฉายจุดโฟกัสในกรณีที่จุดโฟกัสตกอยู่ภายใน สามเหลี่ยม ของภาพลายนิ้วมือของบุคคลคนเดียวกัน | 83 |
| ก2 | ตัวอย่างจุดตัดที่เกิดจากการลากเส้นเชื่อมระหว่างจุดที่กำหนดพาดผ่านจุดโฟกัสจากภาพที่ x ตัวอย่างการคำนวณหาตำแหน่งของจุด r ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้ | 86 |
| ข1 | ตัวอย่างสามเหลี่ยมที่ใช้ในการคำนวณ | 91 |
| ข2 | ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบจุดในสามเหลี่ยม | 93 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | | |
|-------|---|--|
| DNA | = | Deoxyribonucleic Acid |
| RFID | = | Radio-frequency Identification |
| PIN | = | Personal Identification Number |
| FBI | = | the Federal Bureau of Investigation |
| AFIS | = | Automatic Fingerprint Identification Systems |
| US | = | the United State of America |
| OTTF | = | Fingerprint Local Ridge Orientation, Orientation Field |
| FVC | = | Fingerprint Verification Competition |
| LAS | = | Local Axial Symmetry |
| CLS | = | Concentric Lens Similarity Factor |
| DE | = | Distance Error |
| Alg. | = | Algorithm |
| Eval. | = | Evaluation Algorithm |

การตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม ในการลงทะเบียนลายนิ้วมือ

Focal Point Detection Based On Half Concentric Lens Model for Fingerprint Registration

คำนำ

ระบบไบโอเมตริก หรือระบบชีวมาตร เป็นระบบที่ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากในปัจจุบัน เนื่องจากระบบดังกล่าวนี้จะนำข้อมูลของผู้ใช้งานซึ่งเป็นข้อมูลทางกายภาพ อาทิเช่น ลายนิ้วมือ (Fingerprint), ลายม่านตา (Iris), ลายมือ (Hand writing), เสียง (Voice) หรือรหัสพันธุกรรม (DNA) เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้ต้องเป็นข้อมูลที่เป็นเอกลักษณ์(Unique) และสามารถระบุตัวบุคคลได้ (Identification) ในผู้ใช้งานแต่ละคน และนอกจากนี้ข้อมูลดังกล่าวนี้ต้องไม่สามารถสร้างหรือปลอมแปลงได้ง่าย ด้วยเหตุนี้นักวิจัยจึงได้คิดค้นแนวทางที่จะนำเอาข้อมูลดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับสายงานบางประเภท ซึ่งในปัจจุบันงานที่เหมาะสม และมีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางได้แก่ การระบุตัวบุคคล (Identification), ยืนยันตัวบุคคล (Verification) หรือแม้แต่การกำหนดสิทธิอนุญาตกับตัวบุคคล (Authorization) เพื่อให้สามารถติดต่อ หรือทำงานที่เกี่ยวข้องกับระบบใดระบบหนึ่งได้ตามที่ต้องการ ในอดีตเมื่อมีการติดต่อหรือทำธุรกรรมต่างๆโดยทั่วไปจะใช้ข้อมูลที่มนุษย์สร้างขึ้นมาเอง ได้แก่ บัตรประจำตัวประชาชน, บัตรประจำตัวพนักงาน, รหัสผ่าน หรือตราสัญลักษณ์ต่างๆ เป็นต้น แต่เมื่อมีการประยุกต์โดยการนำข้อมูลทางชีวภาพดังกล่าวเข้ามาใช้ในทางปฏิบัติจริงแล้ว ระบบดังกล่าวนี้จึงถูกเรียกขึ้นใหม่ว่า ระบบไบโอเมตริก (Biometric system) หรือระบบชีวมาตร

พิจารณากระบวนการรู้จำลายนิ้วมือ (Fingerprint Recognition) นับเป็นหนึ่งในระบบไบโอเมตริกที่มีความสะดวกสบาย ใช้งานง่าย และนอกจากนี้ยังมีความปลอดภัยสูง ระบบนี้เป็นระบบที่ในปัจจุบันมีการนำมาประยุกต์ใช้งานสูงที่สุด เมื่อเทียบกับระบบไบโอเมตริกประเภทอื่นๆ ระบบรู้จำลายนิ้วมือประกอบไปด้วยกระบวนการหลักที่สำคัญ ได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Enhancement), การเปรียบเทียบภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Matching) และการจำแนกภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Classification) กระบวนการดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องใช้คุณลักษณะเด่นของข้อมูล (Global Features) มาช่วยในการปฏิบัติงาน ตัวอย่าง

คุณลักษณะเด่นของข้อมูลอาทิเช่น จุดมินูเทียร์ เป็นต้น เมื่อพิจารณาข้อมูลต่างๆเมื่อนำมาจัดเก็บในระบบข้อมูลเหล่านั้นจะถูกจัดสร้างขึ้นเป็นฐานข้อมูลของระบบ ในกรณีที่ระบบมีปริมาณข้อมูลเพิ่มมากขึ้น ระบบดังกล่าวย่อมมีฐานข้อมูลที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้เองจะเกิดปัญหาที่ตามมาในเรื่องของประสิทธิภาพทางด้านความแม่นยำที่ลดลง และระยะเวลาในการสืบค้นข้อมูลที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าเสียดาย การลงทะเบียนลายนิ้วมือ (Fingerprint Registration), การพัฒนาการเรียงหรือจัดอันดับข้อมูลลายนิ้วมือ (Fingerprint Indexing), การพัฒนาการเข้าถึงข้อมูลลายนิ้วมือ (Fingerprint Retrieving or Data Mining) และการจำแนกข้อมูลลายนิ้วมือ (Fingerprint Classification) วิธีการต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้คุณลักษณะเด่น ที่เกิดจากข้อมูลนั้นๆมาเพื่อช่วยให้ระบบนั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมต่อความต้องการในการใช้งานในปัจจุบัน

ในงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และห้องวิจัยประมวลผลสัญญาณ และภาพ (KSIP Lab) โดยนำเอาคุณลักษณะเด่นที่เรียกว่า “จุดโฟกัส” ซึ่งได้ทำการพัฒนาเรื่อยมาจากทางห้องวิจัย แต่มีประสิทธิยังไม่ดีพอ และไม่เหมาะแก่การนำไปใช้จริงเนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนสูง ด้วยเหตุนี้ ขอบเขตของงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาขั้นตอนวิธีการหาจุดโฟกัส เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และเหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้จริงในชีวิตประจำวัน และต่อไปในอนาคตอันใกล้

วัตถุประสงค์

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาขั้นตอนในการหาคูณลักษณะเด่นที่เป็นจุดโฟกัส ซึ่งนับว่าเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่ง และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่างๆในระบบรู้จำลายนิ้วมือ โดยวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. เพื่อพัฒนาขั้นตอนการหาลักษณะเด่นมหภาคของลายนิ้วมือ ให้มีประสิทธิภาพที่ดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงกับฐานข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ได้ในระบบรู้จำลายนิ้วมือ

2. เพื่อเป็นการฝึกทักษะในการคิดเชิงวิเคราะห์ และการสังเคราะห์ จนไปสู่การปฏิบัติจริง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นไปตามระบบ และแบบแผนในการทำงานวิจัย

การตรวจเอกสาร

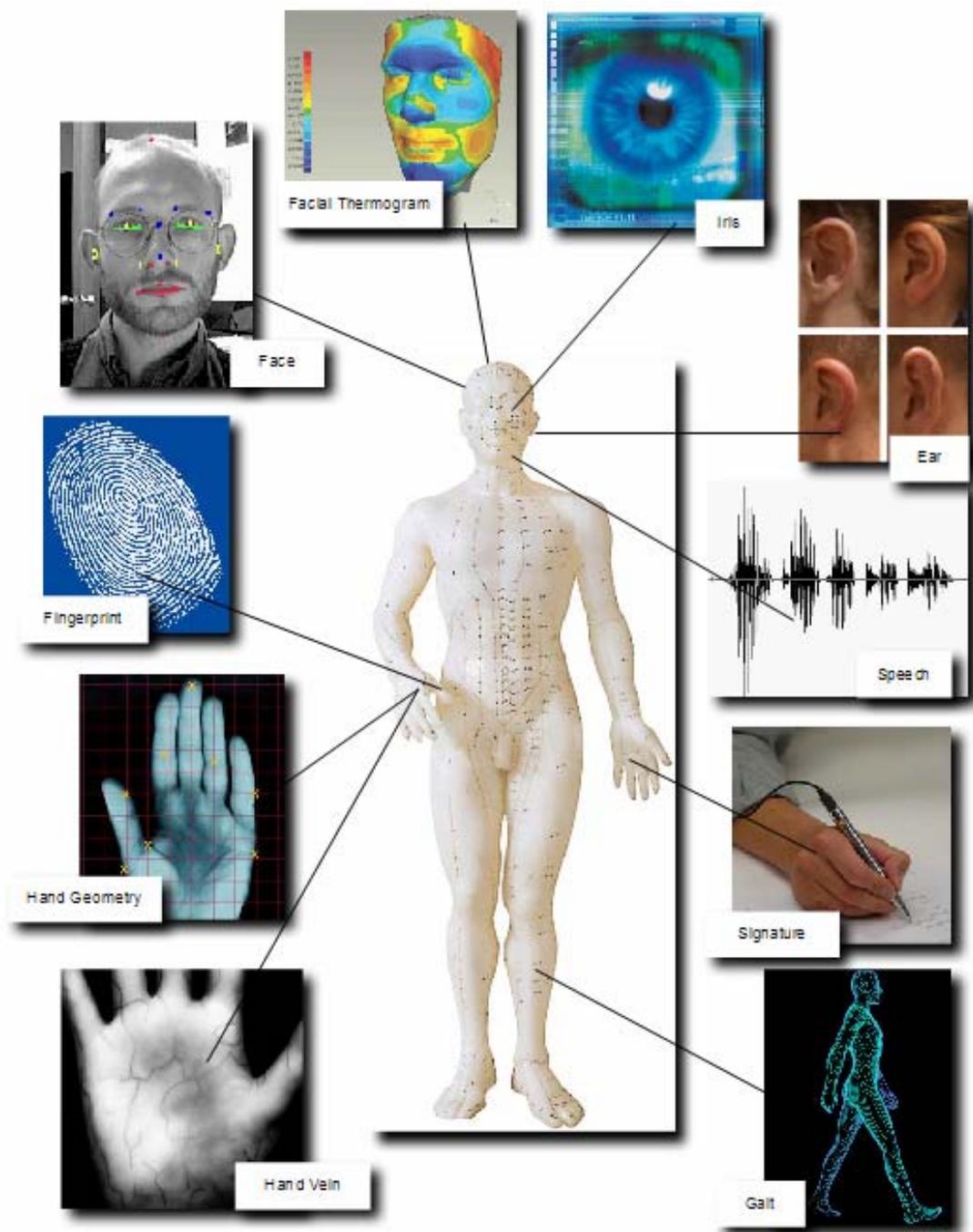
ไบโอเมตริก

ไบโอเมตริก (Biometric) เป็นคำที่ประกอบขึ้นจากคำว่า “ไบโอ (Bio)” ซึ่งมีความหมายว่า “ชีว หรือสิ่งมีชีวิต” และคำว่า “เมตริก (Metric)” ซึ่งมีความหมายว่า “เกี่ยวกับการวัด” ดังนั้น เมื่อนำคำทั้ง 2 มาใช้ร่วมกัน ไบโอเมตริกอาจมีความหมายว่า “การวัดคุณลักษณะของสิ่งมีชีวิต” ซึ่งเป็นการวัด หรือการตีความหมายของคุณลักษณะที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตให้ออกมาเป็นปริมาณทางคณิตศาสตร์ คุณลักษณะดังกล่าวต้องมีความเป็นอัตลักษณ์ (Identity) ยากต่อการปลอมแปลง, คงทนต่อสภาพแวดล้อม และเปลี่ยนแปลงได้ยาก (Stability) โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้คำว่า “คุณลักษณะเด่น” เป็นหลักเพื่อใช้พิจารณาคุณลักษณะเด่นของสิ่งมีชีวิตดังกล่าว โดยในที่นี้จะเจาะจงเฉพาะในคน ซึ่งเมื่อพิจารณาคุณลักษณะของคน อาจจำแนกได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ คุณลักษณะเด่นทางกายภาพ (Physical Characteristic) และคุณลักษณะเด่นทางพฤติกรรม (Behavioral Characteristic) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. คุณลักษณะเด่นทางกายภาพ คือ เอกลักษณ์ในทางกายซึ่งถูกกำหนดเป็นคุณลักษณะเด่น อาทิเช่น ใบหน้า ลายมือ ลายนิ้วมือ ลายม่านตา หรือการวางตัวของเส้นเลือดในร่างกาย เป็นต้น
2. คุณลักษณะเด่นทางพฤติกรรม คือ เอกลักษณ์ในทางพฤติกรรมซึ่งถูกกำหนดเป็นคุณลักษณะเด่น อาทิเช่น ลายเซ็นต์ ท่าทาง หรือจังหวะของการเดิน เป็นต้น

พิจารณาคุณลักษณะเด่นทั้ง 2 ประเภท ในบางครั้งอาจพบว่าคุณลักษณะเด่นทางกายภาพ และคุณลักษณะเด่นทางพฤติกรรมอาจมีส่วนที่คล้ายคลึงกัน ไม่สามารถแยกประเภทได้อย่างชัดเจน ยกตัวอย่างเช่น ลายนิ้วมือของคน ซึ่งเป็นคุณลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แต่การนำลายนิ้วมือไปใช้งานจะขึ้นอยู่กับลักษณะนิสัย หรือพฤติกรรมในการใช้งานของผู้ใช้งาน และอุปกรณ์รับข้อมูลด้วย ดังนั้นข้อมูลที่จะใช้ในระบบการรู้จำอาจเกิดจากการผสมผสานกันระหว่างคุณลักษณะเด่นทางกายภาพ และคุณลักษณะเด่นทางพฤติกรรมก็เป็นได้ พิจารณาตัวอย่างต่อไปนี้เพิ่มเติม ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับการผสมผสานกันของคุณลักษณะ อาทิเช่น ใบหน้าของฝาแฝดซึ่งเป็นคุณลักษณะเด่นทางกายภาพ จะพบว่าฝาแฝดทั้งสอง มีใบหน้าที่คล้ายคลึงกันตั้งแต่เกิด แต่ในช่วงของการเติบโต ใบหน้าของแฝดทั้งสองอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามพฤติกรรม ซึ่งแตกต่างกันใน

แต่ละคนก็เป็นได้ (อาทิเช่น ลักษณะการใช้ชีวิต หรือนิสัยการกิน อาจทำให้น้ำหนัก หรือรูปร่างแตกต่างกันเป็นต้น)



ภาพที่ 1 ตัวอย่างของคุณลักษณะเด่นของไบโอเมตริก

จากความหมายและรายละเอียดดังกล่าวมาแล้วข้างต้นจะพบว่า คุณลักษณะทางกายภาพ และคุณลักษณะทางพฤติกรรมต่างๆของคน จะถูกกำหนดให้เป็นคุณลักษณะเด่น หรือตัวบ่งชี้ทางไบโอเมตริก (Biometric Identifier) เพื่อใช้ในการรู้จำได้นั้น อาจต้องพิจารณาตามข้อกำหนดต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. การมีอยู่ทั่วไป (Universality) – กล่าวคือ ต้องเป็นสิ่งที่ทุกคนควรมี
2. ความแตกต่างจากคนอื่นๆ (Distinctiveness) – กล่าวคือ ต้องมีลักษณะที่ไม่เหมือนกัน
3. ความคงทนถาวร (Permanence) – กล่าวคือ สิ่งนั้นมีสภาพการเปลี่ยนแปลงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ หรือไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา
4. การจัดเก็บ และสะสมข้อมูลได้ (Collectability) – กล่าวคือ คุณลักษณะดังกล่าวต้องสามารถเก็บ และสะสมข้อมูลเป็นข้อมูลเชิงปริมาณได้
5. ประสิทธิภาพดี (Performance) – มีความแม่นยำ (High Accuracy), ความรวดเร็วในการทำงาน (Speedy) ความแข็งแกร่ง และทนต่อสภาวะแวดล้อมการทำงานได้ดี (Robustness)
6. เป็นที่ยอมรับได้ (Acceptability) – ผู้ใช้งานตกลงยอมรับและใช้งาน และไม่เป็นอันตราย หรือเป็นการบังคับผู้ใช้งาน
7. ขาดต่อการทุจริต (Circumvention) – มีระบบป้องกัน หรือหลบหลีกการกระทำทุจริตต่อระบบ จากวิธีการปลอมแปลงรูปแบบต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

จากข้อกำหนดต่างๆข้างต้น ซึ่งเป็นตัวคัดเลือกคุณลักษณะที่นำมาใช้ในระบบรู้จำ จะพบว่า คุณลักษณะเด่น หรือตัวบ่งชี้ทางไบโอเมตริกที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้มีมากมายหลายประเภท อาทิเช่น

1. ดีเอ็นเอ (รหัสพันธุกรรม, DNA) มีลักษณะเป็นรหัส 1 มิติที่มีลักษณะโดดเด่น ไม่ซ้ำใคร (Unique) ในแต่ละบุคคล ยกเว้นฝาแฝดซึ่งเกิดจากไข่ใบเดียวกันเท่านั้น จึงจะมีรูปแบบของรหัสพันธุกรรมที่เหมือนกัน คุณลักษณะเด่นนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในสายงานทางด้านกฎหมาย (นิติวิทยาศาสตร์ (Forensic Science)) แต่การรู้จำตัวบุคคลโดยใช้รหัสพันธุกรรมนั้น มีข้อจำกัดในการใช้งาน ซึ่งมีรายละเอียดดังตัวอย่างเช่น

1.1 เน่าสลาย (Contamination) และไวต่อการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะแวดล้อม (Sensitivity) เช่น ในสถานที่ที่มีอุณหภูมิสูง รหัสพันธุกรรมอาจไม่สมบูรณ์ หรืออาจมีการโจมตีชิ้นส่วนของร่างกายที่สามารถนำมาถอดรหัสทางพันธุกรรมได้มาใช้ปลอมแปลงแทนกัน เป็นต้น

1.2 ไม่เหมาะสมต่อการตรวจสอบการรู้จำแบบอัตโนมัติ เนื่องจากต้องใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งจำเป็นต้องให้ผู้เชี่ยวชาญเท่านั้น

จากข้อจำกัดดังกล่าวจะพบว่า การนำรหัสพันธุกรรมมาใช้ในการรู้จำบุคคลนั้นยังมีปัญหาในทางปฏิบัติค่อนข้างมาก ดังนั้นการใช้งานโดยส่วนมาก มักจะเป็นงานที่ต้องการความแม่นยำสูง เพื่อให้สามารถระบุตัวบุคคลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

2. หู (Ear) โดยมากนิยมนำมาใช้ในการรู้จำโดยพิจารณาจากคุณลักษณะทางด้าน รูปร่าง (Shape) และ โครงสร้างของเนื้อเยื่อเหนือกระดูกอ่อนตามราวใบหู คุณลักษณะดังกล่าวอาจมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกับบุคคลอื่น รูปแบบการรู้จำโดยใช้หูจะมีพื้นฐานการเปรียบเทียบจากลักษณะของใบหู ที่มีลักษณะเห็นได้อย่างเด่นชัด เหมาะกับสายงานที่ไม่ต้องการความปลอดภัยสูงเท่าไรนัก

3. ใบหน้า (Facial) เป็นหนึ่งในคุณลักษณะทางไบโอเมตริกที่มีการยอมรับในการใช้งานจริงมากที่สุด เนื่องมาจากคุณลักษณะพื้นฐานที่ใช้การรู้จำนั้นมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับการสังเกตด้วยตาของคน ระบบการรู้จำใบหน้าเป็นสิ่งที่ท้าทายในการค้นคว้าและวิจัยอย่างมากในปัจจุบัน ตัวอย่างงานพัฒนา และค้นคว้าดังกล่าว อาทิเช่น การเปลี่ยนแปลงของใบหน้าเมื่ออายุเพิ่มขึ้น หรือ การจำลองใบหน้าแบบ 3 มิติ เป็นต้น

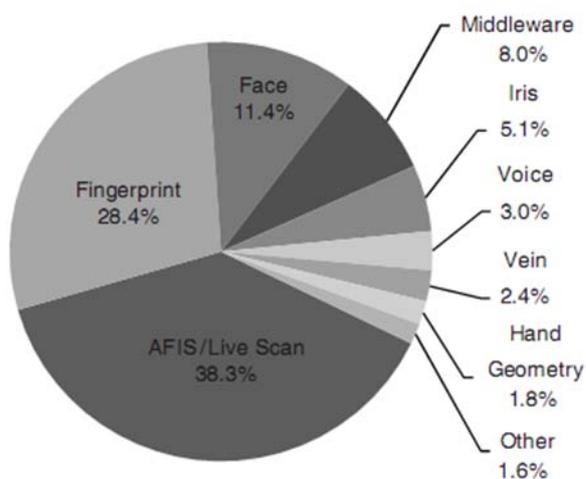
4. ท่าทางการเดิน (Gait) เป็นลักษณะพิเศษที่เกิดจากการเดิน นับเป็นไบโอเมตริกที่ซับซ้อนระบบหนึ่ง ท่าทางการเดินในแต่ละบุคคลนั้นอาจไม่แตกต่างกันเท่าใดนัก แต่อาจกำหนดเป็นคุณลักษณะเด่นที่เหมาะสม ที่ใช้ในการยืนยันตัวบุคคลในงานที่มีระบบรักษาความปลอดภัยไม่สูงมากนัก ข้อดีคือสามารถใช้ระบบได้ในระยะควบคุมที่ไกลได้สะดวก คุณลักษณะดังกล่าวนี้เป็นคุณลักษณะเด่นที่เกิดจากพฤติกรรม อาจไม่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเวลาผ่านไปนาน คุณลักษณะดังกล่าว อาจเปลี่ยนแปลงไปตาม สภาพร่างกาย อาทิเช่น น้ำหนัก, การบาดเจ็บของอวัยวะ หรืออาการบางอย่างทางสมองที่ส่งผลต่อการควบคุมร่างกาย เป็นต้น

5. ลายม่านตา (Iris) ลวดลายของม่านตาเกิดจากความซับซ้อนในทางพันธุกรรมในช่วงระหว่างการเจริญเติบโต ขณะยังเป็นทารกในครรภ์ ลวดลายดังกล่าวมีลักษณะที่แตกต่างกันในแต่ละบุคคล และแตกต่างกันภายในคู่ตาของคนคนเดียวกันอีกด้วย รูปแบบการรับภาพลายม่านตานี้จะใช้อุปกรณ์ตรวจจับที่ไม่มีการสัมผัสโดยตรงกับตา โดยทั่วไปจะใช้การเก็บภาพจากกล้อง หรือ เครื่องบันทึกภาพ รูปแบบการรู้จำในระบบนี้เชื่อว่าจะมีความแม่นยำสูง

6. ลายเซ็นต์ (Signature) รูปแบบทางสัญลักษณ์ของชื่อในแต่ละบุคคล ซึ่งมีคุณลักษณะแตกต่างกันไป ลายเซ็นต์นั้นเป็นที่นิยม และมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในการยืนยันตัวตนบุคคลในหลายหน่วยงาน คุณลักษณะดังกล่าวนี้เป็นคุณลักษณะเด่นทางพฤติกรรม ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา และอาจมีผลกระทบมาจากสภาวะทางอารมณ์ หรือร่างกายของบุคคลนั้นๆด้วย ข้อเสียของคุณลักษณะนี้ที่ชัดเจนคือ ง่ายต่อการลอกเลียนหรือปลอมแปลงเป็นอย่างมาก

พิจารณาผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะเด่น หรือตัวบ่งชี้ทางไบโอเมตริก ดังตารางที่ 1 จะสังเกตเห็นว่า การรู้จำลายนิ้วมือมีความสมดุลในคุณสมบัติต่างๆที่จำเป็นในไบโอเมตริกได้เป็นอย่างดี เนื่องจากลายนิ้วมือมีความแตกต่าง และเป็นเอกลักษณ์ตามแต่บุคคล และมีความคงทนถาวร ด้วยเหตุผลดังกล่าว การรู้จำลายนิ้วมือจึงเป็นระบบที่นิยม และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งพิจารณาได้จากแผนภูมิวงกลมแสดงส่วนแบ่งทางการตลาดโดยจำแนกตามตัวบ่งชี้ไบโอเมตริกต่างๆ ดังภาพที่ 2

Biometric Revenues by Technology, 2009



ภาพที่ 2 แผนภูมิวงกลมแสดงส่วนแบ่งทางการตลาดจำแนกตามประเภทไบโอเมตริกปี ค.ศ. 2009

ที่มา: Maltoni *et al.* (2009)

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบข้อกำหนดต่างๆ จำแนกตามคุณลักษณะเด่น หรือตัวบ่งชี้ทางไบโอเมตริก (Biometric Identifier)

| คุณลักษณะเด่น หรือ ตัวบ่งชี้ทางไบโอเมตริก | ข้อกำหนด | | | | | | |
|--|---------------------|-------------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------|---------------------------|---------------------|
| | การมีอยู่ ทั่วไป | ความ แตกต่าง ในแต่ละ บุคคล | ความคงทน ถาวร | การจัดเก็บ และสะสม ข้อมูลได้ | ประสิทธิภาพ | การยอมรับ จากผู้ใช้งาน | ยากต่อการ ทุจริต |
| รหัสพันธุกรรม | สูง | สูง | สูง | ต่ำ | สูง | ต่ำ | ต่ำ |
| หู | กลาง | กลาง | สูง | กลาง | กลาง | สูง | กลาง |
| ใบหน้า | สูง | ต่ำ | กลาง | สูง | ต่ำ | สูง | สูง |
| อุณหภูมิใบหน้า | สูง | สูง | ต่ำ | สูง | กลาง | สูง | ต่ำ |
| ลายนิ้วมือ | กลาง | สูง | สูง | กลาง | สูง | กลาง | กลาง |
| ท่าทางการเดิน | กลาง | ต่ำ | ต่ำ | สูง | ต่ำ | สูง | กลาง |
| รูปทรงทางเรขาคณิตของมือ | กลาง | กลาง | กลาง | สูง | กลาง | กลาง | กลาง |
| เส้นเลือดในมือ | กลาง | กลาง | กลาง | กลาง | กลาง | กลาง | ต่ำ |
| ลายม่านตา | สูง | สูง | สูง | กลาง | สูง | ต่ำ | ต่ำ |
| ลายเซ็น | ต่ำ | ต่ำ | ต่ำ | สูง | สูง | สูง | กลาง |
| เสียง | กลาง | ต่ำ | ต่ำ | กลาง | ต่ำ | สูง | สูง |

ที่มา: Maltomi *et al.* (2003) and (2009)

ระบบไบโอเมตริก

ระบบไบโอเมตริก (Biometric System) คือ ระบบการรู้จำตัวบุคคล ซึ่งมีรูปแบบในการตรวจหา และประมวลผลข้อมูลที่สำคัญ จากข้อมูลเฉพาะที่เป็นคุณลักษณะเด่นทางกายภาพ หรือคุณลักษณะเด่นทางพฤติกรรมในแต่ละบุคคล

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

1. ส่วนการตรวจวัด (Sensor Module) พิจารณาอุปกรณ์ในการตรวจวัดที่ใช้ในระบบไบโอเมตริก การเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดให้มีความเหมาะสม ต้องพิจารณาตามรูปแบบของตัวบ่งชี้ทางไบโอเมตริก อาทิเช่นถ้าต้องการรับข้อมูลของลายนิ้วมือ อุปกรณ์ที่ใช้จะต้องมีลักษณะเป็นหน้าสัมผัสที่รองรับลายนิ้วมือ และเข้าถึงความแตกต่างของส่วนที่เป็นเส้นลายนิ้วมือ และร่อง หรืออาณาบริเวณที่ไม่ใช่ลายนิ้วมือ ได้อย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ตรวจวัดลายนิ้วมือโดยใช้แสง (Optical Sensor) ซึ่งมีลักษณะการทำงานโดยใช้การตกกระทบของแสงระหว่างหน้าสัมผัสของลายนิ้วมือไปยังหน่วยอุปกรณ์รับภาพ จะพบว่าอุปกรณ์ดังกล่าว สามารถดึงข้อมูลที่เป็นลักษณะเด่นของลายนิ้วมือ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางกลับกันถ้าทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ตรวจวัดเป็นแบบไม่มีหน้าสัมผัส (Touchless Sensor) ตัวอย่างเช่นการนำกล้องมาถ่ายรูปลายนิ้วมือ อาจได้ข้อมูลที่มีคุณภาพต่ำ และไม่สามารถนำมาใช้งานในส่วนอื่นของระบบไบโอเมตริกในทางปฏิบัติได้จริง ดังนั้นการเลือกอุปกรณ์ตรวจวัดที่เหมาะสมนับได้ว่าเป็นสิ่งที่สำคัญสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาในระบบไบโอเมตริก

พิจารณาผลการจับคู่ของข้อมูลใดๆสองข้อมูล การตัดสินใจว่าข้อมูลที่นำเข้ามาเป็นข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูลหรือไม่ จะพิจารณาจากผลคะแนนของการจับคู่ในกลุ่มต่างๆของการเปรียบเทียบ

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

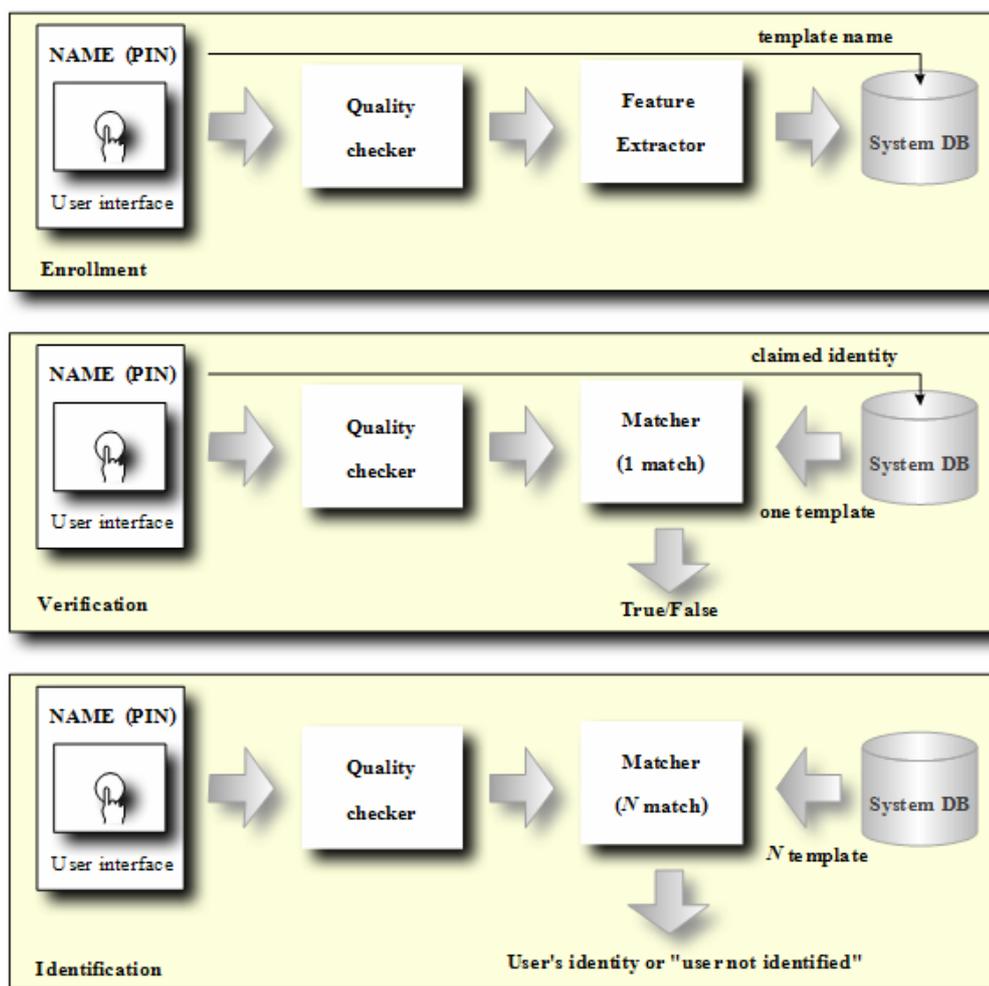
เมื่อพิจารณาถึงการนำระบบไบโอเมตริกมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ พบว่ารูปแบบการดำเนินการทางไบโอเมตริกดังที่กล่าวมาในข้างต้นนั้น แบ่งออกเป็นสองระบบหลักๆตามลักษณะการทำงานได้แก่ ระบบยืนยัน หรือพิสูจน์ตัวตน (Verification System) และระบบระบุตัวตน (Identification System) ซึ่งแต่ละระบบมีรายละเอียดที่น่าสนใจดังต่อไปนี้

1. ระบบยืนยัน หรือพิสูจน์ตัวตน คือ ระบบที่ทำการตรวจสอบข้อมูลที่ได้จากตัวบ่งชี้ทางไบโอเมตริกของบุคคลใดบุคคลหนึ่งที่สนใจ เทียบกับข้อมูลของบุคคลนั้นที่ถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล ตัวอย่างระบบที่มีการใช้งานจริง อาทิเช่น การใช้เลขรหัสระบุตัวตน (PIN, Personal Identification Number) ชื่อผู้ใช้งาน (Username) หรือรหัสผ่าน (Password) เป็นต้น ระบบเหล่านี้มีลักษณะการเปรียบเทียบแบบ 1 ต่อ 1 (1-to-1) เพื่อตรวจสอบ และใช้ในการอ้างสิทธิ์ว่าเป็นจริง หรือเป็นเท็จเท่านั้น (ตัวอย่างเช่น ข้อมูลลายนิ้วมือนี้เป็นของนายสมชายหรือไม่ หรือชิ้นส่วนที่มีรหัสพันธุกรรมในสถานที่เกิดนี้เหตุเป็นของสมปองหรือไม่ เป็นต้น) ระบบการยืนยัน หรือพิสูจน์ตัวตนเป็นที่นิยม เพราะเป็นการรู้จำเชิงบวก (Positive Recognition) เนื่องจากมีเป้าหมายหลักคือป้องกันการใช้งานที่เกิดจากบุคคลหลายคนใช้เอกลักษณ์ หรือคุณลักษณะเด่นที่เหมือนกันเท่านั้น ระบบไม่สามารถระบุได้ว่าข้อมูลที่ได้รับมาเป็นของใคร จึงไม่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้งานมากนัก

2. ระบบระบุตัวตน คือ ระบบที่ทำการรู้จำบุคคลโดยการสืบค้นเทมเพลตของข้อมูลทั้งหมดที่จัดเก็บอยู่ในฐานข้อมูล ดังนั้นระบบนี้มีลักษณะการเปรียบเทียบแบบ 1 ต่อ N (1-to-many) เพื่อที่จะระบุตัวตนดังกล่าว (ระบบจะล้มเหลว หรือแสดงความผิดพลาดในกรณีที่ผู้ใช้งานไม่ได้ทำการลงทะเบียนไว้กับระบบ) ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการทราบว่าลายนิ้วมือนี้เป็นของใคร ต้องทำการเก็บข้อมูลนั้นมาตรวจสอบกับข้อมูลทั้งหมดในฐานข้อมูลเพื่อระบุว่าลายนิ้วมุดังกล่าวเป็นของบุคคลใดในฐานข้อมูล เป็นต้น ระบบการระบุตัวตนอาจกล่าวได้ว่าเป็นระบบการรู้จำเชิงลบ

(Negative Recognition) เนื่องจากมีการระบุว่าบุคคลดังกล่าวเป็นใคร ซึ่งเป้าหมายของการรู้จำเชิงลบนั้นมีขึ้นเพื่อใช้ในการป้องกันบุคคลใดๆก็ตาม ที่ต้องการระบุตัวเองในหลายรูปแบบ

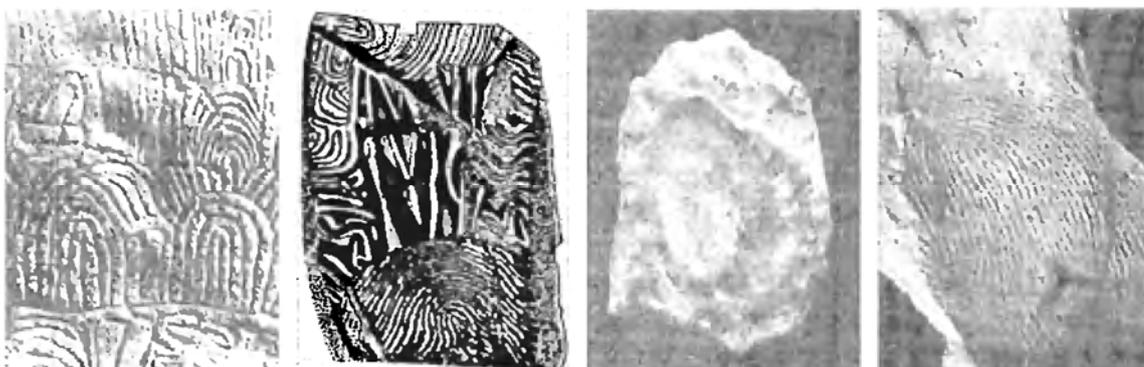
พิจารณาแผนผังแบบบล็อกของระบบยืนยัน หรือพิสูจน์ตัวตนบุคคล และระบบระบุตัวตน ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนผังการแบบบล็อกแสดงการทำงานของระบบไบโอเมตริกโดยพิจารณาตามการใช้งาน ได้แก่ระบบลงทะเบียน, ระบบการยืนยัน หรือพิสูจน์ตัวตนบุคคล และระบบระบุตัวตนตามลำดับ

ระบบรู้จำลายนิ้วมือ

การศึกษาในเรื่องลายนิ้วมือของมนุษย์ ได้มีการค้นคว้าโดยนักโบราณคดี และนักประวัติศาสตร์เป็นจำนวนมากดังภาพที่ 5 แม้ว่าการค้นพบลายนิ้วมือในอดีตจะเป็นหลักฐานบ่งชี้รูปแบบการดำรงชีวิตของมนุษย์ในอดีตได้เป็นบางส่วน แต่ในทางวิทยาศาสตร์แล้วยังไม่มีการนำมาวิเคราะห์หรือใช้งานในทางปฏิบัติใดๆ จนกระทั่งปลายศตวรรษที่ 16 วิทยาศาสตร์สมัยใหม่ได้ปรับเปลี่ยนรูปแบบ และเทคนิคของการประยุกต์ใช้ลายนิ้วมือซึ่งแตกต่างไปจากเดิม ช่วงเวลานี้เอง การวิเคราะห์ลายนิ้วมือจึงได้ถือกำเนิดขึ้น ในปี ค.ศ. 1684 โรงงานแปรรูปในประเทศอังกฤษ ได้ตีพิมพ์รายงานวิจัยที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับเส้นลายนิ้วมือ (Ridge) ร่องของลายนิ้วมือ (Furrow) และรูขุมขน (Pores) ที่อยู่บนลายนิ้วมือ (Lee and Gaensslen, 2001)



ภาพที่ 5 ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือ โบราณ ในรูปแบบ และยุคสมัยที่แตกต่างกัน

ที่มา: Maltoni *et al.* (2009)

ช่วงเวลาตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา มีงานค้นคว้าและงานวิจัยเกี่ยวกับลายนิ้วมือเกิดขึ้นอย่างมากมาย และช่วงเวลาที่สำคัญที่เป็นจุดเปลี่ยนของการรู้จำลายนิ้วมือนั้นเกิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1899 โดย เอ็ดเวิร์ด เฮนรี (Edward Henry, 1990) ได้นำเสนอระบบการจำแนกประเภทของลายนิ้วมือ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดี และยังคงนิยมใช้อยู่ในปัจจุบันเรียกระบบดังกล่าวนี้ว่า “ระบบเฮนรี (Henry System)” จากนั้นเมื่อเข้าสู่ศตวรรษที่ 20 การพัฒนาเรื่องการจำแนกลายนิ้วมือ ได้มีการเปลี่ยนแปลงเรื่อยมา และเป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น ในช่วงเวลานั้นได้มีการกำหนดกฎทางชีววิทยาเกี่ยวกับเรื่องลายนิ้วมือมนุษย์ซึ่งนำเสนอโดย Lee และ Gaensslen (Lee and Gaensslen, 2001) ซึ่งสามารถสรุปเป็นข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ในแต่ละเส้นลายนิ้วมือ หรือร่องของเส้นลายนิ้วมือ จะมีคุณลักษณะแตกต่างกันออกไปในแต่ละลายนิ้วมือ
2. ถึงแม้ว่าองค์ประกอบต่างๆ ในลายนิ้วมือ มีลักษณะแตกต่างกันในแต่ละบุคคล แต่ลายนิ้วมือทั้งหมดก็มีรูปแบบที่จำกัดภายใต้ระบบการจำแนกลายนิ้วมือ
3. องค์ประกอบต่างๆ ได้แก่เส้นลายนิ้วมือ หรือร่องลายนิ้วมือ มีลักษณะคงทน และไม่มี การเปลี่ยนแปลงใดๆ

พิจารณากฎข้างต้นจะพบว่า กฎข้อที่ 1 นับเป็นกฎที่ทำให้ระบบรู้จำลายนิ้วมือได้ถือกำเนิดขึ้น และมีการนำมาใช้งานในทางปฏิบัติ เนื่องมาจากกฎข้อดังกล่าวบ่งชี้ว่าเส้นลายนิ้วมือในแต่ละนิ้วมีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน ส่วนกฎข้อที่ 2 มีบทบาทในการนำลายนิ้วมือมาจำแนกเป็นรูปแบบต่างๆ ดังที่ตัวกฎได้กล่าวมา ต่อมาในช่วงต้นของศตวรรษที่ 20 ระบบการรู้จำลายนิ้วมือเริ่มเป็นที่ยอมรับกันมากขึ้น และสามารถพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของตัวบุคคลได้ นอกจากนี้ระบบรู้จำลายนิ้วมือยังได้นำมาใช้เป็นมาตรฐานในงานทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ (Forensic Science) หรือทางกฎหมาย และยังมี การจัดตั้งหน่วยงานระดับนานาชาติซึ่งทำการจัดเก็บลายนิ้วมือของอาชญากรให้เป็นฐานข้อมูลกลางอีกด้วย (Lee and Gaensslen, 2001) ณ ช่วงเวลาดังกล่าวนี้ เทคนิคต่างๆ ในระบบรู้จำลายนิ้วมือได้ถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างรวดเร็ว และต่อเนื่อง ยกตัวอย่างเช่น หน่วยงานความมั่นคงแห่งชาติสหรัฐ (FBI) ได้จัดทำระบบการระบุตัวบุคคลด้วยลายนิ้วมือขึ้นในปี ค.ศ. 1924 ซึ่งมีจำนวนข้อมูลของลายนิ้วมือมากถึง 810,000 นิ้ว (Maltoni *et al.*, 2009)

จากการขยายตัวอย่างรวดเร็วในงานทางด้านกฎหมายดังที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าการดำเนินการต่างๆ เกี่ยวกับฐานข้อมูลลายนิ้วมือซึ่งมีขนาดใหญ่มากนั้น การระบุตัวบุคคลด้วยวิธีการปกติ (ใช้คนตรวจสอบ, Manually Detection) นั้นมีความยุ่งยาก และไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ เพราะขนาดฐานข้อมูลในอนาคตย่อมมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ในปี ค.ศ. 1960 กรมตำรวจของสหราชอาณาจักรจึงริเริ่มที่จะทำการพัฒนาระบบระบุตัวบุคคลโดยใช้ลายนิ้วมือแบบอัตโนมัติ (Automatic Fingerprint Identification Systems (AFISs)) ซึ่งมีพื้นฐานการรู้จำมาจากการใช้คนตรวจหา พบว่าเกิดปัญหาหลัก 3 ข้อด้วยกันในการออกแบบระบบ AFISs ซึ่งได้แก่ ปัญหาที่เกิดจากอุปกรณ์รับภาพลายนิ้วมือแบบดิจิทัล, ปัญหาในการดึงลักษณะเด่นจากเส้นลายนิ้วมือ และปัญหาของคุณลักษณะของเส้นลายนิ้วมือในการจับคู่เปรียบเทียบ และไม่นานนักความพยายามในการสร้างระบบ AFIS ก็ได้สำเร็จผล และเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง ในปัจจุบันมีการนำระบบไปใช้จริงแล้วในระบบที่เรียกว่า “US Visit Program” ซึ่งมีฐานข้อมูลลายนิ้วมือมากถึง 100 ล้านนิ้ว

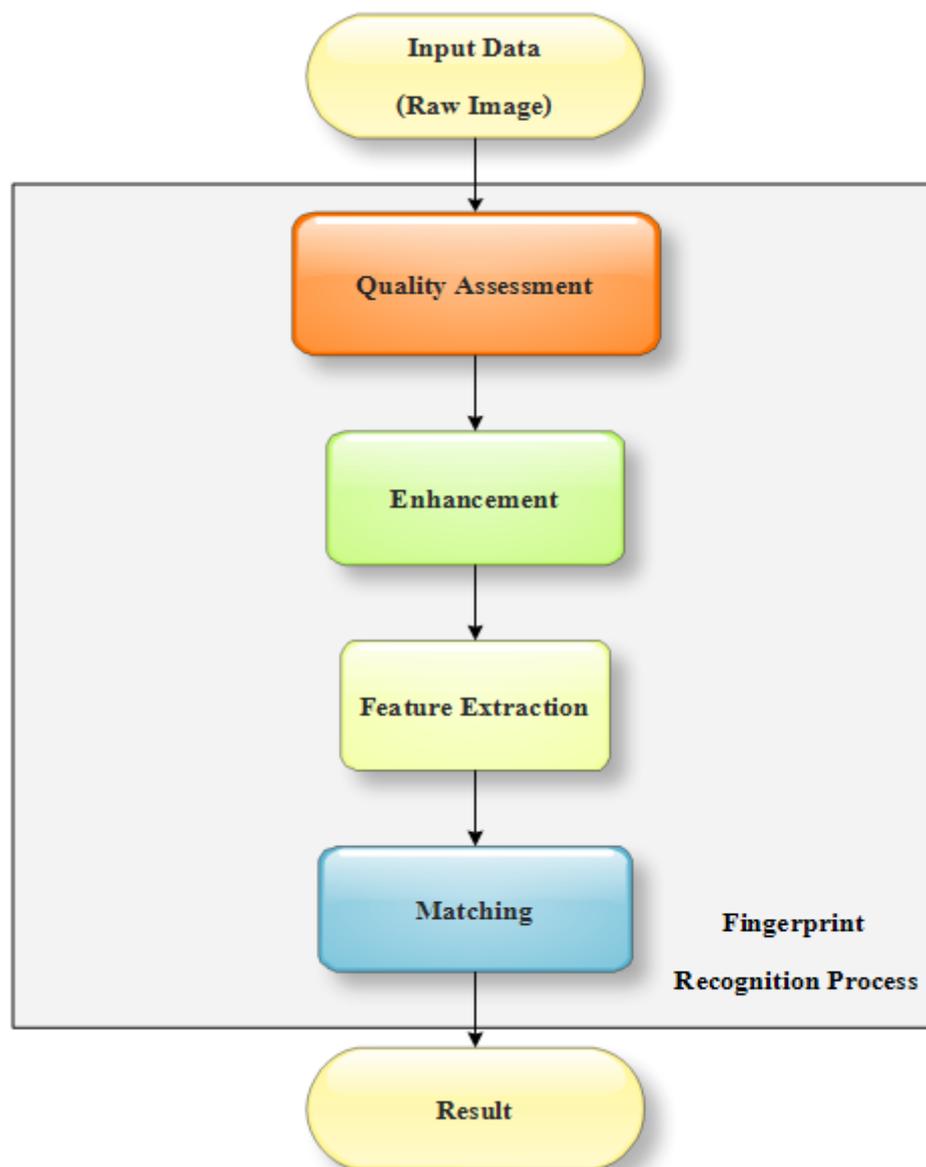
เทคโนโลยีการรู้จำลายนิ้วมือแบบอัตโนมัติมีการเติบโตอย่างรวดเร็วจากงานทางด้านกฎหมาย ไปสู่การนำมาประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ ทั่วไปตามอุตสาหกรรม ตลอดจนถึงระดับครัวเรือน ด้วยเหตุนี้อาจกล่าวได้ว่า ระบบการรู้จำลายนิ้วมือเป็นหนึ่งในระบบไบโอเมตริกที่มีคนรู้จักมากที่สุด และอาจมองเป็นเครื่องหมาย หรือสัญลักษณ์ของระบบไบโอเมตริกก็เป็นได้

กระบวนการรู้จำลายนิ้วมือ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อเรื่องการดำเนินการในระบบไบโอเมตริก กระบวนการรู้จำลายนิ้วมือจะมีรูปแบบที่คล้ายกัน อาจจำแนกตามลักษณะ และหน้าที่ของกระบวนการ ได้ดังภาพที่ 6 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. การประเมินคุณภาพในลายนิ้วมือ (Fingerprint Quality Assessment) หลังจากที่ได้ทำการเก็บข้อมูลลายนิ้วมือจากอุปกรณ์ตรวจวัดแล้ว ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งเข้ามาในกระบวนการนี้เป็นกระบวนการแรก เพื่อประมวลผลว่าภาพลายนิ้วมือที่ได้รับมีความเหมาะสมที่จะนำเข้าสู่กระบวนการถัดไปหรือไม่ มากหรือน้อยเพียงใด ถ้าข้อมูลที่ได้มีคุณภาพที่ต่ำมาก อาจทำการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือก่อน แล้วจึงนำมาประเมินค่าอีกครั้งก็สามารถทำได้
2. การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Enhancement) ขั้นตอนนี้จะทำการปรับปรุงภาพให้มีลักษณะที่ง่ายต่อการตรวจหาคุณลักษณะเด่นต่างๆ ในกระบวนการถัดไป
3. การตรวจหาคุณลักษณะเด่น (Fingerprint Feature Extraction) ทำการตรวจหาคุณลักษณะเด่นของลายนิ้วมือเพื่อจัดเก็บลงในฐานข้อมูล ในขณะที่ทำการลงทะเบียน หรือนำไปเปรียบเทียบในงานยืนยันตัวตนบุคคล หรือ การระบุตัวบุคคล
4. การจับคู่ลายนิ้วมือ (Fingerprint Matching) กระบวนการเปรียบเทียบคุณลักษณะที่ได้กับข้อมูลที่ถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล ผลลัพธ์จากการจับคู่จะออกมาในลักษณะของคะแนนความคล้ายคลึงซึ่งต้องนำไปพิจารณาเพื่อทำการตัดสินใจต่อไป

กระบวนการต่างๆ ถ้าพิจารณาถึงระบบ และการนำไปใช้งานจริง อาจมีกระบวนการอื่นๆ อาทิเช่น การจำแนกลายนิ้วมือ (Fingerprint Classification) หรือการจัดลำดับลายนิ้วมือ (Fingerprint Indexing) หรือการตรวจวัดการคู่เข้าของลายนิ้วมือ (Fingerprint Retrieval) เป็นต้น ดังนั้นในการใช้งานจริงอาจมีการปรับเปลี่ยนลำดับ และมีการเพิ่มเติมกระบวนการบางอย่างเข้าไป เพื่อให้เหมาะสมกับระบบ และการนำไปปฏิบัติจริงได้ตามความเหมาะสม



ภาพที่ 6 แผนผังการไหลแสดงกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบรู้จำลายนิ้วมือ

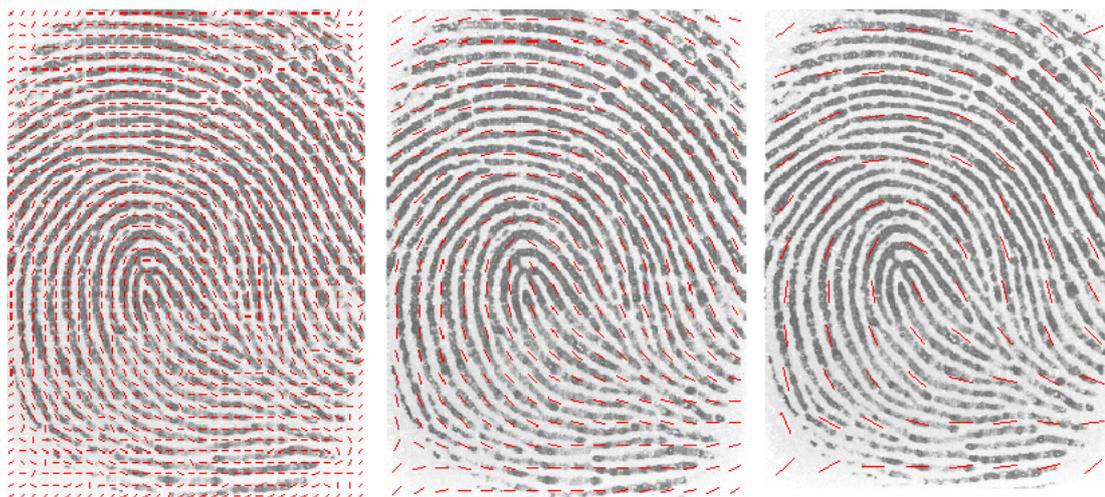
คุณลักษณะเด่นของลายนิ้วมือ

คุณลักษณะเด่นของลายนิ้วมือ คือลักษณะต่างๆที่เกิดขึ้นของลายนิ้วมือซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ให้เกิดความแตกต่างในลายนิ้วมือที่แตกต่างกัน และคุณลักษณะนั้นๆทำให้ลายนิ้วมือนั้นเหมาะสมที่จะเป็นตัวบ่งชี้ทางไบโอเมตริก โดยทั่วไปแล้วคุณลักษณะเด่นของลายนิ้วมือ จะแบ่งระดับการวิเคราะห์จากรายละเอียดที่เกิดขึ้นตามลักษณะการมองเห็นด้วยตาของคน คุณลักษณะที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน จะถูกจัดให้อยู่ในระดับมหภาค หรือระดับที่ 1 (Global level, 1st Level),

คุณลักษณะที่ต้องใช้ความละเอียดในการมองมากขึ้นไปอีกจากระดับมหภาค จะถูกกำหนดเป็นระดับสามัญ หรือระดับที่ 2 (Local level, 2nd Level) และระดับจุลภาค หรือระดับที่ 3 (Fine level, 3rd Level) ซึ่งเป็นระดับของคุณลักษณะที่ยากแก่การมองเห็น หรือไม่อาจมองได้ด้วยตาตามปกติ สำหรับรายละเอียดของคุณลักษณะที่เกิดขึ้นบนลายนิ้วมือ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ระดับมหภาค หรือระดับที่ 1 ที่ระดับนี้จะพิจารณาการวางตัวของเส้นลายนิ้วมือ (Ridge) เป็นหลัก ซึ่งคุณลักษณะเด่นต่างๆที่ตรวจพบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก) สนามทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ (Orientation Field, OTTF) คือทิศทางหลักของเส้นลายนิ้วมือในอาณานิคมต่างๆที่สนใจ นำเสนอครั้งแรกโดย Grasselli (1969) โดยการกำหนดค่าสนามทิศทางที่เกิดขึ้นจากภาพลายนิ้วมือทั้งหมดลงในเมตริกซ์ รูปแบบการคำนวณหาค่าสนามทิศทางโดยส่วนมากแล้ว จะพิจารณาลักษณะความไม่ต่อเนื่องในระดับบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยขนาดของบล็อกสามารถกำหนดหรือเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระตามความเหมาะสมของการวางตัวของเส้นลายนิ้วมือในแต่ละอาณานิคม ตัวอย่างการกำหนดขนาดของบล็อกอาทิเช่น บริเวณโดยทั่วไปที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของเส้นลายนิ้วมือไม่มากนัก อาจกำหนดให้บล็อกมีขนาด 16×16 จุดภาพ(พิกเซล), บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งสูงเช่นบริเวณที่เป็นจุดวกกลับของเส้นลายนิ้วมือ อาจกำหนดบล็อกให้มีขนาดเล็กลงเป็น 8×8 จุดภาพหรือบริเวณที่เป็นรอยแผลบนลายนิ้วมือซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นทิศทางที่แน่นอน อาจกำหนดบล็อกให้มีขนาดใหญ่กว่ารอยแผล เพื่อให้การประมาณค่าทิศทางเป็นไปได้ถูกต้องและเหมาะสมเป็นต้น จากนั้นทำการคำนวณหาค่าเกรเดียนต์ของภาพลายนิ้วมือโดยพิจารณาสัดส่วนระหว่างค่าเกรเดียนต์ตามแนวแกนตั้งต่อแกนนอน ($\nabla y / \nabla x$) ค่าดังกล่าวนั้นจะถูกกำหนดเป็นทิศทางหลักที่เกิดขึ้น ณ บริเวณนั้นๆ ตัวอย่างผลลัพธ์ในการหาค่าสนามทิศทางโดยใช้บล็อกที่มีขนาดต่างๆกันพิจารณาตามภาพที่ 7



ภาพที่ 7 สนามทิศทางของเส้นลายนิ้วมือที่บล็อกรขนาด 8×8 , 16×16 และ 32×32 ตามลำดับ

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

ข. จุดเอกฐาน (Singular Point) คือจุดที่เกิดจากการวางตัวของเส้นลายนิ้วมือที่มีการขดหรือวนเข้าหากันจนเกิดการเปลี่ยนแปลงความโค้งที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน จุดเอกฐานลักษณะดังกล่าวจะถูกเรียกว่า “จุดแกน (Core Point)” นอกจากนี้ในกรณีที่การวางตัวของลายนิ้วมือมีลักษณะวางตัวหลีกเลี่ยงออกจากกัน จุดเอกฐานดังกล่าวจะเรียกว่า “จุดสามเหลี่ยม (Delta Point)” พิจารณาตัวอย่างจุดเอกฐานของลายนิ้วมื่อดังภาพที่ 8



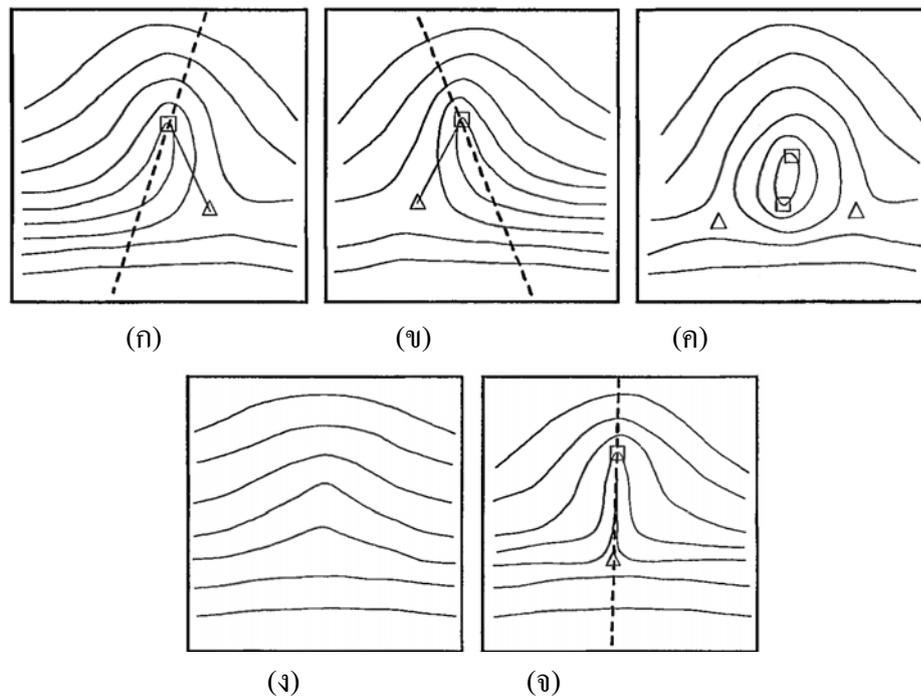
ภาพที่ 8 จุดเอกฐานของลายนิ้วมือ วงกลมสีแดงคือจุดแกน และสามเหลี่ยมสีเขียวคือจุดสามเหลี่ยม

ค. รอยแตก หรือรอยแผลเป็น (Ridge Crack, Ridge Break, or Scar) คุณลักษณะประเภทนี้มีลักษณะที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนด้วยตา ลักษณะการเกิดอาจเกิดโดยธรรมชาติ หรือเกิดขึ้นจากพฤติกรรมการใช้นิ้วในการทำกิจกรรมใดๆ อาทิเช่นการประสบอุบัติเหตุ เป็นต้น คุณลักษณะเด่นประเภทนี้ เริ่มมีการนำเข้ามาใช้ในระบุร่องรอยลายนิ้วมือเมื่อไม่นานมานี้ แต่อาจไม่เป็นที่นิยมเท่าใดนักเนื่องจากคุณลักษณะเด่นดังกล่าว มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามกาลเวลา และอาจพบเห็นได้ไม่มากนัก (ในบางคนมีคุณลักษณะดังกล่าวนี้้อยมาก) นอกจากนี้ยังอาจแปรเปลี่ยนตามอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับภาพลายนิ้วมือ หรือแม้แต่ลักษณะการวางนิ้วมือของผู้ใช้งาน ขณะทำการรับภาพก็ส่งผลกระทบต่อเช่นเดียวกัน พิจารณาดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 รอยแตก, รอยแยก หรือรอยแผลเป็นที่เกิดขึ้นบนลายนิ้วมือ

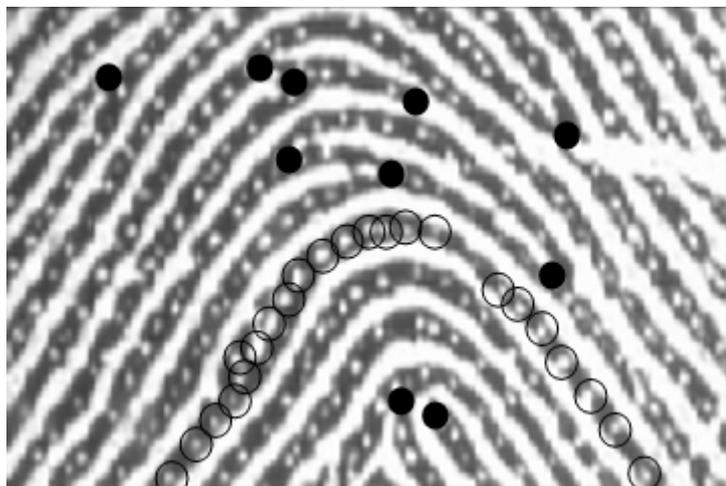
เมื่อพิจารณาคุณลักษณะในระดับนี้ จะพบว่าในเบื้องต้นสามารถนำมาใช้ในการจำแนกประเภทลายนิ้วมือได้ (ตัวอย่างดังภาพที่ 10) แต่ความแม่นยำในเรื่องของรายละเอียดนั้นยังถือว่ามีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากตัวอย่างที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โครงร่างภายนอกของลายนิ้วมือ และความถี่ของเส้นลายนิ้วมือ คุณลักษณะเด่นเหล่านี้ล้วนแล้วแต่สามารถหาได้ในระดับมหภาคทั้งสิ้น



ภาพที่ 10 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

2. ระดับสามัญ หรือระดับที่ 2 พบว่ารายละเอียดต่างๆของเส้นลายนิ้วมือที่พบในระดับนี้ได้แก่ จุดที่เส้นลายนิ้วมือมีการขาด หยุต หรือ แยกออกเป็นสองทาง เรียกว่า “มินูเทีย (Minutiae)” จุดนี้มีลักษณะแตกต่างกัน ในแต่ละลายนิ้วมือ เหมาะที่จะนำมาเป็นคุณลักษณะเด่นในการบ่งชี้ภาพลายนิ้วมือของตัวบุคคลได้ ถึงแม้ว่าจุดมินูเทียเหมาะที่จะนำมาใช้งาน แต่โดยมากแล้วอาจพบปัญหาเรื่องคุณภาพของภาพลายนิ้วมือซึ่งทำให้ไม่สามารถตรวจพบจุดดังกล่าวได้ หรือจุดที่ได้มาเป็นข้อมูลส่วนที่เกิน ขาดแตกต่างกันออกไปตามคุณภาพของลายนิ้วมือ

3. ระดับจุลภาค หรือระดับที่ 3 ที่ระดับนี้จะวิเคราะห์ลึกเข้าไปบนเส้นลายนิ้วมือ จะพบส่วนที่เป็น รูขุมขน (Sweat Pores) ซึ่งนับเป็นคุณลักษณะเด่นอันหนึ่งที่สามารถนำมาใช้งานจริงได้เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 11 มิโนเทียร์แสดงด้วยจุดสีดำ และรูขุมขนคือวงกลมที่วางตัวบนเส้นลายนิ้วมือ

ที่มา: Maltoni *et al.* (2009)

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นไปทางการตรวจหาคุณลักษณะเด่นที่สามารถนำมาใช้ในการกำหนดเป็นจุดอ้างอิงได้ ซึ่งรายละเอียดต่างๆจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

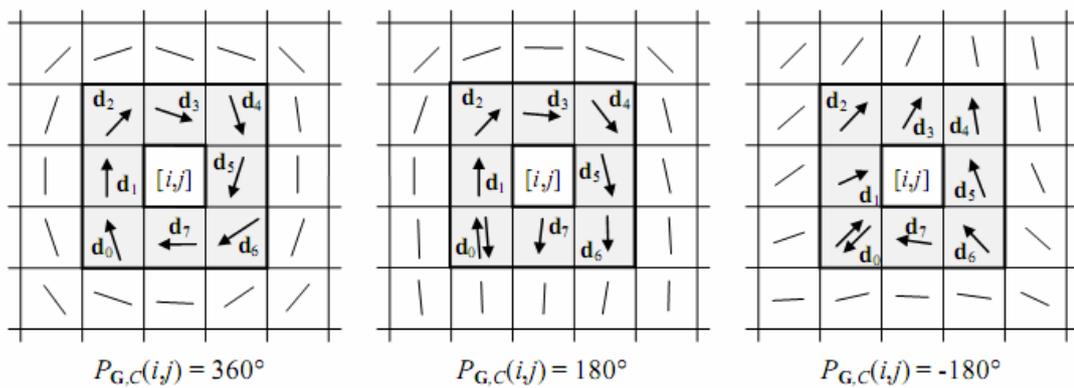
จุดอ้างอิงของลายนิ้วมือ

จุดอ้างอิงของลายนิ้วมือ คือจุดที่เปรียบเสมือนจุดศูนย์กลางของลายนิ้วมือ หรือจุดที่แทนคุณลักษณะเด่นระดับมหภาคของลายนิ้วมือ ได้อย่างชัดเจน พิจารณาระบบรู้จำลายนิ้วมือที่มีฐานข้อมูลและระบบขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบการระบุตัวบุคคลนั้น ระบบที่สามารถนำมาใช้ในการปฏิบัติจริงได้นั้น ต้องเป็นระบบที่มีความรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ตามเป้าหมาย หรือวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการคำนวณหาคุณลักษณะเด่นระดับมหภาค ดังนั้นจุดอ้างอิงของลายนิ้วมือจึงนับเป็นจุดที่สำคัญ และจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบรู้จำลายนิ้วมือ

โดยทั่วไปแล้วจุดอ้างอิงของลายนิ้วมือมักจะหมายถึงจุดเอกฐานที่อยู่บนภาพลายนิ้วมือ แต่มีงานวิจัยบางส่วนที่ทำการวิเคราะห์การหาจุดอ้างอิงโดยใช้ข้อมูลอื่นที่ไม่ใช่จุดเอกฐาน อาทิเช่น จุดโฟกัส หรือจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งสูงสุด เป็นต้น รูปแบบการหาจุดอ้างอิง และรายละเอียดในงานวิจัยต่างๆที่มีอยู่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน หากพิจารณาโดยการจำแนกตามลักษณะการตรวจหาจุดอ้างอิงแล้ว พบว่าสามารถแบ่งงานออกเป็น 3 ประเภทหลักได้แก่ รูปแบบการตรวจหาจุดอ้างอิงโดยใช้แบบจำลอง หรือการใช้รูปแบบที่กำหนดขึ้นเป็นพื้นฐาน (Pattern-based), การพิจารณาการแบ่งส่วนคุณลักษณะเป็นพื้นฐาน (Partition-based) และการพิจารณาการฉายข้อมูลที่ได้จากคุณลักษณะเป็นพื้นฐาน (Projection-based) ซึ่งรายละเอียดการตรวจหาจุดอ้างอิงโดยการจำแนกตามวิธีการตรวจหาทั้ง 3 ประเภทตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การตรวจหาจุดอ้างอิงโดยใช้แบบจำลอง หรือรูปแบบที่กำหนดขึ้นเป็นพื้นฐาน (Pattern-based) วิธีการตรวจหาจุดอ้างอิงดังกล่าวโดยมากแล้วจะพบว่า มีการใช้ลักษณะการเปรียบเทียบความคล้ายคลึงระหว่างแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับคุณลักษณะเด่นที่เกิดขึ้นบนอาณาบริเวณที่เป็นภาพลายนิ้วมือ ซึ่งถ้าบริเวณใดให้ค่าความคล้ายคลึงมากที่สุด บริเวณดังกล่าวนี้ อาจถูกกำหนดเป็นจุดอ้างอิง หรืออาจกำหนดเป็นอาณาบริเวณที่น่าจะมีจุดอ้างอิงตกอยู่ ตัวอย่างแบบจำลองที่สร้างขึ้น อาทิเช่น การสร้างแบบจำลองของจุดแกน และจุดสามเหลี่ยม เป็นต้น งานวิจัยที่สามารถจำแนกอยู่ในการตรวจหาในรูปแบบนี้ พิจารณาตามตัวอย่าง อาทิเช่น ระเบียบวิธีการบ่งชี้พอยน์แคร์ (Poincare Index Method) ซึ่งเป็นรูปแบบการหาจุดอ้างอิงที่เป็นที่นิยมอย่างมาก ได้นำเสนอในปี ค.ศ. 1984 โดย Kawagoe และ Tojo (1984) ซึ่งมีรูปแบบการหาจุดแกน และจุดสามเหลี่ยมโดยใช้แบบจำลองต่างๆที่เกิดขึ้นจากเส้นตั้งฉากลายนิ้วมื่อดังแสดงในภาพที่ 12 และได้มีการนำมาปรับปรุงให้ดีขึ้น โดย Bazem และ Gerez (2002) ในปี ค.ศ. 2002 ดังแสดงในภาพที่ 13 วิธีการดังกล่าวมีข้อเสียคือ มี

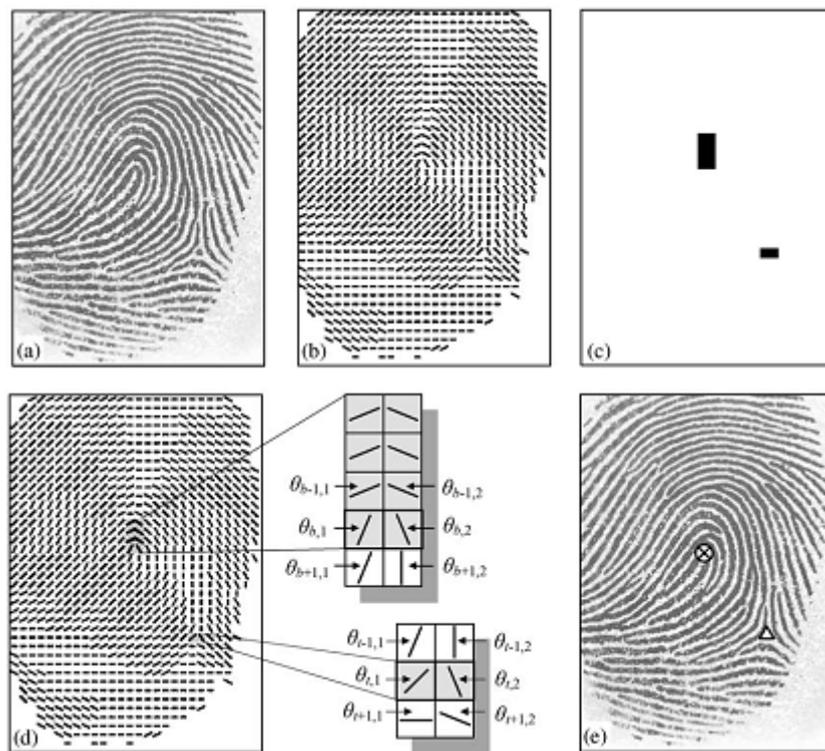
การสร้างจุดเอกฐานเทียมในภาพลายนิ้วมือที่มีคุณภาพต่ำ และไม่สามารถตรวจหาจุดเอกฐานในภาพลายนิ้วมือประเภทกระโجم หรือกระโجمสูงได้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่น่าสนใจอื่นๆอีก อาทิเช่น Park *et al.* (2005) ดังแสดงในภาพที่ 14 ได้นำเสนอวิธีการหาตรวจหาจุดเอกฐานโดยการพิจารณาแบบจำลองที่เกิดจากสนามทิศทางเป็นหลัก วิธีการดังกล่าวสามารถหาลายนิ้วมือประเภทโค้ง หรือซุ่มโค้งได้ด้วย นอกจากนี้ถ้าพิจารณารูปแบบการตรวจหาจุดอ้างอิงโดยใช้วิธีการที่คล้ายคลึงกัน จะพบว่างานที่มีลักษณะวิธีคล้ายๆกันนี้ได้แก่ การตรวจหาจุดเอกฐานโดยใช้รูปแบบที่เรียกว่า “ตัวกรองเชิงซ้อน (Complex Filter)” ซึ่งนำเสนอโดย Nilsson และ Bigun (2005) ดังแสดงในภาพที่ 15 วิธีการดังกล่าวนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างข้อมูลสนามทิศทาง กับตัวกรองที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งความซับซ้อนในการคำนวณขึ้นอยู่กับขนาดของหน้าต่างและความละเอียดของบล็อกที่ใช้ในการกราดตรวจหาจุดเอกฐาน ตัวอย่างการหาจุดเอกฐานโดยใช้วิธีการต่างๆบางส่วน



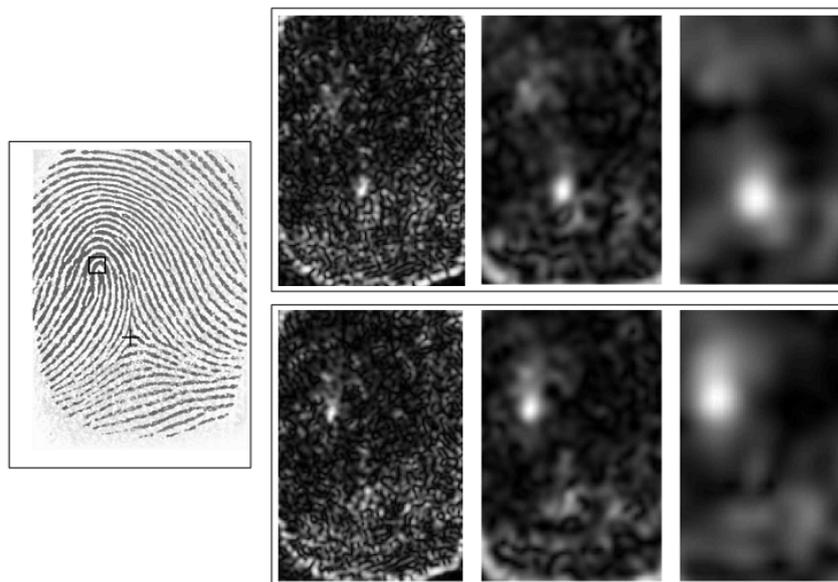
ภาพที่ 12 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าบ่งชี้พอยน์แคร์



ภาพที่ 13 ตัวอย่างผลการตรวจหาจุดเอกฐานจำแนกตามประเภทของลายนิ้วมือที่ได้จากระเบียบวิธีการบ่งชี้พอยน์แคร์ ซึ่งได้ทำการปรับปรุงแล้วโดย Bazen และ Gerez (2002)



ภาพที่ 14 การตรวจหาจุดเอกฐานโดยการตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสนามทิศทาง (Park *et al.*, 2005)



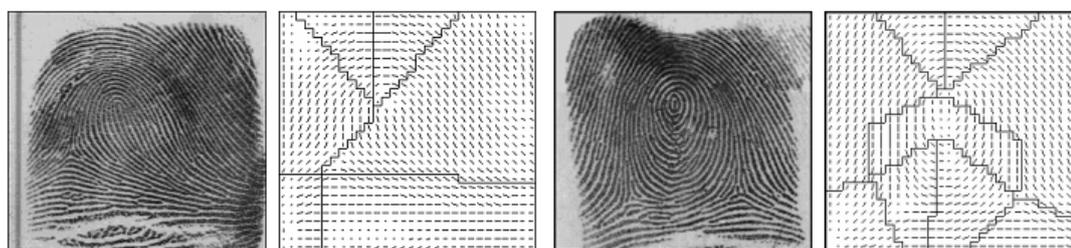
ภาพที่ 15 ตัวอย่างผลการหาจุดแกนโดยใช้ตัวกรองเชิงซ้อนที่ความละเอียดต่างกัน นำเสนอโดย Nilsson และ Bigun (2005)

2. การตรวจหาจุดอ้างอิงโดยใช้การพิจารณาการแบ่งส่วนตามคุณลักษณะเด่นเป็นพื้นฐาน (Partition-based) รูปแบบของวิธีการดังกล่าวนี้ใช้ประโยชน์จากการปรับเปลี่ยนระดับสนามทิศทาง (Directional Field Quantization) เพื่อหาจุดเอกฐานซึ่งเป็นบริเวณที่ที่มีการปรับเปลี่ยนระดับทิศทางสูง สำหรับตัวอย่างงานวิจัย อาทิเช่น Hung และ Huang (1996) ซึ่งเสนอวิธีการหาตำแหน่งจุดเอกฐานโดยใช้เส้นแสดงความผิดพลาด (Fault-lines) ซึ่งเป็นเส้นที่ใช้แบ่งอาณาบริเวณที่อยู่ติดกันของสนามทิศทางที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการปรับระดับทิศทาง พบว่าเส้นดังกล่าวจะทำการแบ่งสนามทิศทางไปเรื่อยๆ และดูเข้าจนถึงจุดที่มีการทับซ้อนกันของเส้นแบ่งสนามทิศทางที่สูงที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกกำหนดเป็นจุดเอกฐาน พิจารณาเพิ่มเติมอีกหนึ่งตัวอย่างซึ่งเป็นงานวิจัยที่น่าเสนอ โดย Ramo *et al.* (2001) ลักษณะของการตรวจหาจุดเอกฐานจะพิจารณาการทับซ้อนกันของเส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามทิศทาง (Transition Line) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาลักษณะการตรวจหาจุดเอกฐานโดยใช้วิธีการดังกล่าวนี้ จะพบว่ามีข้อเสียดังต่อไปนี้

2.1 ภาพลายนิ้วมือที่มีคุณภาพต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสูญเสียข้อมูลในอาณาบริเวณที่เป็นจุดเอกฐาน อาจทำให้การตรวจหาจุดเอกฐานมีความคลาดเคลื่อนสูง หรือไม่สามารถตรวจหาพบได้

2.2 ภาพลายนิ้วมือประเภทกระโຈม หรือกระโຈมสูงไม่สามารถหาจุดเอกฐานได้ เนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมุมที่เกิดจากเส้นลายนิ้วมือในภาพนั้นมีการเปลี่ยนแปลงทำให้การปรับระดับผิดพลาดและส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการหาจุดเอกฐานเช่นกัน

2.3 ในกรณีที่ภาพลายนิ้วมือมีส่วนที่เป็นลายนิ้วมือน้อยจนเกินไป ความน่าเชื่อถือในการคำนวณหาจุดเอกฐานอาจมีค่าต่ำ เนื่องจากปริมาณข้อมูลที่ใช้ในการตรวจวัดมีค่าน้อยจนเกินไป

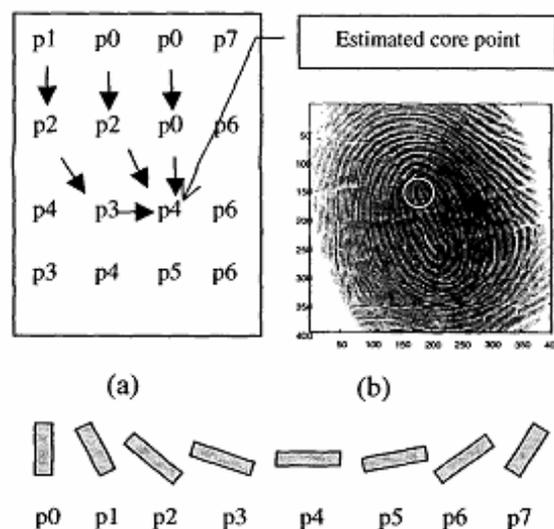


ภาพที่ 16 การตรวจหาจุดเอกฐานโดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามทิศทาง (MASK)

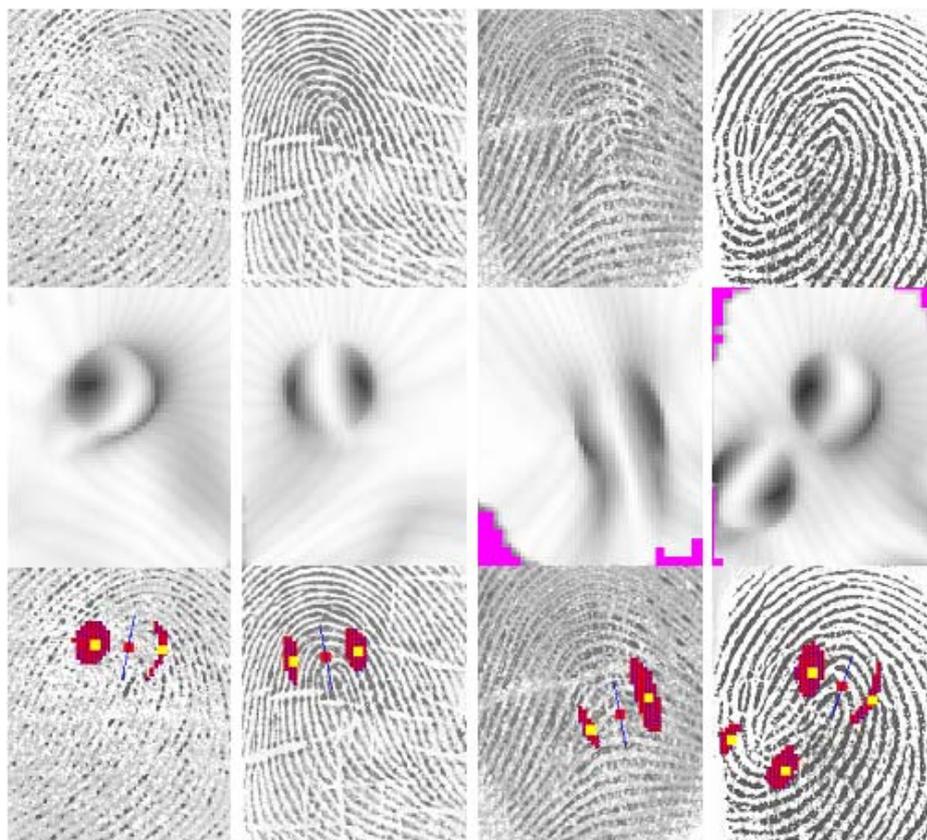
(Cappelli *et al.*, 1999)

3. การตรวจหาจุดอ้างอิงโดยใช้การฉายข้อมูลที่ได้จากคุณลักษณะเด่นเป็นพื้นฐาน (Projection-based) แนวคิดของวิธีการนี้คือการฉายคุณลักษณะเด่นของลายนิ้วมือ ตัวอย่าง

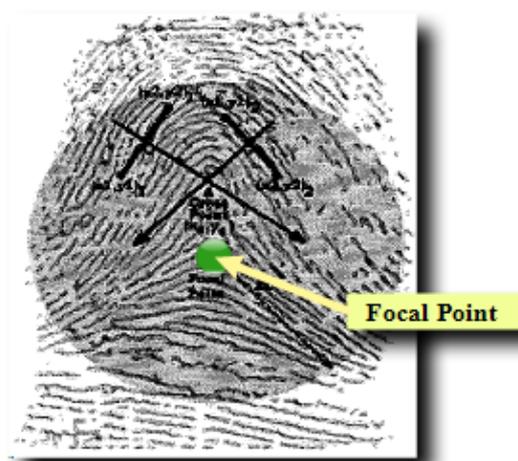
คุณลักษณะดังกล่าวซึ่งเป็นที่นิยมใช้กัน อาทิเช่น สนามทิศทางซึ่งเป็นคุณลักษณะเด่นที่นิยมใช้ในการตรวจหาจุดอ้างอิงมากที่สุด หรือการวางตัวของเส้นลายนิ้วมือ เป็นต้น ตัวอย่างงานวิจัย อาทิเช่น Huvanandana *et al.* (2000) ซึ่งนำเสนอการหาจุดอ้างอิงโดยวิธีการฉายเส้นตั้งฉากของสนามทิศทาง และทำการตรวจหาจุดที่ทำให้เกิดการคู่เข้าจากข้อมูลดังกล่าวเพื่อกำหนดเป็นจุดอ้างอิง หรือ Jiang *et al.* (2005) ได้นำเสนอวิธีการตรวจหาจุดอ้างอิงโดยใช้การวิเคราะห์ค่าความแรง (Coherence) ของสนามทิศทางตามระดับความสำคัญ (Hierarchical), Liu *et al.* (2006) นำเสนอการหาจุดอ้างอิงโดยใช้วิธีการฉายสนามทิศทางไปยังโดเมนที่น่าสนใจ เรียกว่าวิธีการดังกล่าวว่า “Local Axial Symmetry field (LAS)”, รูปแบบงานวิจัยที่ทำการฉายคุณลักษณะอื่นๆ อาทิเช่น “จุดโฟกัส (Focal point)” นำเสนอโดย Rerkrai และ Areekul (2000) ซึ่งทำการวิเคราะห์จุดตัดที่เกิดจากการฉายเส้นตรงที่ตั้งฉากกับสนามทิศทาง (Gradient line or normal line) โดยวิธีการดังกล่าวถูกนำมาปรับปรุงอีกครั้งโดย Areekul *et al.* (2006) ซึ่งทำการปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดีขึ้น และหลังจากนั้นในปี ค.ศ. 2008 จุดโฟกัสถูกนำเสนอขึ้นใหม่อีกครั้งโดย Areekul และ Boonchaiseree (2008) งานวิจัยดังกล่าวข้างต้นนี้จะทำการพิจารณาตรวจสอบจุดโฟกัสภายใต้กรอบความคิดที่ว่า จุดโฟกัสเกิดจากค่าเฉลี่ยของจุดตัดที่เกิดขึ้นจากอาณาบริเวณใดๆ รูปครึ่งวงกลมหน้าคว่ำ (Half Circle Model) พิจารณาตัวอย่างการหาจุดอ้างอิงโดยใช้วิธีการฉายดังกล่าวอย่างภาพที่ 17-19



ภาพที่ 17 การตรวจหาจุดแกนโดยใช้การคู่เข้าโดยเส้นตั้งฉากกับสนามทิศทาง
(Huvanandana *et al.*, 2000)



ภาพที่ 18 การหาจุดอ้างอิงโดยใช้วิธี “Local axial symmetry field, LAS” (Liu *et al.*, 2006)



ภาพที่ 19 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 จะพบว่า จุดตัดที่เกิดจากเส้นตั้งฉากต่างๆของเส้นลายนิ้วมือ ซึ่งทำการเลือกแบบสุ่มตามกฎว่าด้วยจำนวนมากแบบเบานัน จะลู่เข้าสู่จุดที่เป็นค่าเฉลี่ยกึ่งกลางของจุดตัด (Centroid) ซึ่งจุดดังกล่าวนี้จะถูกกำหนดเป็นจุดโฟกัสต่อไป พิจารณารายละเอียดดังสมการต่อไปนี้

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

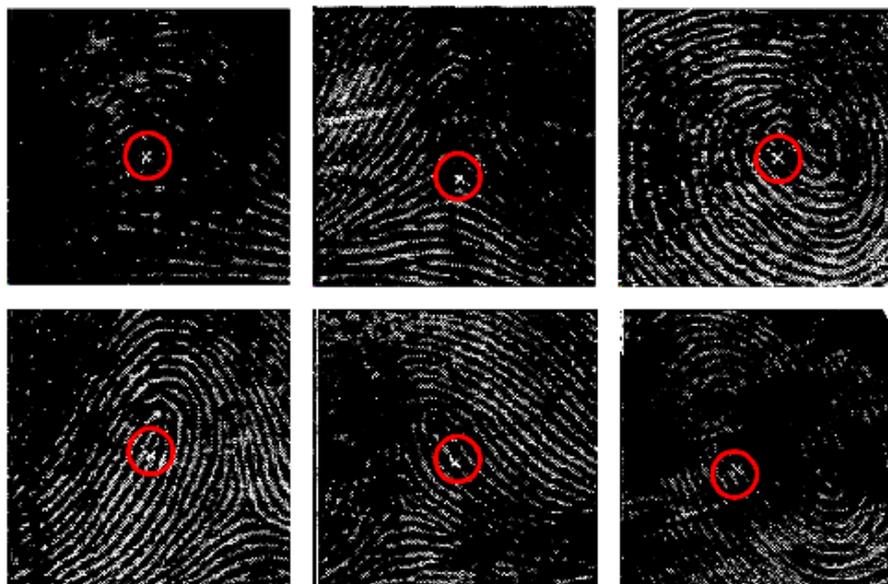
สมการที่ (1) เป็นกฎ Weak laws of large number โดยลักษณะการลู่เข้าเป็นการลู่เข้าตามความน่าจะเป็นที่เกิดจากการหาค่าระยะทางแบบยูคลิเดียนระหว่างจุดตัดใดๆ (x_c, y_c) กับค่าเฉลี่ยของจุดตัดที่เกิดขึ้น $E_n(x_c, y_c)$ ของเส้นลายนิ้วมือเมื่อมีจำนวนจุดตัดทั้งหมด n จุด ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2)

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

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

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

ตัวอย่างผลการทดลองการหาจุดโฟกัสโดยใช้วิธีดังที่กล่าวมาในข้างต้น ดังภาพที่ 20



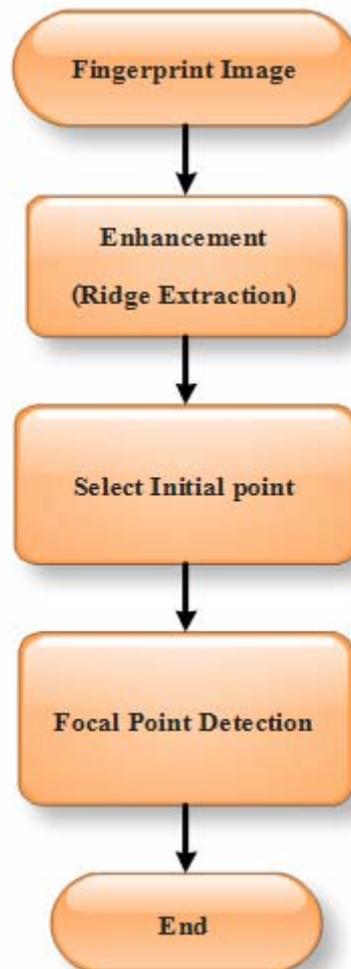
ภาพที่ 20 จุดโฟกัสโดยวิธีการของ Rerkrai และ Areekul (2000)

ที่มา: Rerkrai และ Areekul (2000)

วิธีการหาจุดโฟกัสในงานวิจัยดังกล่าว เน้นการพิสูจน์ความมีเสถียรภาพของจุดโฟกัส ว่ามีความสอดคล้องกับสมมุติฐานการคู่เข้าหรือไม่ โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณข้อมูลของจุดตัดรวมทั้งจำนวนรอบของการทดสอบ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปในระบบ พบว่าจุดโฟกัสที่ตรวจพบนั้นมีประสิทธิภาพ และทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี แต่ในงานวิจัยนี้ยังไม่มีรายงานการตรวจวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสในภาพลายนิ้วมือที่แตกต่างกันของนิ้วมือเดียวกัน นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณในการหาจุดโฟกัสนั้นค่อนข้างนานเนื่องจาก ต้องทำการประมวลผล และปรับปรุงภาพเพื่อให้ได้เส้นลายนิ้วมือที่สามารถนำมาใช้ในการหาเส้นตั้งฉาก, ข้อมูลของจุดตัดที่ได้มีการคำนวณแบบวนซ้ำ และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้จุดตัดปริมาณมากๆ เพื่อเพิ่มเสถียรภาพให้แก่จุดโฟกัส ดังนั้นในกรณีที่ภาพลายนิ้วมือมีข้อมูลที่เป็นส่วนของลายนิ้วมือน้อย ความน่าเชื่อถือของจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นตามกฎ และสมมุติฐานที่ตั้งไว้อาจมีค่าต่ำ

การตรวจหาจุดโฟกัสโดยวิธีดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นับว่าเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัย และการพัฒนาการหาจุดอ้างอิงซึ่งเป็นจุดโฟกัสให้สามารถนำมาใช้ในทางปฏิบัติจริงได้อย่างเหมาะสม

ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 จุดโฟกัสจึงได้ถูกนำมาปรับปรุงเพื่อใช้ในการปฏิบัติจริงในระบบรู้จำลายนิ้วมือ นำเสนอโดย Areekul *et al.* (2006) ซึ่งทำการปรับปรุงระบบโดยยึดสมมุติฐานที่มาจาก การตัดกันของเส้นตั้งฉากกับเส้นลายนิ้วมือเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้า แต่ได้ทำการปรับปรุงในด้านประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในส่วนของ การคัดเลือกเส้นลายนิ้วมือ วิธีการดังกล่าวนี้ทำให้สามารถเลือกอาณาบริเวณในการกำหนดจุดโฟกัสได้มากกว่าหนึ่งจุด โดยเลือกพิจารณาเฉพาะเส้นที่มีความโค้งเหมาะสมเท่านั้น กระบวนการทำงานต่างๆในงานวิจัยดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 21



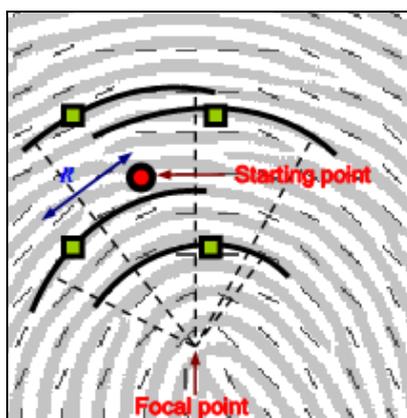
ภาพที่ 21 แผนผังการไหลแสดงการทำตรวจหาจุดโฟกัส ซึ่งนำเสนอโดย Areekul *et al.* (2006)

แผนผังการไหลในภาพที่ 21 แสดงกระบวนการตรวจหาจุดโฟกัส ซึ่งประกอบไปด้วย ขั้นตอนต่างๆมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ (Enhancement Process) ขั้นตอนนี้จะทำการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือเพื่อทำการดึงคุณลักษณะเด่นของเส้นลายนิ้วมือซึ่งผ่านกระบวนการทำให้บาง (Thinning) เพื่อนำมาใช้งานในขั้นตอนถัดไป

2. ขั้นตอนการกำหนดจุดเริ่มต้น ขั้นตอนนี้จะทำตรวจเกรดเพื่อคัดเลือกเส้นลายนิ้วมือจำนวนหนึ่ง (ในงานวิจัยดังกล่าวทำการคัดเลือกเส้นลายนิ้วมือจำนวน 4 เส้นซึ่งล้อมรอบจุดเริ่มต้น) ว่ามีลักษณะความโค้งที่เหมาะสม หรือเป็นไปตามเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้หรือไม่ โดยข้อมูลของเส้นลายนิ้วมือที่ผ่านการคัดเลือกนั้นจะทำการตรวจหาบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งมากที่สุด (บริเวณที่เริ่มมีการวกกลับของเส้นลายนิ้วมือ) จากนั้นทำการสร้างสมการเส้นตรงที่ตั้งฉากกับเส้นสัมผัสความโค้ง ณ บริเวณดังกล่าวมาสร้างจุดตัด เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาจุดกึ่งกลางเฉลี่ยและประมวลผลต่างๆในขั้นตอนถัดไป

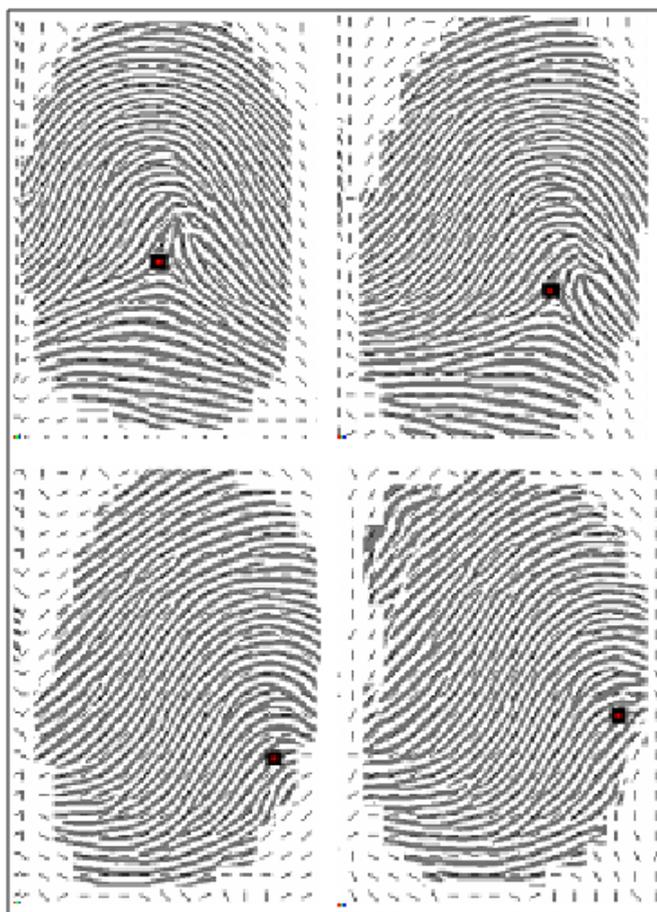
3. ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนการทำวนซ้ำ โดยทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยกึ่งกลางจุดตัดที่เกิดจากทิศทางที่ตั้งฉากกับเส้นลายนิ้วมือที่สนใจ ถ้าจุดใหม่ที่ได้มีการปรับเปลี่ยนทางตำแหน่งน้อยกว่าเกณฑ์อ้างอิงที่ได้ตั้งไว้ จะทำการหยุดการวนซ้ำ และกำหนดให้จุดนั้นเป็นจุดโฟกัส ในทางกลับกัน ถ้าจุดใหม่ที่เกิดขึ้นมีการปรับเปลี่ยนทางตำแหน่งมากกว่าเกณฑ์ดังกล่าว จะทำการกำหนดจุดนั้นเป็นจุดเริ่มต้นในการตรวจหาจุดโฟกัสตามขั้นตอนที่ 2 ต่อไป



ภาพที่ 22 ตัวอย่างการหาจุดโฟกัสซึ่งนำเสนอโดย Areekul *et al.* (2006)

ที่มา: Areekul *et al.* (2006)

จุดโฟกัสที่ได้จากวิธีการดังกล่าวข้างต้นพบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี สามารถนำไปใช้งานจริงได้ และนอกจากนี้ยังสามารถฉายลงนอกลายนิ้วมือในกรณีที่ภาพลายนิ้วมือมีข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ อาทิเช่น มีการเว้าหรือแหงของส่วน โคง หรือไม่มีบริเวณจุดเอกฐานได้อีกด้วย คุณสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้จุดโฟกัสโดย มีข้อดีกว่าการตรวจหาจุดเอกฐานโดยใช้พื้นฐานแบบจำลอง หรือการแบ่งสัดส่วนจากคุณลักษณะเด่น ซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้ แต่อย่างไรก็ตาม จุดโฟกัสจากวิธีการดังกล่าวยังใช้เวลานานเกินไป เนื่องมาจากต้องทำการปรับปรุงภาพ และนอกจากนี้ในภาพลายนิ้วมือที่เป็นกระ โจม หรือกระ โจมสูง ยังคงตรวจพบความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่สูง เนื่องจากลักษณะของเส้นลายนิ้วมือมีลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งน้อย (เส้นลายนิ้วมือส่วนใหญ่มีทิศค่อนข้างขนานกัน)



ภาพที่ 23 ตัวอย่างโฟกัสโดยวิธีการของ Areekul *et al.* (2006)

ที่มา: Areekul *et al.* (2006)

ต่อมาในปี ค.ศ. 2008 จุดโฟกัสได้ถูกนำมาพัฒนาขึ้นอีกครั้งโดย Areekul *et al.* (2008) โดยมีจุดมุ่งหมายคือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในแง่เวลาการทำงาน และความแม่นยำของระบบภายใต้เงื่อนไข และทฤษฎีต่างๆของโฟกัส ขั้นตอนวิธีหลักของวิธีการนี้คือการพิจารณาจุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัด โดยจุดตัดดังกล่าวนี้เกิดจากเส้นตั้งฉากกับสนามทิศทางซึ่งอยู่ ณ อาณาบริเวณใดๆ บริเวณหนึ่งของรูปครึ่งวงกลมหัวคว่ำ (Half Circle) สำหรับรูปแบบการทำงาน จะใช้ลักษณะการวนซ้ำเพื่อตรวจหาการเปลี่ยนแปลงซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง (คล้ายคลึงกับงานวิจัยก่อนหน้า) กล่าวคือเมื่อค่าดังกล่าวมีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานค่าหนึ่งแล้ว ค่ากึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัดจะถูกกำหนดเป็นจุดโฟกัสทันที ขั้นตอนวิธีการดังกล่าวนี้นับเป็นจุดเริ่มต้นของการตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้สนามทิศทางควบคู่กับแบบจำลองที่ได้ทำการกำหนดขึ้น ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า รูปแบบการตรวจหาจุดโฟกัสดังกล่าวนี้ นับเป็นหนึ่งในขั้นตอนวิธีย่อยซึ่งทำการพัฒนาในวิทยานิพนธ์นี้ จึงจะขอกกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

พิจารณางานวิจัยเกี่ยวกับโฟกัสที่ผ่านมา ในแง่ของสมมติฐานของการมีอยู่ของจุดโฟกัสบนภาพลายนิ้วมือ ซึ่งได้ทำการพิสูจน์ไว้แล้ว ร่วมกับการพัฒนา และปรับปรุงการหาจุดโฟกัสให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้จริงในระบบรู้จำลายนิ้วมือ พบว่าจุดโฟกัสเป็นคุณลักษณะเด่นอันหนึ่งที่ดี และเหมาะสมต่อการกำหนดเป็นจุดอ้างอิง ดังนั้นขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้จะทำการพัฒนาการตรวจหาจุดโฟกัสให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในระบบรู้จำลายนิ้วมือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลงทะเบียนลายนิ้วมือต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

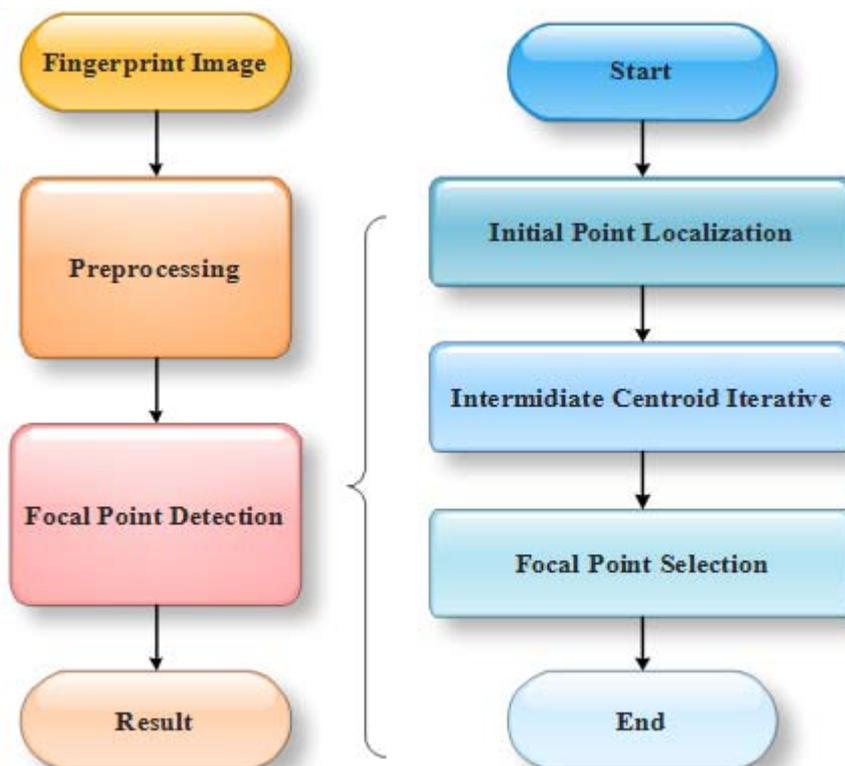
ในการพัฒนาขั้นตอนการตรวจหาจุดโฟกัส มีอุปกรณ์ที่สำคัญซึ่งแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้

| ลำดับที่ | รายการ | จำนวน | หน่วย |
|----------|---|-------|-----------|
| 1 | คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer) Centrino Duo 1.6GHz หน่วยความจำ 2 GBytes ระบบปฏิบัติการ Window Vista Service Pack 1 | 1 | ชุด |
| 2 | ซอร์ฟแวร์พัฒนาภาษา C++ (Microsoft Visual Studio 2008) | 1 | โปรแกรม |
| 3 | ซอร์ฟแวร์ประมวลผลลายนิ้วมือเกษตรศาสตร์ (KFP, Kasetsart Fingerprint Program) | 1 | โปรแกรม |
| 4 | ซอร์ฟแวร์คำนวณทางคณิตศาสตร์ (Matlab) | 1 | โปรแกรม |
| 5 | ซอร์ฟแวร์วิเคราะห์ผลทางคณิตศาสตร์ (Microsoft Office Excel 2007) | 1 | โปรแกรม |
| 6 | ฐานข้อมูลลายนิ้วมือที่ใช้ในการทดสอบจากการแข่งขัน ในระบบยืนยันตัวตนบุคคลโดยใช้ลายนิ้วมือ (Fingerprint Verification Competition, FVC) ซึ่งในแต่ละฐานข้อมูล ประกอบไปด้วยลายนิ้วมือของคน 100 คน โดยแต่ละคนมี ลายนิ้วมือคนละ 8 ภาพ รวมทั้งสิ้นฐานข้อมูลละ 800 ภาพ ฐานข้อมูลที่ใช้ในการทดลองมีดังต่อไปนี้ - FVC2000DB2a - FVC2002DB2a - FVC2004DB1a | 3 | ฐานข้อมูล |

วิธีการ

วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอรูปแบบการตรวจหาคุณลักษณะเด่นแบบมหภาคที่เรียกว่าจุดโฟกัสโดยใช้แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม สำหรับรายละเอียด และขั้นตอนวิธีต่างๆในการหาจุดโฟกัส สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 แผนผังการไหลแสดงการตรวจหาจุดโฟกัส

พิจารณาแผนผังการไหลด้านซ้ายตามภาพที่ 24 ขั้นตอนการตรวจหาจุดโฟกัสในจะประกอบไปด้วยขั้นตอนในการเตรียมข้อมูลลายนิ้วมือเบื้องต้น (Preprocessing) และขั้นตอนในการตรวจหาจุดโฟกัส (Focal Point Detection) พิจารณาเพิ่มเติมตามแผนผังทางด้านขวา จะเป็นรายละเอียดขั้นตอนในการตรวจหาจุดโฟกัส โดยจะแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนได้แก่ การตรวจหาจุดเริ่มต้น (Initial Point Localization), การวนซ้ำเพื่อหาจุดสิ้นสุด (Intermidiate Centroid Iterative) และการคัดเลือกจุดโฟกัส (Focal Point Selection) ขั้นตอนต่างๆจะกล่าวโดยรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนวิธีการเตรียมข้อมูลเบื้องต้นจากภาพถ่ายนิ้วมือ

วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้มีไว้เพื่อทำการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการหาจุดโฟกัสในขั้นตอนวิธีถัดไป โดยคุณลักษณะเด่นที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ สนามทิศทาง ซึ่งได้นำเสนอโดย Hong เรียกวิธีการดังกล่าวว่า “ระเบียบวิธีของ Hong (Hong’s method)” (Hong *et al.*, 1998) ซึ่งรูปแบบการหาค่าสนามทิศทางจะทำการแบ่งภาพออกเป็นบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $N \times N$ จุดภาพ (พิกเซล, Pixel) (ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ $N = 16$ จุดภาพเป็นขนาดหลัก) จากนั้นทำการคำนวณหาค่าสนามทิศทางในแต่ละบล็อก โดยกำหนดให้ $\theta_B(i, j)$ เป็นค่าสนามทิศทางมีค่าอยู่ในช่วง $[0, \pi]$ และคำนวณได้จากบล็อก w ตำแหน่งแถวที่ i และหลักที่ j ตามลำดับ รายละเอียดของสมการมีดังนี้

$$\theta_B(i, j) = 90^\circ + \frac{1}{2} \arctan(2G_{xy}, G_{xx} - G_{yy}) \quad (4)$$

โดยมีเงื่อนไขตามรายละเอียดสมการดังนี้

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

พิจารณาสมการที่ (4) กำหนดให้ w เป็นขนาดของหน้าต่างที่จะนำมาใช้ในการหาสนามทิศทาง จะพบว่าค่า $\theta_B(i, j)$ ที่ทำการตรวจหานั้นจะขึ้นกับค่าที่ได้จากการหาเกรเดียนต์ของภาพถ่ายนิ้วมือโดยตรง ซึ่งรูปแบบการคำนวณเป็นการพิจารณาค่ากำลังสองของเกรเดียนต์ในทางแกนนอน (G_{xx}) แกนตั้ง (G_{yy}) และค่าเกรเดียนต์แบบสหสัมพันธ์ (G_{xy}) พิจารณารายละเอียดตามสมการที่ (5)

หลังจากที่ได้ข้อมูลสนามทิศทางเรียบร้อยแล้วขั้นตอนนี้ต่อมาทำการคำนวณหาความแรง (Coherence) ของสนามทิศทางในแต่ละบล็อกตามที่ได้นำเสนอใน Bazen และ Gerez (2001) โดยกำหนดให้ $Coh(i, j)$ เป็นค่าความแรงของบล็อก (i, j) ใดๆซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $[0, 1]$ มีรายละเอียดสมการดังต่อไปนี้

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

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

$$Coh(i, j) > \rho \quad (7)$$

สมการที่ (7) กำหนดให้ค่า ρ เป็นเกณฑ์อ้างอิงที่ใช้ในการคัดกรองบล็อกที่มีค่าความแรงของสนามทิศทางตามเงื่อนไข (ในการทดลองที่ภาพลายนิ้วมือคุณภาพโดยรวมดี อาจไม่จำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวนี้ได้) หลังจากที่ได้ทำการคัดกรองบล็อกแล้ว จะพบว่าสนามทิศทางบางส่วนซึ่งมีความผิดพลาด อาทิเช่น สนามทิศทางที่เกิดจากบริเวณที่ไม่มีลายนิ้วมือ หรือเป็นบริเวณที่เป็นรอยแผลเป็นขนาดใหญ่จะถูกกำจัดออก และไม่นำมาคำนวณในขั้นตอนวิธีต่อไป เมื่อได้ค่าสนามทิศทางที่เหมาะสมแล้ว ทำการจัดเตรียมพารามิเตอร์พื้นฐานที่สำคัญคือ เส้นตั้งฉาก (Normal Line or Perpendicular Line) โดยกำหนดให้ $\varphi_B(i, j)$ เป็นค่ามุมที่ตั้งฉากกับสนามทิศทาง $\theta_B(i, j)$ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\varphi_B(i, j) = \begin{cases} \theta_B(i, j) + \pi/2 & ; \theta_B(i, j) < \pi/2 \\ \theta_B(i, j) - \pi/2 & ; \theta_B(i, j) > \pi/2 \end{cases} \quad (8)$$

ค่า $\varphi_B(i, j)$ ที่ได้จากสมการที่ (8) เป็นการปรับมุมที่ได้จาก $\theta_B(i, j)$ เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการพิจารณา การสร้างจุดเริ่มต้นในขั้นตอนวิธีการตรวจสอบหาจุดโฟกัสในหัวข้อต่อไป

ขั้นตอนวิธีการตรวจหาจุดโฟกัส

ขั้นตอนนี้จะอธิบายถึงสมมุติฐานของการทดลอง และขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งการตรวจหาจุดโฟกัสสามารถพิจารณาขั้นตอนการทำงานดังแผนผังการไหลในภาพที่ 24 พบว่าการตรวจหาจุดดังกล่าวประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

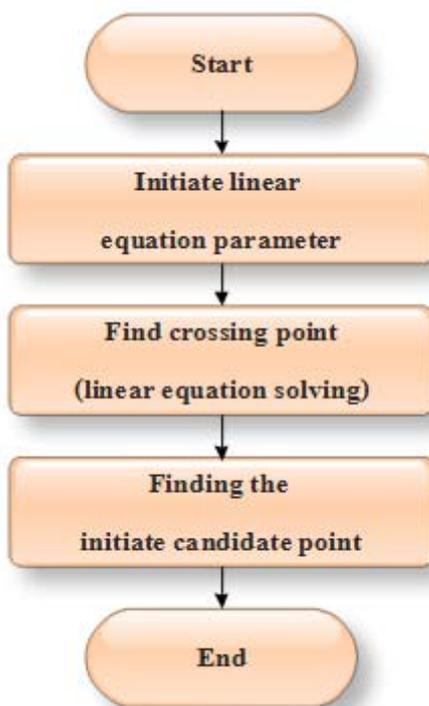
1. ขั้นตอนการหาจุดเริ่มต้น (Initial Point Localization) ขั้นตอนนี้จะทำการตรวจหาจุดเริ่มต้น (Candidate Starting Point) เพื่อจะนำมาใช้ในการตรวจหาจุดโฟกัสในขั้นตอนถัดไป

1.1 ที่มา และสมมุติฐาน

พิจารณางานวิจัยที่ทำการตรวจหาจุดโฟกัสซึ่งนำเสนอโดย Rerkrai และ Areekel (2000) พบว่าเมื่อพิจารณาค่าแห่งของจุดโฟกัส หรืออาณาบริเวณที่น่าจะพบจุดโฟกัสตกอยู่นั้น จุดดังกล่าวจะมีเสถียรภาพที่ดี และสามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติจริงได้ในกรณีที่ ข้อมูลจุดตัดที่เกิดจากเส้นลายนิ้วมือ ณ อาณาบริเวณใดๆ นั้นมีจำนวนมาก (ตามกฎ Weak laws of large number) ด้วยเหตุนี้เองสมมุติฐานของการทดลองนี้คือ “ถ้าสนามทิศทางสามารถแทนความโค้งของเส้นลายนิ้วมือได้อย่างเหมาะสมแล้ว การกระจายตัวของจุดตัดต่างๆ ที่เกิดจากเส้นตั้งฉากกับสนามทิศทางใดๆ ของลายนิ้วมือ จะบ่งชี้อาณาบริเวณที่สามารถตรวจพบจุดโฟกัสได้เช่นเดียวกัน” จากสมมุติฐานดังกล่าว สามารถออกแบบแผนผังการไหลของขั้นตอนวิธีการตรวจหาอาณาบริเวณที่มีจุดโฟกัสตกอยู่ได้ดังภาพที่ 25

1.2 ขั้นตอนวิธี

ขั้นตอนในการตรวจหาจุดเริ่มต้นนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ (พิจารณาตามภาพที่ 25) โดยเริ่มจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการสร้างสมการเส้นตรง (Linear Equation) กำหนดให้ $x_B(i, j)$ และ $y_B(i, j)$ เป็นพิกัดแสดงตำแหน่งจุดกึ่งกลางบล็อก (i, j) ใดๆ บนของภาพลายนิ้วมือ จากนั้นทำการสร้างสมการเส้นตรงที่มีทิศทางเดียวกับ $\varphi_B(i, j)$ และพาดผ่านจุดกึ่งกลางบล็อกที่สนใจดังสมการที่ (9)



ภาพที่ 25 แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการตรวจหาจุดเริ่มต้น

$$y - y_B = m_B(x - x_B) \quad , m_B = \tan(\varphi_B(i, j)) \quad (9)$$

พิจารณาสมการที่ (9) ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงที่จะนำมาใช้ในการหาจุดตัด พิจารณาลายนิ้วมือโดยทั่วไปจะพบว่าความโค้งของเส้นลายนิ้วมือนั้นประกอบด้วยบริเวณที่เส้นลายนิ้วมือมีการเปลี่ยนแปลงความโค้ง และบริเวณที่เส้นลายนิ้วมือมีลักษณะการวางตัวคล้ายเส้นขนาน ในกรณีที่เส้นลายนิ้วมือวางตัวเป็นเส้นขนาน หรือมีการเปลี่ยนแปลงความโค้งน้อยมาก จะพบว่าผลลัพธ์คำตอบ หรือจุดตัดที่ได้จะตกออกนอกภาพลายนิ้วมือไกลมาก หรืออาจทำให้ไม่สามารถหาค่าคำตอบของสมการเส้นตรงได้ ดังนั้นเพื่อให้กระบวนการการหาจุดตัดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จะทำการกำหนดเกณฑ์ในการคัดเลือกค่า $\varphi_B(i, j)$ จากคู่บล็อกใดๆ โดยกำหนดให้ $\varphi_{B1}(i, j)$ และ $\varphi_{B2}(i, j)$ เป็นบล็อกใดๆ 2 บล็อกที่ไม่ใช่บล็อกเดียวกัน เกณฑ์การคัดเลือกบล็อกจะมีรายละเอียดดังสมการ

$$|\varphi_{B1}(i, j) - \varphi_{B2}(i, j)| > \varphi_{Threshold} \quad (10)$$

ค่า $\varphi_{Threshold}$ จากสมการที่ (10) จะเป็นค่าเกณฑ์อ้างอิงที่ใช้ในการคัดกรองคูบล็อกใดๆที่มีทิศทางต่างกันไม่มากนัก (การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ $\varphi_{Threshold} = \pi/6$ หรือ 30°) สมการที่ (10) จะนำมาใช้ในการคัดเลือกคูบล็อกที่เหมาะสมต่อการคำนวณหาจุดตัด หรือผลลัพธ์คำตอบของสมการเส้นตรง กำหนดให้ (x_p, y_p) เป็นจุดตัดที่เกิดจากคูบล็อกใดๆดังที่กล่าวมาข้างต้น จะสามารถคำนวณหาจุดตัดได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\left(x_p = \frac{m_{B2}x_{B2} - m_{B1}x_{B1} - (y_{B2} - y_{B1})}{m_{B2} - m_{B1}}, y_p = \frac{m_{B2}(y_{B1} - m_{B1}x_{B1}) + m_{B1}(y_{B2} - m_{B2}x_{B2})}{m_{B2} - m_{B1}} \right) \quad (11)$$

สมการที่ (11) แสดงการหาจุดตัดที่เกิดจากคูบล็อก $B1$ และ $B2$ ซึ่งลักษณะการแก้สมการเป็นการจัดรูปทางเมตริกซ์ พิจารณาจุดตัด (x_p, y_p) ใดๆซึ่งเกิดขึ้นจากบล็อกต่างๆของลายนิ้วมือ พบว่าจุดตัดบางจุดเกิดจากการตัดกันของบล็อกที่อยู่ไกลกันจนเกินไป จุดตัดดังกล่าวเป็นข้อมูลที่ไม่มีความสำคัญ และอาจส่งผลให้การกระจายตัวของจุดตัดนั้นมีความสูงจนไม่สามารถทำการคัดเลือกจุดเริ่มต้นเพื่อนำไปใช้ในต่อไปได้ ด้วยเหตุนี้เองจึงต้องทำการคัดกรองจุดด้วยเกณฑ์อ้างอิงอีกเงื่อนไขหนึ่ง โดยกำหนดให้ d_{B1C} และ d_{B2C} คือระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางบล็อกที่ 1 กับจุดตัด และระยะห่างระหว่างจุดกึ่งบล็อกที่ 2 กับจุดตัดตามลำดับ พิจารณาสมการดังต่อไปนี้

$$\Delta d = |d_{B1C} - d_{B2C}| < d_{Threshold} \quad (12)$$

พิจารณาสมการที่ (12) Δd เป็นผลต่างของ d_{B1C} กับ d_{B2C} และ $d_{Threshold}$ คือเกณฑ์ที่ใช้ทำการคัดกรองจุดตัด ($d_{Threshold} = 160$ จุดภาพ) ในกรณีที่ $\Delta d < d_{Threshold}$ จุดตัดดังกล่าวจะถูกคัดเลือกให้นำมาใช้งาน จุดตัดที่ให้ค่า Δd นอกเหนือจากเงื่อนไขดังกล่าวจะไม่นำมาทำการพิจารณาต่อ เมื่อได้จุดตัดที่ผ่านการคัดกรองตามเงื่อนไขทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อมาทำการคำนวณหาจุดเริ่มต้น โดยการสร้างแผนภาพแสดงการแจกแจงความถี่แบบ 2 มิติ (2D Histogram) ซึ่งแผนภาพดังกล่าวจะทำการปรับระดับของจุดตัด (Quantization) จากความละเอียดขนาดจุดสีให้เป็นบล็อกขนาด $N \times N$ จุดภาพจากนั้นทำการตรวจกราดหาจุดสูงสุดสัมพัทธ์ (Local maxima point) โดยการนำหน้าต่างขนาด 3×3 มาทำการตรวจหาตำแหน่งของบล็อกที่ทำให้เกิดจุดสูงสุดสัมพัทธ์ แล้วจึงนำจุดสูงสุดสัมพัทธ์ที่ตรวจพบมาทำการเลือก โดยพิจารณาจากค่าความถี่ของจุดตัดของแต่ละบล็อกมาเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย O อันดับ (การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ $O = 3$) จากนั้นทำการกำหนดให้พิกัดกึ่งกลางบล็อกดังกล่าวเป็นจุดเริ่มต้นเพื่อนำไปใช้หาจุดโฟกัสในกระบวนการถัดไป (ในกรณีที่จุดสูงสุดสัมพัทธ์ตกอยู่ข้างนอกข้อมูลภาพลายนิ้วมือ ให้เลือก

จุดสูงสุดสัมพัทธ์ถัดไปมาใช้แทน และในกรณีที่สามารถตรวจหาจุดเริ่มต้นได้เลย จะทำการคัดกรองภาพนี้ออกจากขั้นตอนวิธีนี้)



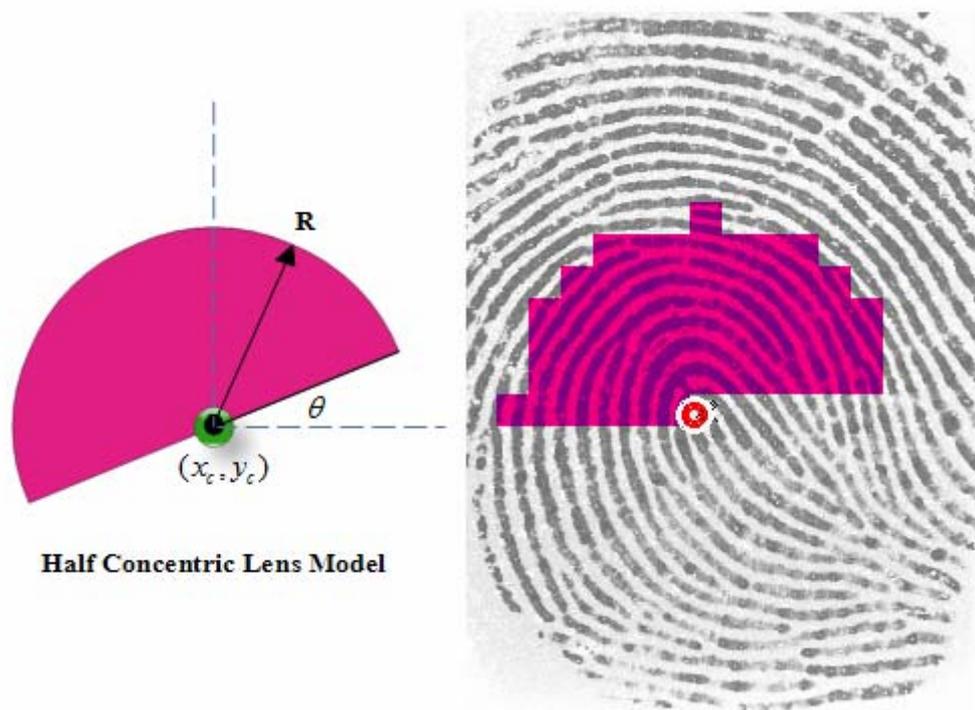
ภาพที่ 26 การกระจายตัวของจุดตัด และการปรับระดับเพื่อทำการหาจุดเริ่มต้น

2. ขั้นตอนการวนซ้ำเพื่อหาจุดสิ้นสุด (Intermediate centroid iteration) ขั้นตอนนี้ นับเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด เพราะจุดโฟกัสที่ได้จะถูกตรวจพบในขั้นตอนนี้ ลักษณะการทำงานในขั้นตอนนี้จะมีรูปแบบการทำงานแบบแบบวนซ้ำเพื่อทำการหาจุดสิ้นสุด โดยใช้จุดเริ่มต้นที่ได้ในหัวข้อที่แล้วซึ่งที่มา สมมุติฐาน และรายละเอียดในการทดลองในแต่ละขั้นตอนนี้ดังต่อไปนี้

2.1 ที่มา และสมมุติฐาน

พิจารณาการตรวจหาจุดโฟกัส จะพบว่าโดยพื้นฐานแล้ว เสถียรภาพของจุดโฟกัสเกิดจากปริมาณข้อมูลของจุดตัดที่เพิ่มสูงขึ้นในอาณาบริเวณใดๆที่สนใจ ซึ่งอาณาบริเวณดังกล่าวก็คือจุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัด หรือที่เรียกว่าจุดโฟกัสนั่นเอง ดังนั้นเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของจุดตัด กับทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ จะสังเกตเห็นว่าถ้าสมมุติให้เส้นลายนิ้วมือมีการวางตัวในลักษณะที่เป็นเส้นรอบวงของวงกลมรอบจุดใดจุดหนึ่งที่เป็นศูนย์กลางของวงกลมนั้น จุดตัดต่างๆที่เกิดจากเส้นลายนิ้วมือนั้น จะตก ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงกลมพอดีตามคุณสมบัติทางเรขาคณิตของวงกลม ดังนั้นจุดศูนย์กลางของวงกลม และจุดกึ่งกลางเฉลี่ยที่เกิดจากจุดตัดก็คือจุดเดียวกัน ลักษณะการกระจายตัวของจุดตัดที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นไปตามเงื่อนไขการลู่เข้าโดยสมบูรณ์ (Absolutely Convergence) และสอดคล้องกับทฤษฎีบทของโฟกัสที่ได้กล่าวมาแล้วดังสมการที่ (13) ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เอง จะสามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่า “ถ้าทำการพิจารณา

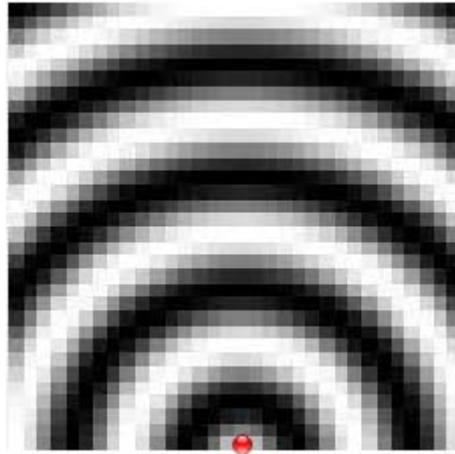
คัดเลือกอาณาบริเวณใดๆของลายนิ้วมือที่มีความโค้งที่เหมาะสมคล้ายคลึงกับวงกลมได้มากที่สุด อาณาบริเวณดังกล่าวนี้ก็น่าจะมีจุดโฟกัสตกอยู่เช่นเดียวกัน” เมื่อพิจารณาภาพลายนิ้วมือโดยทั่วไปแล้วจะพบว่า โค้งมากแล้วส่วนโค้งของเส้นลายนิ้วมุด้านบนมักจะมีความโค้งที่ใกล้เคียงกับวงกลมมากกว่าเส้นลายนิ้วมือที่อยู่ด้านล่าง ดังนั้นข้อมูลที่สำคัญในการหาจุดโฟกัสมักจะอยู่ตามส่วนโค้งด้านบนเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้เองจะทำการสร้างแบบจำลองที่มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมด้านบน ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกว่า “แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม (Half Concentric Lens Model)” ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมขนาดบล็อก 16×16 และภาพตัวอย่างการใช้งาน

พิจารณาภาพที่ 27 กำหนดให้ (x_c, y_c) เป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมที่มีรัศมี R หน่วย และ θ เป็นมุมที่ครึ่งวงกลมเบนออกจากแกนนอน วัตถุประสงค์ของการนำแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมมาใช้งาน เพื่อทำการตรวจสอบลักษณะความคล้ายคลึงของทิศทางที่มาจากเส้นลายนิ้วมือ หรือสนามทิศทางเทียบกับคุณลักษณะของวงกลมในอาณาบริเวณที่สนใจ ด้วยเหตุนี้เองอาจกล่าวได้ว่าการตรวจหาจุดโฟกัสรูปแบบวิธีการที่น่าเสนอนี้ มีลักษณะการทำงานแบบการใช้แบบจำลองเป็นพื้นฐานในการตรวจหาจุดโฟกัส ผสมผสานกับการฉายข้อมูลโดยใช้คุณลักษณะเด่นเป็นพื้นฐานนั่นเอง

พิจารณาภาพที่ 28 เพิ่มเติม ภาพดังกล่าวนี้เป็นภาพเส้นลายนิ้วมือที่ทำการจำลองขึ้นให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามวงกลมที่สมบูรณ์ทุกประการ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงจุดตัดต่างๆที่เกิดจากเส้นตั้งฉากใดๆ (จุดวงกลมสีแดงที่แสดงอยู่ในภาพ) ที่เกิดจากแบบจำลองนี้แล้ว จะพบว่าจุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัดเหล่านั้น กับจุดโฟกัสจะเป็นจุดเดียวกันตามทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้ว



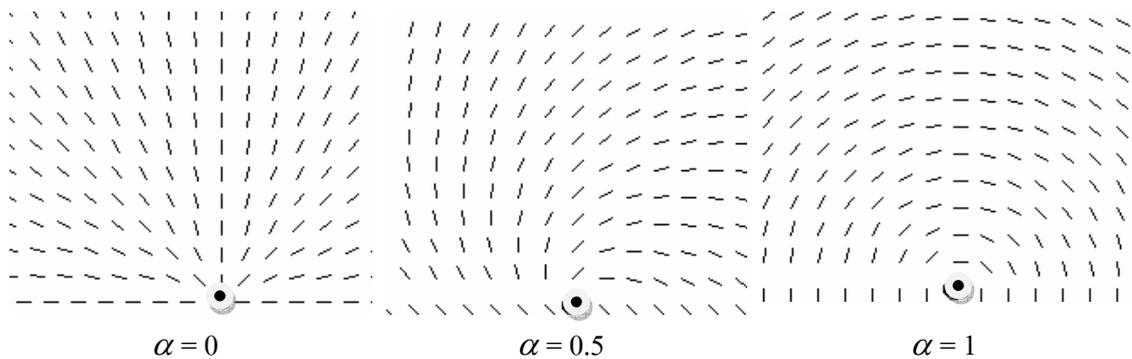
ภาพที่ 28 ภาพจำลองเส้นลายนิ้วมือที่มีลักษณะการวางตัวเป็นวงกลมโดยสมบูรณ์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า วัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองคือการหาอาณาบริเวณของเส้นลายนิ้วมือที่มีทิศการวางตัวของเส้นต่างๆเหล่านั้นเหมาะสมมากที่สุด ดังนั้นรูปแบบการหาลักษณะความคล้ายคลึงกับแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมในวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกว่า “ค่าปัจจัยแสดงความคล้ายคลึงกับเลนส์ครึ่งวงกลม (Concentric Lens Similarity Factor (CLS), α ” โดยสามารถพิจารณารายละเอียดได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{N}{M} \left(1 - \sum_{(i,j) \in CL} \frac{|\theta_{fh}(i,j) - \theta_{cl}(i,j)|}{N\pi/2} \right) \quad (13)$$

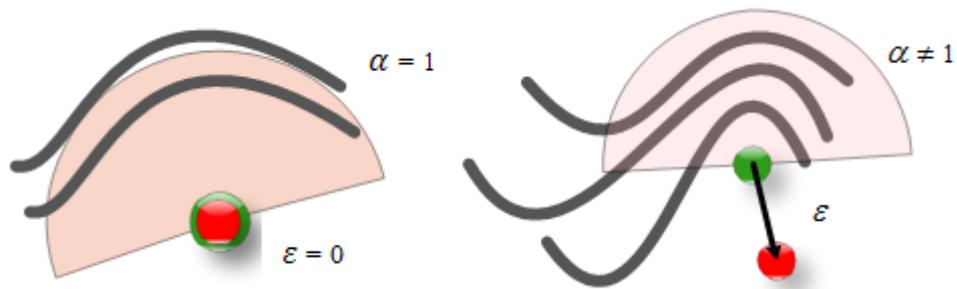
สมการที่ (13) กำหนดให้ $\theta_{fh}(i,j)$ และ $\theta_{cl}(i,j)$ เป็นทิศทางที่เกิดขึ้นจริงจากเส้นลายนิ้วมือ และทิศทางที่เกิดจากแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมตามลำดับ N คือจำนวนข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณ และ M คือจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่บรรจุอยู่ในแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม CL (ในการทดลองค่าพารามิเตอร์ต่างๆอาจปรับความละเอียดตั้งแต่ระดับบิตอก ไปจนถึงระดับเส้นลายนิ้วมือก็ได้ ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน) ค่า α ที่ได้จากสมการมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$ กล่าวคือ ในกรณีที่ค่า $\alpha = 0$ หมายความว่าทิศทางต่างๆในอาณาบริเวณรูปเลนส์ครึ่งวงกลมไม่

มีความคล้ายคลึงกับแบบจำลองเลข ส่วนในกรณีที่ว่า $\alpha = 1$ จะพบว่าทิศทางที่ทำการวิเคราะห์อยู่นั้น มีลักษณะเป็นเลนส์ครึ่งวงกลมที่สมบูรณ์แบบนั่นเอง จากที่กล่าวมาแล้วจะพบว่าค่า α ที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกหาอาณาบริเวณที่มีทิศทางที่เหมาะสมต่อไป ตัวอย่างค่า α ที่เกิดจากการจำลองสนามทิศทางพิจารณาดังรูปที่ 29



ภาพที่ 29 ค่าปัจจัยแสดงความคล้ายคลึงกับเลนส์ครึ่งวงกลมในอาณาบริเวณที่ลักษณะของสนามทิศทางแตกต่างกัน

พิจารณาเพิ่มเติมถึงการนำค่าปัจจัยแสดงความคล้ายคลึงกับเลนส์ครึ่งวงกลมไปใช้ในการหาจุดโฟกัส ถ้ากำหนดให้ ε เป็นระยะทางระหว่างจุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัดกับจุดศูนย์กลางของวงกลม จะพบว่าในกรณีที่ว่า $\alpha = 1$ จะพบว่าจุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัด กับจุดศูนย์กลางของวงกลมเป็นจุดเดียวกัน ($\varepsilon = 0$) แต่ในกรณีที่ว่า $\alpha \neq 1$ จะพบว่าจุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุด จะเลื่อนห่างออกจากจุดศูนย์กลางวงกลมออกไป ($\varepsilon > 0$) ซึ่งจากสาเหตุตรงนี้เองจะพบว่าค่า ε ดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งชี้ที่มีความสำคัญ โดยตรงกับ α กล่าวคือเป็นถ้าอาณาบริเวณรูปเลนส์ครึ่งวงกลมที่พิจารณาอยู่ในขณะนั้นมีค่า α ไม่เท่ากับ 1 อาณาบริเวณดังกล่าวควรที่จะปรับเปลี่ยนจุดศูนย์กลางของเลนส์ ไปอยู่ที่จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัดซึ่งห่างออกมาจากเดิมเป็นระยะทาง ε เพื่อเพิ่มปริมาณจุดตัดให้สูงขึ้นไปเรื่อยๆจนมีเสถียรภาพตามทฤษฎีของโฟกัส และทำให้ความคล้ายคลึงของทิศทางที่เกิดจากการวางตัวของเส้นลายนิ้วมือ มีค่าใกล้เคียงกับเลนส์ครึ่งวงกลมแบบสมบูรณ์ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ($\varepsilon \rightarrow 0$ และ $\alpha \rightarrow 1$) พิจารณาภาพตัวอย่างดังภาพที่ 30



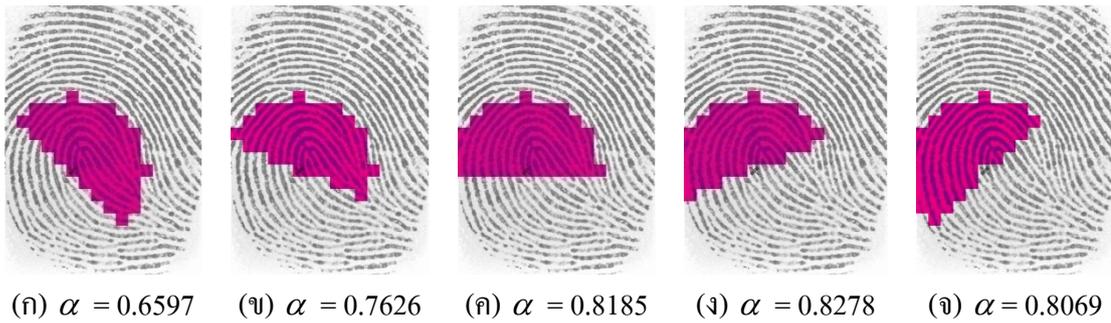
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า ϵ

จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อนี้ ประเด็นหลักคือต้องการอธิบายให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม กับจุดโฟกัส สำหรับรูปแบบการนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติจะอยู่ในหัวข้อย่อยถัดไป

2.2 ขั้นตอนวิธี

ขั้นตอนการวนซ้ำเพื่อตรวจหาจุดสิ้นสุด เพื่อนำมาทำการคัดเลือกจุดโฟกัสรายละเอียดต่างๆของขั้นตอนวิธีนี้ มีดังต่อไปนี้

ก) ขั้นที่ 1 (STEP 1) ตรวจหาทิศทางการวางตัวที่ทำให้ค่า α สูงที่สุด (Find Orientation with the Maximum, CLS) ขั้นตอนนี้จะนำจุดเริ่มต้นที่ได้ในขั้นตอนวิธีก่อนหน้านี้ มากำหนดเป็นจุดศูนย์กลางของครึ่งวงกลมที่มีรัศมีขนาด R หน่วย (ในการทดลองกำหนดให้ $R = 6$ บล็อก) จากนั้นทำการคำนวณหาค่า α โดยเริ่มพิจารณาเปรียบเทียบกับแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมซึ่งมีการบิดตัวอยู่ในมุม $\pm\phi$ และระยะการบิดในแต่ละขั้นมีค่าเป็น β (วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้มีการบิดตัวอยู่ในช่วง $\phi = 45^\circ$ และ $\beta = 22.5^\circ$ ดังนั้นจะเกิดการบิดของเลนส์ครึ่งวงกลมทั้งหมด 5 แบบ และนอกจากนี้ยังได้ทดลองทำการปรับความละเอียดในการบิดให้สูงขึ้นอีกด้วย) หลังจากนั้นทำการเลือกอาณาบริเวณรูปครึ่งวงกลมที่ทำให้เกิดค่า α สูงที่สุดเพื่อนำมาใช้ในขั้นตอนถัดไป ตัวอย่างการคำนวณหาค่า α ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ค่า α ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนทิศทางเป็น $-\pi/4$, $-\pi/8$, 0 , $\pi/8$ และ $\pi/4$ ตามลำดับ

ข) ขั้นที่ 2 (STEP 2) การตรวจหาจุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัด พิจารณาอาณาบริเวณเลนส์ครึ่งวงกลมจากหัวข้อย่อยที่ผ่านมา ทำการคำนวณหาจุดตัดที่เกิดขึ้นจากเส้นตรงที่ตั้งฉากกับสนามทิศทาง หรือเส้นลายนิ้วมือที่ตกในอาณาบริเวณดังกล่าว ดังสมการต่อไปนี้

$$(x_{C(k)}, y_{C(k)}) = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{p(i)}, \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{p(i)} \right) \quad (14)$$

สมการที่ (14) กำหนดให้ $(x_{C(k)}, y_{C(k)})$ เป็นจุดกึ่งกลางเฉลี่ยจากการวนซ้ำรอบที่ k และกำหนดให้ $(x_{p(i)}, y_{p(i)})$ เป็นจุดตัดใดๆจากอาณาบริเวณเลนส์ครึ่งวงกลมที่สนใจ ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลที่ใช้ในการหาจุดตัดทั้งหมด N ค่า (ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดความละเอียดเป็นระดับบิต) ลักษณะการคำนวณในขั้นตอนนี้ยังยึดเงื่อนไขจากสมการ (10) และ (12) เช่นเดียวกับการคำนวณหาจุดตัดในขั้นตอนที่ผ่านมาแล้ว

ค) ขั้นที่ 3 (STEP 3) การตรวจสอบการลู่เข้า (Convergence Checking) จากที่ได้กล่าวมาแล้วในสมมติฐานข้างต้น ขั้นตอนนี้จะทำการตรวจสอบการลู่เข้าโดยพิจารณาระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางเฉลี่ยของการวนซ้ำก่อนหน้า $(x_{C(k-1)}, y_{C(k-1)})$ กับจุดกึ่งกลางเฉลี่ยที่เกิดจากการวนซ้ำครั้งล่าสุด $(x_{C(k)}, y_{C(k)})$ โดยรอบแรกของการวนซ้ำจะทำการกำหนดให้ค่าเริ่มต้น $(x_{C(0)}, y_{C(0)})$ เป็นจุดศูนย์กลางของเลนส์ครึ่งวงกลม ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\varepsilon_k = \sqrt{(x_{C(k)} - x_{C(k-1)})^2 + (y_{C(k)} - y_{C(k-1)})^2} \quad (15)$$

สมการที่ (15) ค่า ε_k จะใช้เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะการลู่เข้าของจุดกึ่งกลางเฉลี่ยที่เกิดขึ้นซึ่งพิจารณาตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

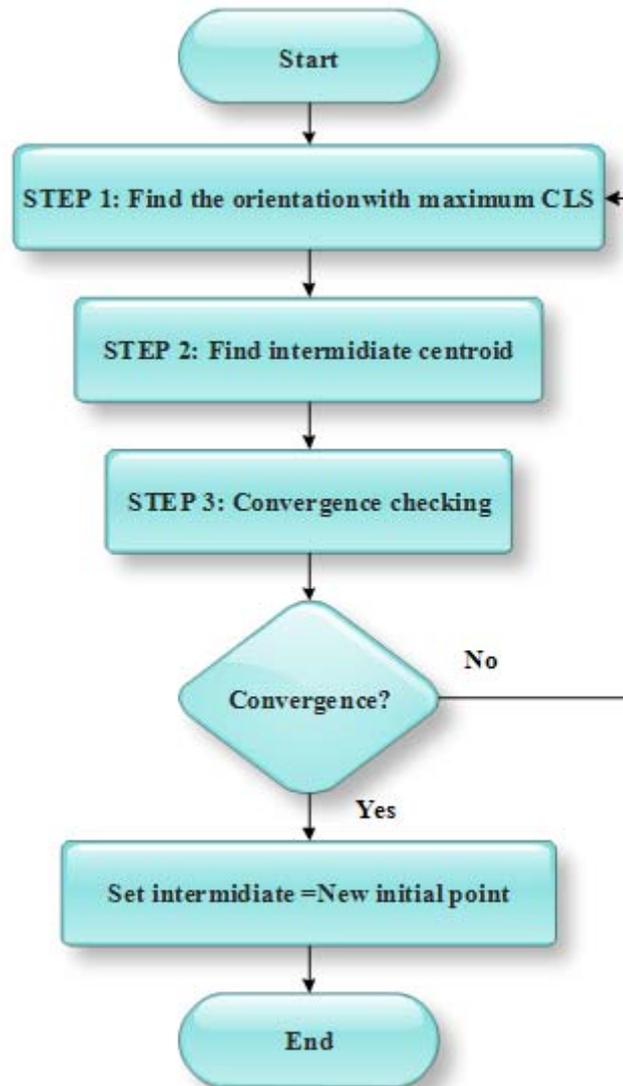
$$\varepsilon_k < \varepsilon_{Threshold} \quad (16)$$

สมการที่ (16) ค่า $\varepsilon_{Threshold}$ เป็นเกณฑ์อ้างอิงที่ใช้สำหรับกำหนดการหยุดในการวนซ้ำ (กำหนดให้ $\varepsilon_{Threshold} = 1$ จุดภาพในการทดลองนี้) ซึ่งเมื่อจุดตัดใหม่ที่เกิดขึ้นเข้าตามเงื่อนไขนี้จะถือว่าจุดดังกล่าวมีการลู่เข้า และกำหนดให้จุดสิ้นสุดนั้นเป็นจุดที่ถูกนำเข้ามาคัดเลือกเป็นจุดโพลีในขั้นตอนถัดไป

จากการกำหนดเงื่อนไขตามสมการที่ (16) ในบางครั้งจะพบว่าข้อมูลอาจไม่ลู่เข้า (Diverge) ตัวอย่างปัญหาอาทิเช่น เส้นลายนูนมีลักษณะขนานกัน หรือจุดกึ่งกลางเฉลี่ยที่ได้มีการสะท้อนกลับไปกลับมาในแต่ละรอบของการวนซ้ำ ดังนั้นเพื่อให้การวนซ้ำสามารถหยุดได้อย่างสมบูรณ์ จำเป็นต้องทำการกำหนดจำนวนรอบของการวนซ้ำไว้ (เนื่องจากจุดกึ่งกลางเฉลี่ยที่เกิดขึ้นนั้น ถ้าลู่เข้าจะมีการลู่เข้าที่ค่อนข้างเร็ว ในวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดจำนวนรอบไว้ไม่เกิน 10 รอบ)

นอกจากการคำนวณหาค่า ε_k ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาตามสมมุติฐานที่เกิดขึ้นจะพบว่าพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งชี้การลู่เข้าอีกสิ่งหนึ่งคือค่าปัจจัยแสดงความคล้ายคลึงกับเลนส์ครึ่งวงกลม (α) นั่นเอง ค่าดังกล่าวนี้เป็นตัวบ่งชี้การกำหนดจุดสิ้นสุดได้ดีเนื่องมาจาก การคำนวณหาค่า α นี้มีการตรวจสอบลักษณะการวางตัวของสนามทิศทางโดยตรง กล่าวคือถ้าสนามทิศทางมีค่าความโค้งที่ดี บริเวณดังกล่าวนั้นก็น่าจะมีจุดโพลีตกอยู่ หรือเป็นอาณาบริเวณที่จะทำให้เกิดจุดโพลีได้ ในทางตรงข้ามถ้าสนามทิศทางมีการวางตัวที่คล้ายเส้นตรงขนานกันหมด ค่า α ที่ได้จะมีค่าต่ำซึ่งก็บ่งชี้ได้อย่างชัดเจนว่าบริเวณนี้ไม่น่าจะทำให้เกิดจุดโพลีได้อย่างแน่นอน ดังนั้นในการวนซ้ำในแต่ละรอบ อาจทำการพิจารณาค่า α ที่เกิดขึ้นแทน โดยกำหนดให้ α_k เป็นค่าปัจจัยแสดงความคล้ายคลึงกับเลนส์ครึ่งวงกลมในรอบการวนซ้ำรอบที่ k ดังนั้นนอกจากจะพิจารณาค่า ε_k แล้ว อาจพิจารณาค่า α_k แทน เพื่อให้ได้จุดสิ้นสุดที่เหมาะสมที่สุดต่อไป (สำหรับรายละเอียดพิจารณาจากผลการทดลองจะแสดงผลเฉพาะวิธีการเลือกจุดสิ้นสุดที่ทำให้ผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อนนั้นมีค่าที่ดีที่สุด)

จากรูปแบบการทดลองในขั้นตอนที่ผ่านมา อาจนับได้ว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการหาจุดโฟกัส เนื่องจากจุดกึ่งกลางเฉลี่ยที่คำนวณหาได้ และถูกคัดเลือกในขั้นตอนนี้ จะถูกนำไปคัดเลือกในขั้นตอนถัดไป สำหรับภาพรวมของขั้นตอนนี้พิจารณาแผนผังการไหลดังนี้



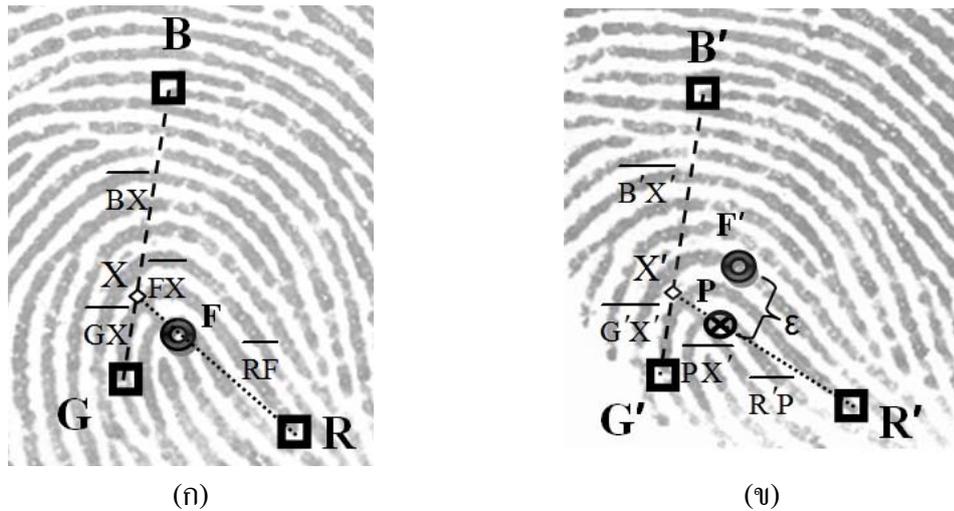
ภาพที่ 32 แผนผังการไหลแสดงขั้นตอนการวนซ้ำเพื่อตรวจหาจุดสิ้นสุด

3. ขั้นตอนการคัดเลือกจุดโฟกัส (Focal Point Selection) ขั้นตอนนี้จะนำจุดกึ่งกลางเฉลี่ยที่เกิดจากขั้นตอนที่แล้วมาทำการคัดเลือกเป็นจุดโฟกัสตามสมมุติฐานที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อการหาจุดสิ้นสุด โดยการวิเคราะห์จากค่าปัจจัยแสดงความคล้ายคลึงกับเลนส์ครึ่งวงกลม (α) ซึ่งในที่นี้จะเลือกจุดกึ่งกลางเฉลี่ยที่ให้ค่า α สูงที่สุดมาเป็นจุดโฟกัสนั่นเอง

การตรวจวัดความคลาดเคลื่อน และการประเมินประสิทธิภาพของจุดโฟกัส

พิจารณาจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นบนภาพลายนิ้วมือใดๆจะพบว่า จุดโฟกัสไม่สามารถกำหนดได้ด้วยการมองตามปกติ (Manually Mark Detection) เนื่องจากเมื่อพิจารณาสมมุติฐาน และทฤษฎีที่นำมาใช้ในการคำนวณหาจุดโฟกัสจากขั้นตอนที่กล่าวมาแล้ว จะพบว่าจุดโฟกัสที่เกิดขึ้น เกิดจากการคำนวณหาจุดกึ่งกลางของจุดตัดที่เกิดจากอาณาบริเวณที่เส้นลายนิ้วมือใดๆ ที่มีลักษณะการวางตัวใกล้เคียงกับแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมมากที่สุด ด้วยเหตุนี้เองการมองด้วยตาเปล่าและกำหนดจุดลงด้วยตา จึงเป็นเรื่องที่ใช้เวลามาก และส่งผลต่อประสิทธิภาพของผลลัพธ์โดยตรง ดังนั้นการวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ผลลัพธ์จากการวัดที่ออกมานั้น ไม่ผิดเพี้ยนจากความเป็นจริง หรือเกิดการผิดพลาดขึ้นในการวัดมากจนเกินไป ในที่นี้จะนำเสนอให้มีการวัด 2 รูปแบบได้แก่ การวัดแบบสามเหลี่ยม ซึ่งมีลักษณะการทำงานเป็นแบบอัตโนมัติ แต่มีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัววิธีการวัดสูงในบางกรณี (จะกล่าวในหัวข้อถัดไป) และการวัดด้วยการฉาย (Projection) จุดโฟกัสด้วยการพิจารณาลายนิ้วมือของบุคคลคนเดียวกัน ซึ่งเป็นการวัดที่มีลักษณะการทำงานด้วยมือ แต่วิธีการวัดดังกล่าวจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีการวัดก่อนหน้านี้ สำหรับรายละเอียดของวิธีการวัด มีดังต่อไปนี้

1. การประเมินความคลาดเคลื่อนแบบที่ 1: การวัดแบบสามเหลี่ยม (Triangle or 3-points Measurement) รูปแบบการวัดดังกล่าวนี้เป็นรูปแบบการวัดที่มีลักษณะการทำงานแบบอัตโนมัติ ซึ่งมีหลักการง่ายๆคือ ทำการกำหนดจุดใดๆบนภาพลายนิ้วมือจำนวน 3 จุด ในที่นี้จะกำหนดให้ R (จุดสีแดง), G (จุดสีเขียว) และ B (จุดสีน้ำเงิน) เป็นจุดสามจุดที่ทำกรกำหนดด้วยมือ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วมักจะเป็นจุดมินูเทียร์ หรืออาณาบริเวณที่มีลักษณะเด่น สังเกตเห็นได้ง่าย และหาพบทั้งชุดภาพลายนิ้วมือของบุคคลคนเดียวกัน จะพบว่ารูปแบบของการวัดจะถูกแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ กรณีที่จุดโฟกัสตกภายในสามเหลี่ยม และกรณีที่จุดโฟกัสตกอยู่นอกสามเหลี่ยม พิจารณาดังภาพที่ 33 และ 34 ตามลำดับ



ภาพที่ 33 วิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมในกรณีจุดโฟกัสตกอยู่ในอาณาบริเวณสามเหลี่ยม

ก) กรณีที่จุดโฟกัสตกอยู่ในสามเหลี่ยม พิจารณาภาพที่ 33(ก) จะพบว่าจุดโฟกัส (จุด F) ที่เกิดขึ้นบนภาพลายนิ้วมือตัวอย่าง จะตกอยู่ในสามเหลี่ยม RGB ที่ทำการกำหนดขึ้น เมื่อกำหนดให้ R เป็นมุมหลัก ทำการลากเส้นตรงจากจุด R ผ่านจุด F และไปตัดกับเส้นตรงเชื่อมระหว่างด้าน GB เข้าด้วยกัน กำหนดให้จุดตัดที่เกิดขึ้นเป็นจุด X ต่อมาทำการวัดความยาวที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างจุดต่างๆซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของเส้นตรงต่างๆได้แก่ \overline{RF} , \overline{FX} , \overline{GX} และ \overline{XB} เช่นเดียวกันในภาพลายนิ้วมือที่ต้องการเปรียบเทียบ จุดโฟกัสที่ต้องการเปรียบเทียบจะกำหนดให้เป็นจุด F' และกำหนดให้จุดที่ทำการกำหนดด้วยมือเป็นจุด R', G' และ B' พิจารณาดังภาพที่ 33(ข) ขั้นตอนต่อมาทำการฉาย (Projection) จุดโฟกัสจากภาพที่ทำการทดสอบ (ภาพ 33(ก)) ไปอยู่ในภาพที่ทำการเปรียบเทียบ (ภาพ 33(ข)) (สำหรับตัวอย่างรายละเอียดการคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้รูปแบบทำการฉายจากภาพเปรียบเทียบไปยังภาพที่ต้องการทดสอบแทน เนื่องจากผลลัพธ์มีค่าตรงกัน และ ให้อ่านวยให้ง่ายต่อการเขียนโปรแกรม) โดยพิจารณาสัดส่วนที่เกิดขึ้นของด้านที่เกิดจากการกำหนดจุด 3 จุดก่อน จะพบว่าสัดส่วนที่จะพิจารณาเป็นดังสมการ $\overline{X'B'} / \overline{X'G'} = \overline{XB} / \overline{XG}$ ผลจากการปรับสัดส่วนตามสมการดังกล่าว จะทำให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งของ X' ที่ตกอยู่บนส่วนของเส้นตรง $\overline{G'B'}$ ได้ กำหนดให้ P เป็นจุดโฟกัสที่เกิดจากการฉายจากภาพลายนิ้วมือที่ทำการทดสอบลงบนภาพลายนิ้วมือที่ต้องการเปรียบเทียบ ทำการคำนวณหาจุดดังกล่าวได้โดยพิจารณาสัดส่วนตามสมการ $\overline{P'X'} / \overline{R'P'} = \overline{FX} / \overline{RF}$ จากสมการนี้เองจะสามารถระบุตำแหน่งของจุด P' ได้ เมื่อได้ตำแหน่งของจุด P' แล้ว ทำการวัดความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง (Distance error, ε) ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\varepsilon = \sqrt{(x_p - x_{F'})^2 + (y_p - y_{F'})^2} \quad (17)$$

สมการที่ (17) ค่า ε เป็นตัวบ่งชี้ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่เกิดจากการฉายจุดโฟกัสข้ามระหว่างภาพลายนิ้วมือที่ต้องการทดสอบ ไปยังลายนิ้วมือที่ต้องการเปรียบเทียบ จากนั้นทำการฉายจุดจากมุมหลักที่เหลือซึ่งได้แก่ G และ B โดยขั้นตอนการหาค่าความคลาดเคลื่อนที่เหลือดังกล่าว จะทำในลักษณะเดียวกันแต่ทำการปรับเปลี่ยนจุดเริ่มต้นจากจุด R เป็นจุด G และ B เมื่อได้ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย และจึงนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้วิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการตรวจหาจุดโฟกัสของระบบต่อไป

ข) กรณีที่จุดโฟกัสตกอยู่นอกสามเหลี่ยม ลักษณะการทำงานจะคล้ายคลึงกับกรณีที่จุดโฟกัสตกอยู่ในสามเหลี่ยม แต่มีจุดที่แตกต่างกันคือ จะพิจารณาด้านเพียงด้านเดียว ซึ่งเป็นด้านที่สามารถลากเส้นจากมุมหลักมุมใดมุมหนึ่งผ่านจุดโฟกัสแล้วยังสามารถฉายภาพลงตามแนวเส้นตรงได้ พิจารณาตัวอย่างภาพที่ 34(ก) เมื่อทำการฉายจุดโฟกัสเรียบร้อยแล้ว ทำการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยตรง และนำค่าดังกล่าวมาใช้เป็นผลการทดลองได้ทันที



(ก)



(ข)

ภาพที่ 34 วิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมในกรณีที่จุดโฟกัสตกอยู่นอกอาณาบริเวณสามเหลี่ยม

จากที่กล่าวมาแล้วจะพบว่า การฉายในขั้นตอนวิธีการข้างต้นนี้ เป็นการฉายเชิงเส้น (Linear projection) ซึ่งมีข้อเสียที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนคือ ไม่สามารถทนทานต่อการผิดเพี้ยนยืดหยุ่น (Elastic

Distortion) ของภาพฉายนิ้วมือได้เนื่องมาจาก การบิดเพี้ยนยืดหยุ่นดังกล่าวมีลักษณะการกระจายตัวแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear distribution) หรืออาจกล่าวได้ว่ามีการบิดเพี้ยนแบบไม่สม่ำเสมอ (Un-uniform) นอกจากนั้นในกรณีที่จุดโฟกัสตกอยู่นอกสามเหลี่ยมนั้น พบว่าวิธีการดังกล่าวยังไม่แม่นยำเท่าที่ควร เนื่องจากการฉายจุดโฟกัสจะเกิดจากด้านเพียงด้านเดียวซึ่งไม่สามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนได้ดีเมื่อเทียบกับการฉายจุดที่มีด้านครบทั้ง 3 ด้าน โดยเฉพาะเมื่อด้านดังกล่าวนี้เกิดการบิดเพี้ยนยืดหยุ่นอย่างรุนแรง ด้วยสาเหตุดังกล่าวนี้ ผลจากการวัดความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการนี้ อาจทำให้ผลที่ได้นั้นมีค่าไม่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง หรืออาจกล่าวได้ว่าวิธีการวัดดังกล่าวไม่เหมาะสมในภาพฉายนิ้วมือที่มีการบิดเพี้ยนยืดหยุ่นสูง ด้วยเหตุนี้เองในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีการถัดไป ซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามหัวข้อการวัดถัดไป

2. การประเมินความคลาดเคลื่อนแบบที่ 2: การวัดด้วยการฉายจุดด้วยตา (Manually Projection Marking Measurement) วิธีการวัดในขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดจุดด้วยสายตาเป็นหลัก กล่าวคือนำจุดโฟกัสที่เกิดจากภาพฉายนิ้วมือที่ต้องการทดสอบ ฉายไปยังภาพที่ต้องการเปรียบเทียบด้วยตาโดยตรง (ข้ามขั้นตอนการฉายแบบเชิงเส้นที่ใช้ในวิธีการก่อนหน้านี้ เพื่อลดความผิดพลาดดังที่กล่าวมาแล้ว) จากนั้นทำการวัดความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งระหว่างจุดโฟกัสที่ฉาย กับจุดโฟกัสที่อยู่ในภาพที่เปรียบเทียบตามสมการที่ (17) วิธีการวัดดังกล่าวนี้พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องมือวัด จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักเพียงปัจจัยเดียว คือผู้ที่ทำการฉายจุดโฟกัสนั่นเอง ดังนั้นการวัดด้วยวิธีการดังกล่าวนี้จึงมีความเหมาะสมเพราะใกล้เคียงกับความเป็นจริง แต่ข้อเสียที่เห็นได้อย่างชัดเจนของวิธีการนี้คือ ใช้เวลาในการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการวัดนาน เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำงานของผู้ฉายจุดโฟกัสโดยตรง

จากที่กล่าวมาแล้วจะพบว่าวิธีการวัดทั้งสองมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังนั้นในแง่ของการทดลองซึ่งต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์บ่อยครั้ง ความเร็วในการยืนยันผลนับเป็นสิ่งสำคัญ วิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมจะเหมาะสมกว่าในแง่นี้ และเมื่อพัฒนาจุดโฟกัสให้ได้มีความแม่นยำที่ดีในระดับหนึ่งแล้ว การวัดโดยวิธีการฉายจุดด้วยตาจะถูกนำมาใช้ เนื่องจากผลการวัดจะมีความแม่นยำที่ดีกว่านั่นเอง สำหรับตัวอย่างการคำนวณจริงเกี่ยวกับการวัดโดยใช้วิธีสามเหลี่ยมทั้ง 2 เงื่อนไขที่ได้นำเสนอภาพรวมไว้แล้วในข้างต้น จะขออธิบายโดยละเอียดไว้ในภาคผนวก ก ของวิทยานิพนธ์นี้

ผลและวิจารณ์

ผล

พิจารณาขั้นตอนวิธีการหาจุดโฟกัสที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการทดลองการตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้ฐานข้อมูลลายนิ้วมือ FVC จำนวน 3 ฐานซึ่งได้แก่ FVC2000DB2a, FVC2002DB2a และ FVC20004DB1a ฐานข้อมูลแต่ละฐานที่ได้กล่าวมานี้มีรายละเอียดซึ่งสามารถพิจารณาได้ตามตารางที่ 3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3 รายละเอียดของฐานข้อมูล FVC ซึ่งใช้ในการทดสอบ

| รายละเอียดที่สำคัญ | ฐานข้อมูล | | |
|------------------------|---|---|--|
| | FVC2000DB2a | FVC2002DB2a | FVC20004DB1a |
| จำนวนภาพทั้งหมด | 800 | 800 | 800 |
| จำนวนลายนิ้วมือ | 100 | 100 | 100 |
| จำนวนภาพลายนิ้วมือ/คน | 8 | 8 | 8 |
| ชื่ออุปกรณ์ตรวจวัด | TouchChip | FX2000 | V300 |
| อุปกรณ์รับภาพ | Capacitive Sensor | Optical Sensor | Optical Sensor |
| บริษัทผู้ผลิต | ST Microelectronics | Biometrika | CrossMatch |
| ขนาดของภาพ (จุดสี) | 256×364 | 296×560 | 640×480 |
| ความละเอียดภาพ(dpi) | 500 | 569 | 500 |
| ลักษณะของภาพลายนิ้วมือ | ภาพค่อนข้างสมบูรณ์ พบปัญหาเนื่องนิ้วแห้งในบางลายนิ้วมือนั้น | ภาพชัดเจน แต่มีปัญหาเรื่องภาพลายนิ้วมือบางส่วนหายไป เนื่องมาจากการวางนิ้วนอกอุปกรณ์รับภาพ | คุณภาพลายนิ้วมือปานกลาง แต่มีการผิดเพี้ยนยืดหยุ่นสูงเนื่องมาจากอุปกรณ์รับภาพ |

ที่มา: Fingerprint Verification Competition (FVC2000, FVC2002, and FVC2004)

พิจารณาตารางที่ 3 พบว่าในการวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นในแต่ละภาพนั้น จะต้องพิจารณาร่วมกับจุดโฟกัสของภาพอื่นๆ ที่เป็นลายนิ้วมือเดียวกัน ดังนั้นในกรณีของแต่ละลายนิ้วมือมี 8 ภาพ ค่าทางสถิติที่เกิดจากการวัดผลต่างๆต้องทำการวิเคราะห์ร่วมกันกับอีก 7 ภาพที่เหลือด้วย ยกตัวอย่างเช่น ถ้าคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากภาพที่ 1 กับภาพที่ 2 ของลายนิ้วมือเดียวกันเรียบร้อยแล้ว ค่าดังกล่าวยังไม่สามารถสรุปทันทีได้ ต้องพิจารณาภาพที่ 1 กับภาพที่ 3 จนถึง 8 ร่วมกัน แล้วนำค่าดังกล่าวทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าดังกล่าวนี้เองคือผลลัพธ์ของการหาจุดโฟกัสของภาพที่ 1 ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์จริง เช่นเดียวกัน ภาพที่เหลือ (ได้แก่ ภาพที่ 2 ถึง 8) ทำการวัดกับภาพอื่นในลายนิ้วมือเดียวกันให้ครบจากนั้นจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ต่อไป (ยกเว้นภาพลายนิ้วมือภาพเดียวกันเอง) สาเหตุที่ต้องทำการวัดดังกล่าวมาแล้วก็เพื่อให้ผลลัพธ์มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด และไม่ให้เกิดการเอนเอียงไปในทางใดทางหนึ่งมากเกินไป เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมอีก จะพบว่าคุณลักษณะของแต่ละฐานข้อมูลมีรายละเอียดที่แตกต่างกันไปตามอุปกรณ์รับภาพ ซึ่งไม่สามารถนำภาพลายนิ้วมือจากฐานข้อมูลต่างๆมารวมกัน แล้ววัดประสิทธิภาพร่วมกันได้, พารามิเตอร์ต่างๆ รวมทั้งวิธีการย่อยในการหาจุดโฟกัสที่มีหลากหลายรูปแบบ และต้องปรับเปลี่ยนตามฐานข้อมูล อีกทั้งวิธีการวัดความคลาดเคลื่อนที่ได้เสนอในหัวข้อที่ผ่านมาแล้วมี 2 รูปแบบเช่นกัน จากสาเหตุดังกล่าวนี้เอง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการจำแนกผลการทดลองที่ได้จากการวัดความคลาดเคลื่อน และการประเมินประสิทธิภาพตามฐานข้อมูล ซึ่งผลการทดลองในแต่ละฐานข้อมูลจะประกอบไปด้วยผลการทดลองต่างๆดังนี้

1. ความคลาดเคลื่อน และค่าทางสถิติต่างๆของจุดโฟกัสจำแนกประเภทของลายนิ้วมือ โดยใช้วิธีการวัดแบบสามเหลี่ยม (พิจารณาได้ที่ภาคผนวก ค)
2. ความคลาดเคลื่อน และค่าทางสถิติต่างๆของจุดโฟกัสจำแนกประเภทของลายนิ้วมือ โดยใช้วิธีการฉายจุดด้วยตา (พิจารณาได้ที่ภาคผนวก ค)
3. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจุดโฟกัสโดยใช้รูปแบบวัดความคลาดเคลื่อนทั้ง 2 วิธี กับงานวิจัยการหาจุดอ้างอิงรูปแบบอื่นๆ
4. เวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนของการตรวจหาจุดโฟกัส

สำหรับรายละเอียดผลการทดลองทั้งหมดสามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

ผลการทดลองจากฐานข้อมูลลายนิ้วมือ FVC2000DB2a

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ทำการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับฐานข้อมูล FVC2000DB2a

| พารามิเตอร์ | ค่าที่ทำการทดสอบ | ค่าที่ดีที่สุด | หน่วย |
|---|-----------------------------------|----------------|---------------------|
| ขนาดบล็อกจตุรัส (N) | 8, 16, 32 | 16 | จุดภาพ(Pixel) |
| ค่าความแรงของสนามทิศทาง(ρ) | คงที่ | 0.3 | - |
| เกณฑ์คัดกรองตามสมการที่ (7) ($\phi_{Threshold}$) | $\pi/6, \pi/4,$ $\pi/3, \pi/2$ | $\pi/6$ | เรเดียน (Radian) |
| เกณฑ์คัดกรองตามสมการที่ (9) ($d_{Threshold}$) | 80, 96, 112, 192 | 160 | จุดภาพ(Pixel) |
| *จำนวนจุดเริ่มต้น(O) | 3 – 10 | 4 | จุด (Points) |
| รัศมีของแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม (R) | 3 – 10 | 6 | บล็อก |
| ขอบเขตการบิดเอียงของแบบจำลอง (ϕ) | 0, 22.5, 30, 45, 60, 90 | ± 45 | องศา (Degree) |
| **ระดับความละเอียดในการบิด (β) | 1, 5, 10, 22.5 | 5 | องศา (Degree) |
| เกณฑ์การกำหนดจุดสิ้นสุด ($\varepsilon_{Threshold}$) | - | 1 | จุดภาพ(Pixel) |

* ใน Areekeul *et al.* (2008) และ Boonchaiseree *et al.* (2009) กำหนดให้จำนวนจุดเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 3

** ขอบเขตการบิดเอียงใน Areekul *et al.* (2008) กำหนดให้ ϕ มีค่าเท่ากับ ± 0

พิจารณาตารางที่ 3 แสดงการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ทำการทดลองภายในวิทยานิพนธ์นี้ โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามรายละเอียดของช่วงที่ทดสอบตามตาราง และจากผลการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าว จะพบค่าที่ดีที่สุดของพารามิเตอร์ที่ทำให้ผลการตรวจหาจุดโฟกัสนั้นมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรวมต่ำที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามค่าที่ดีที่สุดตามตาราง โดยการขยับจุดเริ่มต้นที่ได้ทำการคัดเลือกไว้ก่อนหน้าให้สูงขึ้นไปอีก 6 บล็อก จากนั้นทำการปรับระดับความละเอียดในการบิดตัวของแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมให้ละเอียดเป็น 5 องศา และกำหนดวิธีการกำหนดจุดสิ้นสุดโดยพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งเมื่อมีค่าน้อยกว่า 1 จุดภาพ พบว่าจะให้ผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อนตามตารางที่ 4 และแสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจุดโฟกัสโดยใช้รูปแบบวัดความคลาดเคลื่อนทั้ง 2 วิธี กับงานวิจัยการหาจุดอ้างอิงรูปแบบอื่นๆในฐานข้อมูล FVC2000DB2a

| Algorithms | Distance Error (pixels) | | | | Accuracy (%) | | |
|--------------------------------------|-------------------------|----------|----------|------|--------------|------------|------------|
| | [0, 10] | (10, 20] | (20, 40] | > 40 | Fail | ≤ 10 pixel | ≤ 20 pixel |
| Proposed Alg. /Eval. 2 | 686 | 89 | 15 | 7 | 3 | 85.75 | 96.88 |
| Boonchaiseree <i>et al.</i> /Eval. 2 | 668 | 101 | 26 | 5 | - | 83.50 | 96.13 |
| Proposed Alg. /Eval. 1 | 661 | 112 | 17 | 7 | 3 | 82.63 | 96.63 |
| M. Liu <i>et al.</i> (2005) | 659 | 90 | 25 | 13 | 13 | 82.38 | 93.63 |
| T. Liu <i>et al.</i> (2006) | 654 | 91 | 46 | | 9 | 81.75 | 93.13 |
| Areekul (2008) /Eval. 2 | 610 | 124 | 44 | 21 | 1 | 76.25 | 91.75 |

| Algorithm | Distance Error (pixels) | | Accuracy (%) |
|--------------------------------------|-------------------------|------|--------------|
| | [0, 15) | > 15 | < 15 pixels |
| Proposed Alg. /Eval. 2 | 767 | 33 | 95.875 |
| Boonchaiseree <i>et al.</i> /Eval. 2 | 751 | 49 | 93.875 |
| K. Nilsson <i>et al.</i> /Eval. 2 | 749 | 51 | 93.625 |
| Proposed Alg. /Eval. 1 | 738 | 62 | 92.250 |
| Boonchaiseree <i>et al.</i> /Eval. 1 | 730 | 70 | 91.250 |

| Algorithm | Magnitude Standard Deviation (pixels) | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| | All FVC2000 Db2a Database | Arch-type Only (144 images in *) |
| Proposed Alg. /Eval. 2 | 7.016 (Means = 4.086) | 12.742 (Means = 12.146) |
| Boonchaiseree <i>et al.</i> /Eval. 2 | 7.301 (Means = 6.481) | 10.667 (Means = 11.885) |
| C.H. Park <i>et al.</i> (2005) | 6.385 | 10.690 |
| Proposed Alg. /Eval. 1 | 7.453 (Means = 8.075) | 9.968 (Means = 11.920) |
| Boonchaiseree <i>et al.</i> /Eval. 1 | 9.327 (Means = 10.532) | 14.614 (Means = 14.412) |

ตารางที่ 6 เวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนของการตรวจหาจุดโฟกัส และผลการเปรียบเทียบงานวิจัยโฟกัสก่อนหน้าในฐานข้อมูล FVC2000DB2a

| ขั้นตอนวิธี | เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนวิธี (มิลลิวินาที, ms) | | | |
|-----------------------------|--|------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| | Areekul <i>et al.</i> (2006) | Areekul <i>et al.</i> (2008) | Boonchaisere <i>e et al.</i> (2009) | วิธีการที่นำเสนอ |
| การคัดเลือกบริเวณลายนิ้วมือ | 26.98 | - | - | - |
| การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ | 548.82 | 13.10 | 13.10 | 13.10 |
| การตรวจหาจุดโฟกัส | 30.10 | 29.52 | 61.94 | 476.31 |
| เวลาเฉลี่ยรวม | 605.90 | 42.62 | 75.04 | 489.41 |

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

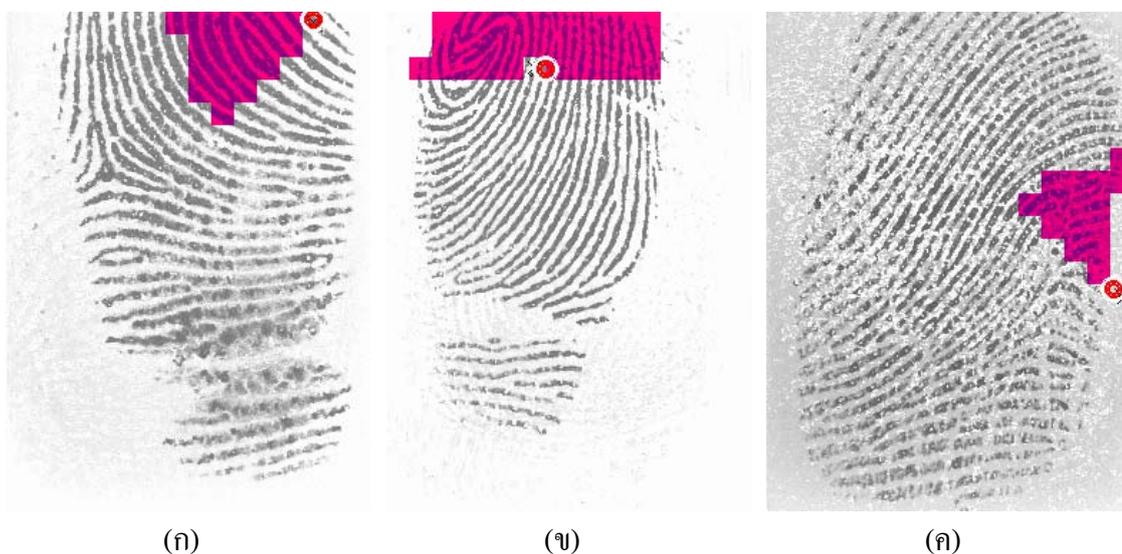
วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าจุดโฟกัสที่ตรวจวัดความคลาดเคลื่อนด้วยตา (Proposed Alg. /Eval. 2) มีความแม่นยำสูง โดยเฉพาะช่วงความคลาดเคลื่อนในช่วง 0-20 จุดสีนั้นมีปริมาณข้อมูลความแม่นยำ 96.88% และในแง่ของการตรวจวัดค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรวมของทุกลายนิ้วมือและเฉพาะภาพกระโจม และกระโจมสูงจำนวนทั้งสิ้น 144 ภาพในฐานข้อมูล FVC2000DB2a พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Park *et al.* (2005) และงานวิจัยอื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาภาพรวมของทุกประเภทลายนิ้วมือแล้วพบว่า ระบบโดยรวมมีความแม่นยำสูง และมีการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนที่ต่ำเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีภาพลายนิ้วมือที่ไม่สามารถตรวจพบจุดโฟกัสจำนวน 3 ภาพเนื่องมาจากผลลัพธ์ของการกำหนดจุดเริ่มต้นนั้น ตกอยู่ในอาณาบริเวณที่มีการกระจายตัวของจุดตัดสูง และข้อมูลสนามทิศทางไม่สมบูรณ์ จึงส่งผลให้จุดสิ้นสุดที่จะถูกกำหนดเป็นจุดโฟกัสนั้นเกิดการลู่ออก สำหรับประสิทธิภาพในแง่ของเวลาการทำงานนั้นยังใช้เวลาในการคำนวณสูงมาก เมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีอื่นเนื่องจากได้ทำการปรับเปลี่ยนให้แบบจำลองมีความละเอียดในการบิดตัวสูงมาก เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจพบจุดโฟกัส และนอกจากนี้ยังเพิ่มจำนวนจุดเริ่มต้นให้เป็น 4 เพื่อครอบคลุมจุดเริ่มต้นให้ได้มากที่สุด ดังนั้นในการพิจารณาจริงต้อง

ทำการเลือกปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมแก่ระบบให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติจริงต่อไป พิจารณาภาพตัวอย่างผลลัพธ์การตรวจหาจุดโฟกัสดังภาพที่ 35 และ 36



ภาพที่ 35 ตัวอย่างจุดโฟกัสที่ทำการตรวจหาในฐานข้อมูล FVC2000DB2a



ภาพที่ 36 ตัวอย่างภาพถ่ายนิ้วมือซึ่งแสดงตำแหน่งจุดโฟกัสที่มีผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งสูงในฐานข้อมูล FVC2000DB2a เนื่องจากข้อมูลภาพถ่ายนิ้วมือไม่สมบูรณ์

ผลการทดลองจากฐานข้อมูลลายนิ้วมือ FVC2002DB2a

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ที่ทำการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับฐานข้อมูล FVC2002DB2a

| พารามิเตอร์ | ช่วงที่ทำการทดสอบ | ค่าที่ดีที่สุด | หน่วย |
|---|------------------------------|----------------------|------------------|
| ขนาดบล็อกจตุรัส (N) | 8, 16 | 16 | จุดภาพ(Pixel) |
| ค่าความแรงของสนามทิศทาง(ρ) | คงที่ | 0.3 | - |
| เกณฑ์คัดกรองตามสมการที่ (7) ($\varphi_{Threshold}$) | $\pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2$ | $\pi/6$ | เรเดียน (Radian) |
| เกณฑ์คัดกรองตามสมการที่ (9) ($d_{Threshold}$) | 80, 160, 192 | 160 | จุดภาพ(Pixel) |
| จำนวนจุดเริ่มต้น(O) | 3 | 3 | จุด (Points) |
| รัศมีของแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม (R) | 4 – 10 | 6 | บล็อก |
| ขอบเขตการบิดเอียงของแบบจำลอง (ϕ) | 0, 22.5, 45 | ± 45 | องศา (Degree) |
| *ระดับความละเอียดในการบิด (β) | 5, 10, 22.5 | 22.5 | องศา (Degree) |
| เกณฑ์การกำหนดจุดสิ้นสุด ($\varepsilon_{Threshold}$) | - | $\text{Max}(\alpha)$ | จุดภาพ(Pixel) |

* ขอบเขตการบิดเอียงใน Areekul *et al.* (2008) กำหนดให้ ϕ มีค่าเท่ากับ ± 0

พิจารณาภาพลายนิ้วมือในฐานข้อมูล FVC2002DB2a ทั้ง 800 ภาพ พบว่ามีปัญหาเรื่องภาพลายนิ้วมือไม่สมบูรณ์ (แห้วง หรือขาดหายไป) ประมาณ 20–30 ภาพ ซึ่งภาพดังกล่าวนี้มีข้อมูลลายนิ้วมือที่เป็นส่วนโค้งด้านบนน้อยมาก การหาจุดเริ่มต้นโดยตรวจสอบจากปริมาณจุดตัดที่เกิดจากส่วนโค้งด้านบนนั้นจึงทำได้ยาก และอาจมีความคลาดเคลื่อนสูงได้ ดังนั้นในกระบวนการตรวจสอบหาจุดเริ่มต้นในฐานข้อมูลนี้ จะทำการขยับจุดปล่อยซึ่งเกิดจากจุดตัดตามวิธีหลัก ให้สูงขึ้นไป K บล็อก (ในผลการทดลองนี้จะกำหนดให้ $K = 6$ บล็อกพบว่าให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด) เพื่อให้การลู่อเข้าของแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมมีโอกาสพาดผ่านอาณาบริเวณที่มีความโค้งด้านบนได้ นอกจากนี้ในฐานข้อมูลนี้พบว่าภาพลายนิ้วมือจำนวนหนึ่งมีความผิดเพี้ยนแบบยืดหยุ่น ซึ่งส่งผลทำให้วิธีการหาจุดสิ้นสุดปรับเปลี่ยนวิธีการตรวจหาจากการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของจุดเป็นการตรวจสอบค่าที่มากที่สุดของ α ($\text{Max}(\alpha)$) แทนเพื่อกันการลู่ออกในภาพที่มีข้อมูลสนามทิศทางที่มีปัญหา

ตารางที่ 8 เวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนของการตรวจหาจุดโฟกัส และผลการเปรียบเทียบงานวิจัยโฟกัสก่อนหน้าในฐานข้อมูล FVC2002DB2a

| ขั้นตอนวิธี | เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนวิธี (มิลลิวินาที, ms) | |
|-----------------------------|--|--|
| | วิธีการที่นำเสนอ | |
| การคัดเลือกบริเวณลายนิ้วมือ | - | |
| การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ | 23.45 | |
| การตรวจหาจุดโฟกัส | 70.86 | |
| เวลาเฉลี่ยรวม | 94.31 | |

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

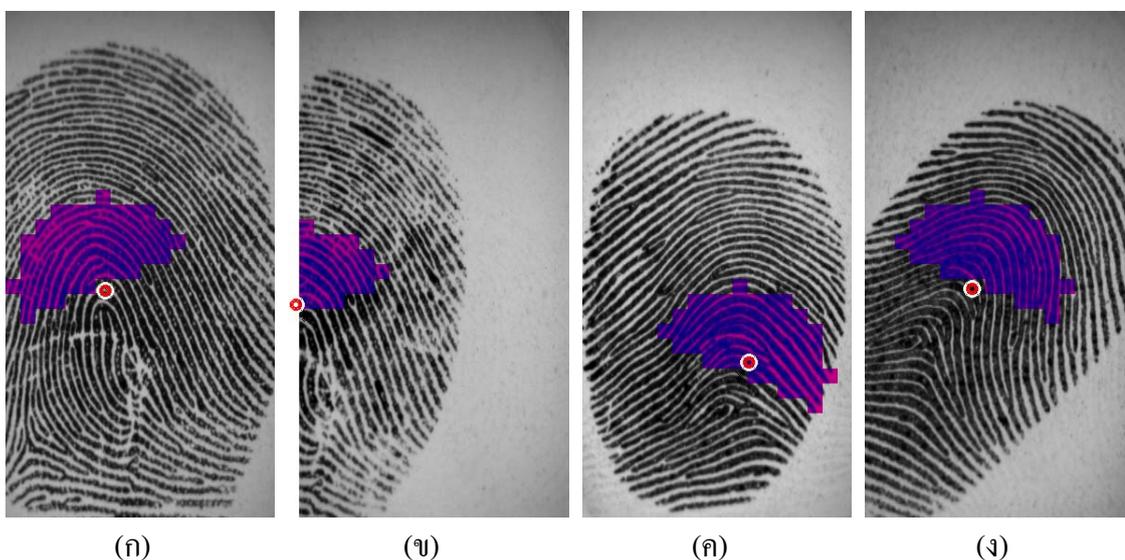
ตารางที่ 9 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจุดโฟกัส โดยใช้รูปแบบวัดความคลาดเคลื่อนทั้ง 2 วิธี กับงานวิจัยการหาจุดอ้างอิงรูปแบบอื่นๆ ในฐานข้อมูล FVC2002DB2a

| Algorithms | Distance Error (pixels) | | | | | Accuracy (%) | |
|-----------------------|-------------------------|----------|----------|------|------|--------------|------------|
| | [0, 10] | (10, 20] | (20, 40] | > 40 | Fail | ≤ 10 pixel | ≤ 20 pixel |
| Proposed Alg./Eval. 2 | 569 | 138 | 78 | 11 | 4 | 71.48 | 88.82 |
| Proposed Alg./Eval.1 | 435 | 282 | 56 | 23 | 4 | 54.65 | 90.08 |

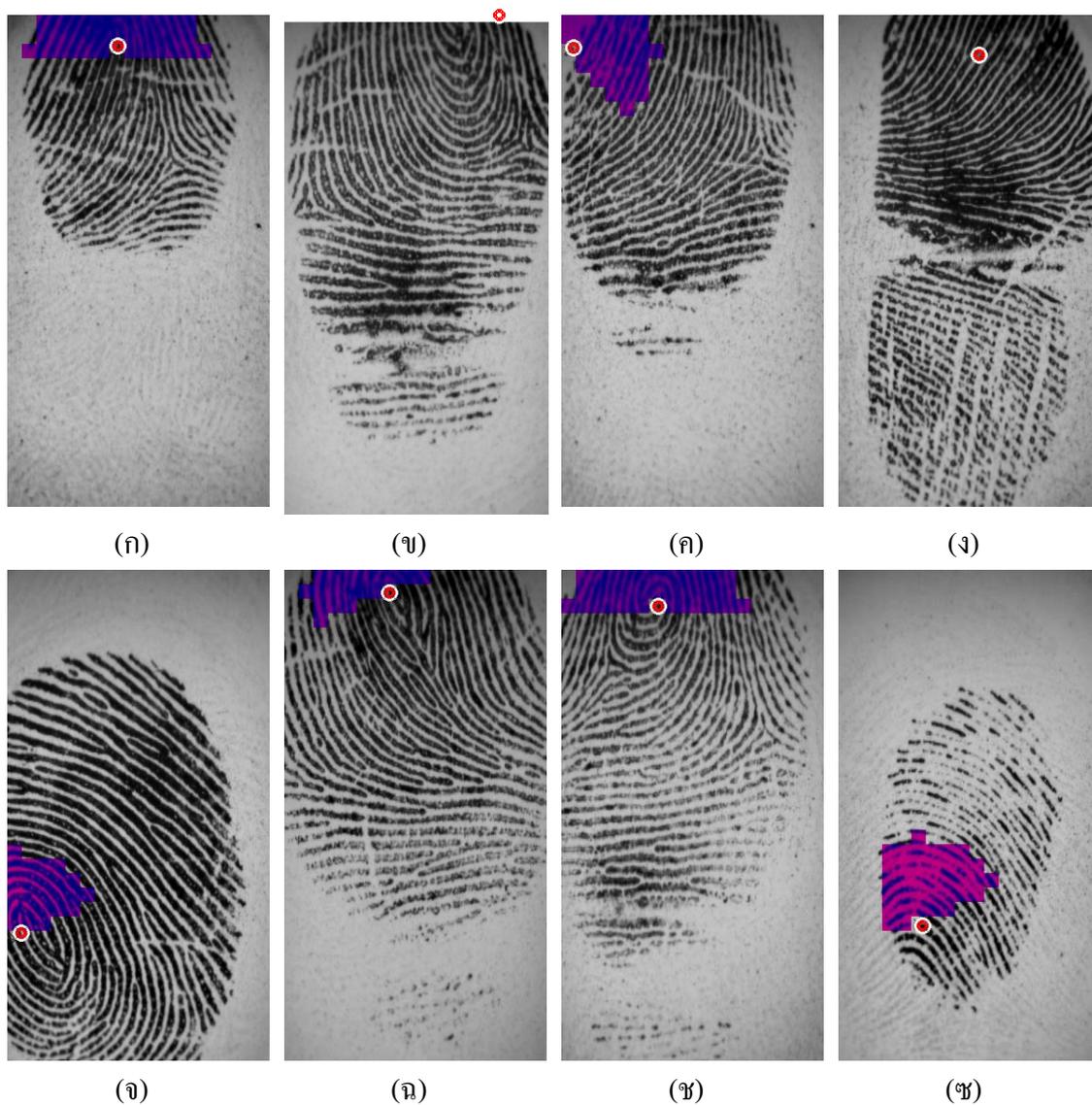
| Algorithm | Magnitude Standard Deviation (pixels) | |
|--------------------------------|---------------------------------------|--|
| | All FVC2000 Db2a Database | |
| Proposed Alg. /Eval. 2 | 11.35 (Means = 15.28) | |
| C.H. Park <i>et.al.</i> (2005) | 6.05 | |
| Proposed Alg. /Eval. 1 | 35.45 (Means = 9.44) | |

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าความคลาดเคลื่อนโดยรวมของฐานข้อมูล FVC2002DB2a นั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เนื่องจากภาพลายนิ้วมือมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ มีคุณภาพของเส้นลายนิ้วมือชัดเจน จุดโฟกัสที่ตรวจพบนั้นจึงมีความแม่นยำในระดับที่ดี อย่างไรก็ตามพบว่ามีการถ่ายภาพลายนิ้วมืออยู่จำนวนหนึ่งซึ่งประสบปัญหาเรื่องการขาด หรือการแห้วหายไประยะของลายนิ้วมือ (ประมาณ 40 ภาพ) ซึ่งลักษณะปัญหาดังกล่าวทำให้ไม่สามารถตรวจหาจุดโฟกัสพบ หรือผลการตรวจหาจุดโฟกัสมีความคลาดเคลื่อนสูงมาก นอกจากนี้เนื่องจากที่กล่าวมาแล้วว่าภาพลายนิ้วมือมีความผิดเพี้ยนยืดหยุ่น ซึ่งดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดว่าวิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมในช่วง $[0, 10]$ จุดภาพนั้นให้ผลลัพธ์ที่ไม่ค่อยดีนักเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการฉายจุดด้วยตา แต่เมื่อพิจารณาในช่วง $(10, 20]$ จุดสีจะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับงานวิจัยของ C.H. Park *et al.* (2005) พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าการกระจายตัวสูงกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่าจุดโฟกัสในฐานข้อมูลนี้ ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการดังกล่าว และสำหรับเรื่องระยะเวลาในการประมวลผลนั้นพบว่าใช้เวลาไม่สูงมากนัก (แตกต่างกับ FVC2000DB2a เพียงเล็กน้อยเนื่องจากขนาดภาพที่ใหญ่กว่า ทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลเบื้องต้นนานกว่า)



ภาพที่ 37 ตัวอย่างจุดโฟกัสที่ทำการตรวจหาในฐานข้อมูล FVC2002DB2a พิจารณาภาพด้านบน (ก) และ (ข) ผลลัพธ์การตรวจหาจุดโฟกัสเมื่อข้อมูลของภาพลายนิ้วมือไม่สมบรูณ์ และภาพด้านล่าง (ค) และ (ง) ผลลัพธ์การตรวจหาจุดโฟกัสเมื่อข้อมูลมีความผิดเพี้ยนยืดหยุ่น



ภาพที่ 38 ตัวอย่างจุดโฟกัสที่มีผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งสูงในฐานข้อมูล FVC2002DB2a เมื่อข้อมูลของภาพลายนิ้วมือไม่สมบูรณ์

พิจารณาภาพที่ 38 จะพบว่าจุดจุดโฟกัสที่ตรวจพบนั้นพยายามเคลื่อนตัวเข้าสู่อาณาบริเวณที่มีลักษณะความโค้งตามแบบจำลองเส้นสักริ่งวงกลมให้มากที่สุด แต่ข้อมูลลายนิ้วมือนั้นมีน้อยมาก การกำหนดจุดตัดที่เกิดขึ้นจากสนามทิศทางในข้อมูลที่เหลืออยู่จึงมีไม่เพียงพอ ทำให้จุดโฟกัสที่ทำการตรวจพบมีความคลาดเคลื่อนสูง

ผลการทดลองจากฐานข้อมูลลายนิ้วมือ FVC2004DB1a

ผลการทดลองในฐานข้อมูลนี้มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ พิจารณาดังตารางที่ 9

ตารางที่ 10 พารามิเตอร์ที่ทำการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับฐานข้อมูล FVC2004DB1a

| พารามิเตอร์ | ช่วงที่ทำการทดสอบ | ค่าที่ดีที่สุด | หน่วย |
|--|-----------------------------------|-----------------|---------------------|
| ขนาดบล็อกจตุรัส (N) | 8, 16 | 16 | จุดภาพ(Pixel) |
| ค่าความแรงของสนามทิศทาง(ρ) | คงที่ | 0.3 | - |
| เกณฑ์คัดกรองตามสมการที่ (7) ($\phi_{Threshold}$) | $\pi/6, \pi/4, \pi/3,$ $\pi/2$ | $\pi/6$ | เรเดียน (Radian) |
| เกณฑ์คัดกรองตามสมการที่ (9) ($d_{Threshold}$) | 80, 160, 192 | 160 | จุดภาพ(Pixel) |
| จำนวนจุดเริ่มต้น(O) | 3 | 3 | จุด (Points) |
| รัศมีของแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม (R) | 4 – 10 | 6 | บล็อก |
| ขอบเขตการบิดเอียงของแบบจำลอง (ϕ) | [0, 22.5, 45, 90] | ± 45 | องศา (Degree) |
| *ระดับความละเอียดในการบิด (β) | 5, 10, 22.5 | 22.5 | องศา (Degree) |
| เกณฑ์การกำหนดจุดสิ้นสุด ($\epsilon_{Threshold}$) | - | Max(α) | จุดภาพ(Pixel) |

พิจารณาดังตารางที่ 9 จะพบว่า เกณฑ์เงื่อนไขต่างๆที่ทำการกำหนดขึ้นนั้นมีลักษณะเดียวกับเกณฑ์ที่ใช้กับฐานข้อมูล FVC2002DB2a เนื่องมาจากลักษณะของภาพลายนิ้วมือที่ทดสอบนั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือภาพลายนิ้วมือได้มาจากอุปกรณ์ตรวจวัดแบบใช้แสง ลักษณะภาพเป็นภาพลายนิ้วมือที่คุณภาพต่ำมาก เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของลายนิ้วมือ, ความเปียก หรือแห้งเกินไป และความผิดเพี้ยนยืดหยุ่นอย่างรุนแรง ส่งผลกระทบโดยตรงต่อจำนวนข้อมูลสนามทิศทางที่ผ่านเกณฑ์ และนำมาใช้ปฏิบัติจริงเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้เองขอบเขตของการบิดเอียงของแบบจำลองต้องกว้าง เพื่อให้ครอบคลุมข้อมูลลายนิ้วมือให้ได้มากที่สุด และกำหนดตำแหน่งของจุดสิ้นสุดโดยทำการปล่อยแบบจำลองให้มีการเคลื่อนตัวอย่างอิสระ (ไม่คำนึงถึงการลู่ออก) และพิจารณาค่าตำแหน่งที่ α ให้ค่าสูงที่สุด สำหรับรายละเอียดผลการทดลองต่างๆ พิจารณาดังตาราง และภาพตัวอย่างต่อไป

ตารางที่ 11 เวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละขั้นตอนของการตรวจหาจุดโฟกัส และผลการเปรียบเทียบงานวิจัยโฟกัสก่อนหน้าในฐานข้อมูล FVC2004DB1a

| ขั้นตอนวิธี | เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนวิธี (มิลลิวินาที, ms) |
|-----------------------------|--|
| | วิธีการที่นำเสนอ |
| การคัดเลือกบริเวณลายนิ้วมือ | - |
| การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ | 34.96 |
| การตรวจหาจุดโฟกัส | 70.21 |
| เวลาเฉลี่ยรวม | 105.17 |

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

ตารางที่ 12 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจุดโฟกัสโดยใช้รูปแบบวัดความคลาดเคลื่อนทั้ง 2 วิธี กับงานวิจัยการหาจุดอ้างอิงรูปแบบอื่นๆในฐานข้อมูล FVC2004DB1a

| Algorithms | Distance Error (pixels) | | | | | Accuracy (%) | |
|-----------------------|-------------------------|----------|----------|------|------|--------------|------------|
| | [0, 10] | (10, 20] | (20, 40] | > 40 | Fail | ≤ 10 pixel | ≤ 20 pixel |
| Proposed Alg./Eval. 2 | 507 | 212 | 71 | 10 | 0 | 63.375 | 89.875 |
| Proposed Alg./Eval. 1 | 278 | 350 | 143 | 29 | 0 | 34.750 | 78.500 |

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสในฐานข้อมูล FVC2004DB1a นั้นมีประสิทธิภาพโดยรวมพอใช้ได้ ภาพลายนิ้วมือโดยส่วนมากมีความคลาดเคลื่อนกระจายอยู่ในช่วง (10, 20] จุดสีเป็นส่วนใหญ่ แต่ถ้าเทียบกับผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากฐานข้อมูล FVC2000DB2a อาจยังไม่ดีเท่าที่ควร พิจารณาภาพลายนิ้วมือโดยรวมในฐานข้อมูลจะพบว่า ภาพลายนิ้วมือมีลักษณะเว้า หรือแหงอย่างรุนแรง (ประมาณ 30 ภาพ) ซึ่งทำให้ไม่สามารถตรวจหาจุดโฟกัสได้ อีกทั้งความผิดเพี้ยนยี่หุบของลายนิ้วมือเองนั้นถูกพบในหลายๆภาพ (มากกว่า 100 ภาพ) ซึ่งความผิดเพี้ยนดังกล่าวก็ส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงในรูปแบบการวัดความคลาดเคลื่อน

โดยเฉพาะวิธีการวัดแบบสามเหลี่ยม ถ้าจุดโฟกัสที่ทำการประเมินนั้นอยู่นอกอาณาบริเวณสามเหลี่ยมแล้ว จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดนั้นมีค่าสูงมาก ดังนั้นการพิจารณาความคลาดเคลื่อนในที่นี้ควรจะพิจารณาผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อนจากวิธีการฉายจุดด้วยตาเป็นวิธีหลัก ซึ่งพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีสามารถนำไปใช้ในงานปฏิบัติจริงได้



ภาพที่ 39 ตัวอย่างจุดโฟกัสที่ทำการตรวจหาในฐานข้อมูล FVC2004DB1a



ภาพที่ 40 ตัวอย่างจุดโฟกัสที่มีผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งสูงในฐานข้อมูล FVC2004DB1a

วิจารณ์

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่แล้วพบว่าการตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม ซึ่งได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ มีประสิทธิภาพที่ดีในเรื่องของความแม่นยำ, ความรวดเร็วในการทำงาน และความสามารถในการตรวจหาจุดโฟกัสในอาณาบริเวณที่ไม่มีลายนิ้วมืออยู่ หรือนอกภาพลายนิ้วมือได้ เมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยเฉพาะภาพลายนิ้วมือจากฐานข้อมูล FVC2000DB2a พิจารณาตามตารางที่ 5 จะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในการหาจุดอ้างอิงอื่นๆแล้ว ความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสนั้นมีค่าที่ต่ำ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากภาพลายนิ้วมือฐานข้อมูลดังกล่าว เป็นภาพที่มีคุณภาพดี ไม่มีปัญหาเรื่องการบิดเพี้ยนยืดหยุ่นของเส้นลายนิ้วมือ หรือปัญหาเรื่องการเว้นแหว่งของภาพลายนิ้วมือเท่าใดนัก และเมื่อพิจารณาต่อมาในฐานข้อมูล FVC2002DB2a จะพบว่าความแม่นยำนั้นมีค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับฐานข้อมูล FVC2000DB2a และเมื่อพิจารณาฐานข้อมูล FVC2004DB1a จะพบว่าความแม่นยำนั้นมีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับฐานข้อมูลดังกล่าว แต่โดยภาพรวมแล้วจุดโฟกัสที่นำเสนอนี้ ก็สามารถนำไปใช้งานในทางปฏิบัติจริงได้ดีในระดับหนึ่ง

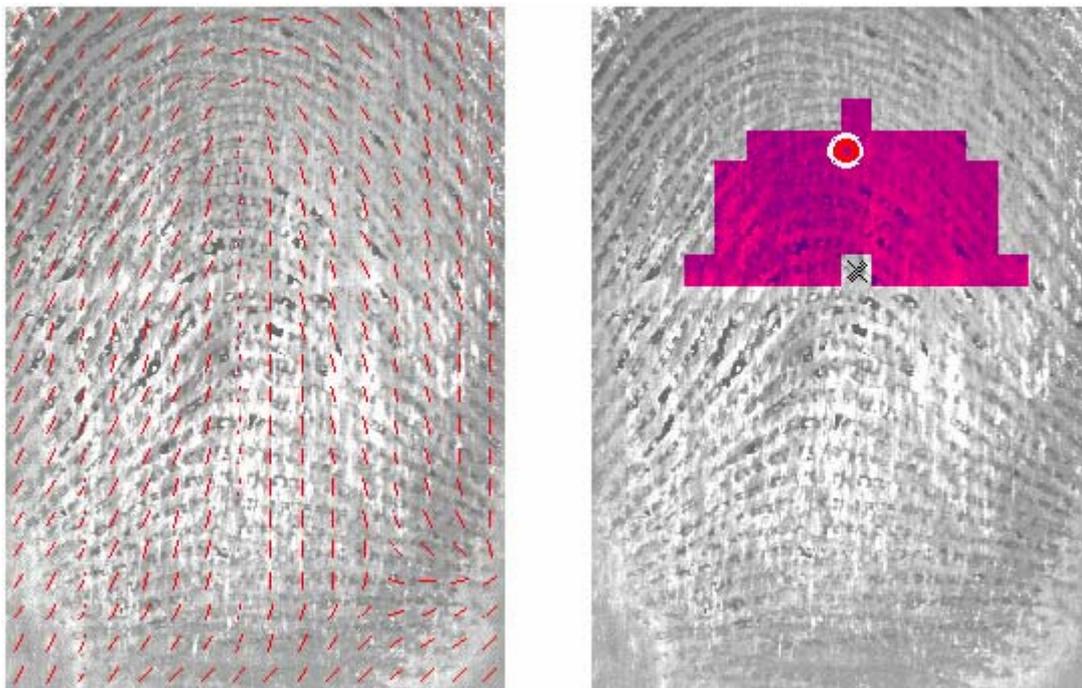
อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณา ปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้ 2 หัวข้อใหญ่ได้แก่ ปัญหาที่เกิดจากคุณภาพของภาพลายนิ้วมือ และปัญหาที่เกิดจากรูปแบบขั้นตอนวิธีการตรวจหาจุดโฟกัส พิจารณารายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ปัญหาที่เกิดจากคุณภาพของลายนิ้วมือ นับว่าเป็นปัญหาหลักของการประมวลผลภาพ และเป็นปัญหาที่มีผลกระทบต่อระบบรู้จำลายนิ้วมืออย่างมาก เนื่องจากในกรณีที่ถ้าภาพลายนิ้วมือมีคุณภาพต่ำมาก อาจทำให้ระบบปฏิเสธการทำงานในกระบวนการต่างๆทั้งหมด หรือถ้านำเข้ามาในระบบ อาจทำให้ระบบเกิดความผิดพลาดได้ เช่นเดียวกัน ในแง่ของการหาจุดอ้างอิง ภาพลายนิ้วมือที่มีคุณภาพต่ำ มักจะทำให้ไม่สามารถหาจุดอ้างอิงได้ หรือถ้าหาได้ก็ไม่แม่นยำเท่าที่ควร สำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับคุณภาพของลายนิ้วมือ สามารถแบ่งเป็นหัวข้อย่อยต่างๆ ดังนี้

1.1 สนามทิศทางมีความผิดพลาดสูง

ปัญหาเรื่องความผิดพลาดของสนามทิศทางมักจะเกิดจากการที่เส้นลายนิ้วมือ ณ อาณาบริเวณต่างๆที่ได้ทำการคำนวณนั้น มีคุณภาพต่ำ ตัวอย่างเช่น นิ้วมือนิ้วมีลักษณะเป็ยก หรือแห้งมากจนเกินไป และรอยแตก หรือรอยแยกของลายนิ้วมือเป็นต้น เมื่อสนามทิศทางมีความผิดพลาด

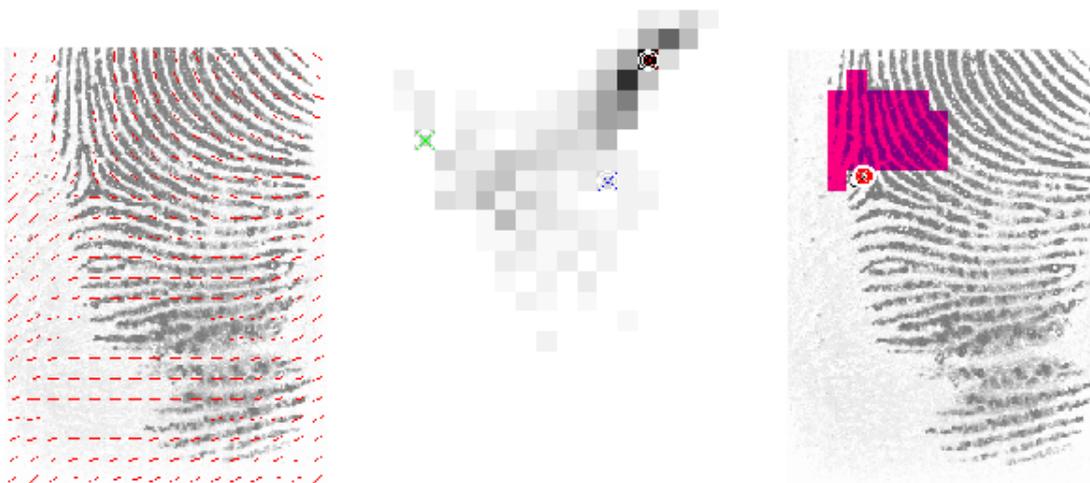
สูงมากจะส่งผลกระทบต่อลักษณะการหาจุดโฟกัสโดยตรง เพราะพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการสร้างจุดตัดต่างๆในการตรวจหาจุดโฟกัสคือสนามทิศทางที่มีความไม่ถูกต้องนั่นเอง พิจารณาตัวอย่างดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ตัวอย่างสนามทิศทาง และจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นในภาพลายนิ้วมือคุณภาพต่ำ

1.2 ข้อมูลภาพลายนิ้วมือไม่สมบูรณ์เพียงพอ

โดยทั่วไปแล้วลักษณะปัญหาดังกล่าวมักเกิดจากการที่ผู้ใช้งานมีทักษะ และความชำนาญในการใช้งานน้อย ทำให้การวางนิ้วลงบนตัวอุปกรณ์รับภาพไม่เหมาะสม ภาพลายนิ้วมือที่ได้จึงมีลักษณะขาดหายไป ถ้าพิจารณาตามทฤษฎีการตรวจหาจุดโฟกัสจะพบว่า จุดโฟกัสที่เสถียรภาพดี และมีความน่าเชื่อถือขึ้น เกิดจากปริมาณข้อมูลของเส้นลายนิ้วมือที่เข้ามาว่ามากหรือน้อยเพียงใด ดังนั้นถ้าภาพลายนิ้วมือที่เข้ามามีน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าภาพลายนิ้วมือที่เป็นส่วนโค้งด้านบนนั้นขาด หรือหายไปแล้ว จะพบว่า การตรวจหาจุดโฟกัสนั้น อาจตรวจไม่พบ หรือถ้าตรวจพบได้ ความแม่นยำและความน่าเชื่อถือก็ย่อมมีค่าต่ำ และไม่สามารถนำไปใช้งานในกระบวนการอื่นๆได้ พิจารณาตัวอย่างดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ตัวอย่างผลการตรวจหาจุดโฟกัสที่เกิดขึ้น เมื่อภาพลายนิ้วมือที่ไม่สมบูรณ์

1.3 ความผิดเพี้ยนยืดหยุ่นของลายนิ้วมือ

ลักษณะปัญหาดังกล่าวเกิดจากปัญหาทางกายภาพของลายนิ้วมือ กล่าวคือ ลายนิ้วมือเมื่อมีการกระทบ หรือกดลงบนหน้าสัมผัสจะเกิดความยืดหยุ่นของผิวหนัง ณ บริเวณนั้น ทำให้หน้าภาพลายนิ้วมือที่ได้จากอุปกรณ์รับภาพมีการบิดเบี้ยวไปจากเดิม ปัญหาดังกล่าวนี้จะส่งผลกระทบต่อตรงกันสามทิศทางเนื่องจาก ความผิดเพี้ยนยืดหยุ่นนี้ทำให้ทิศทางซึ่งเป็นตัวสร้างจุดตัดเพื่อทำให้เกิดจุดโฟกัสนั้นเปลี่ยนแปลงไป จุดโฟกัสที่ตรวจหามาได้จึงมีความคลาดเคลื่อนสูงตามไปด้วย พิจารณาตัวอย่างดังภาพที่ 43

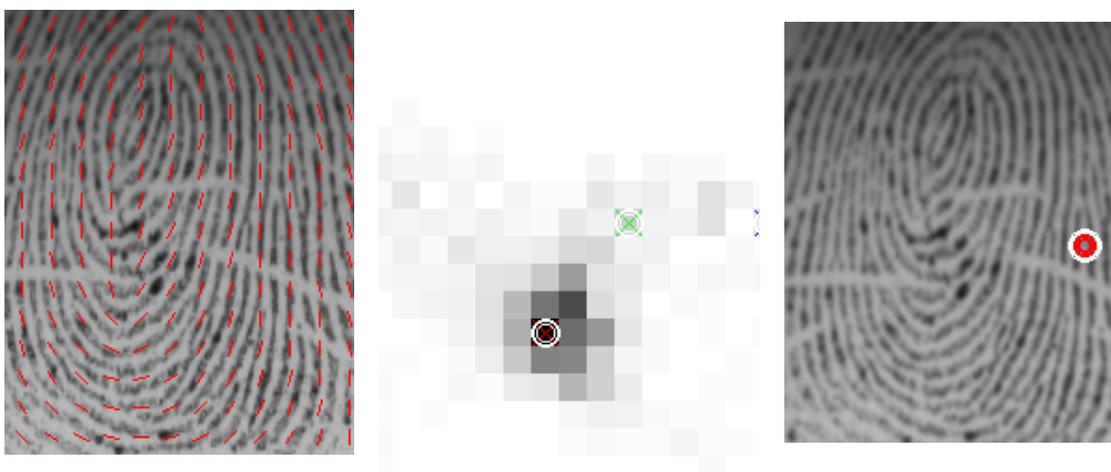


ภาพที่ 43 จุดโฟกัสที่เกิดขึ้นในนิ้วเดียวกันเมื่อภาพลายนิ้วมือมีความผิดเพี้ยนยืดหยุ่นแตกต่างกัน

2. ปัญหาที่เกิดจากรูปแบบขั้นตอนวิธีการตรวจหาจุดโฟกัส สามารถแบ่งเป็นหัวข้อย่อยซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การกำหนดจุดเริ่มต้นที่ผิดพลาด

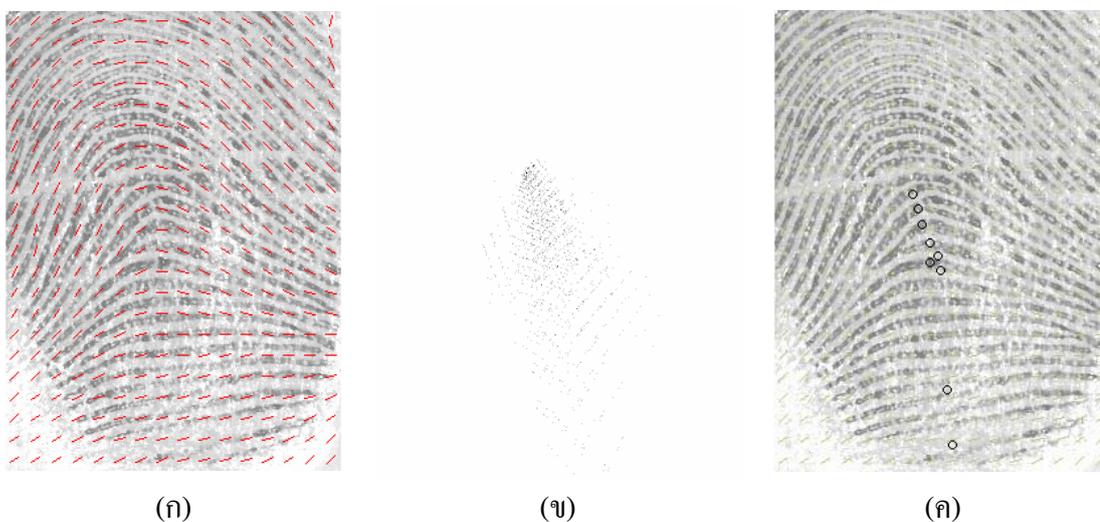
การกำหนดจุดเริ่มต้นของการตรวจหาจุดโฟกัส ตามที่ได้กล่าวไว้ในขั้นตอนวิธีที่ผ่านมาแล้ว จะใช้จุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัดที่เกิดจากการตัดกันของเส้นตั้งฉากสนามทิศทางทั่วทั้งภาพ ดังนั้นถ้าข้อมูลที่เป็นส่วนที่เป็นความโค้งด้านบนมีค่าน้อย ย่อมหมายถึงจุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัดที่เกิดขึ้นนั้น ไม่เหมาะสมที่จะกำหนดเป็นอาณาบริเวณที่สามารถตรวจพบจุดโฟกัสได้ จากที่กล่าวมาแล้วถ้าทำการปล่อยให้ทำตามขั้นตอนวิธีไปเรื่อยๆ จุดสิ้นสุดที่ตรวจพบย่อมมีโอกาสน้อยมากที่จะเป็นจุดโฟกัส นอกจากนี้ยังมีปัญหาที่น่าสนใจเพิ่มเติมคือ ถ้าพิจารณาภาพลายนิ้วมือประเภทกระโจม หรือกระโจมสูงจะพบว่า เส้นลายนิ้วมือนั้นมีลักษณะเป็นเส้นขนานกันในปริมาณมาก ลักษณะการกระจายของจุดตัดจะไม่กระจุกตัวอยู่ที่ใดที่หนึ่งอย่างชัดเจน ดังนั้นถ้าการกระจายของจุดตัดเหล่านั้นมาหาค่าจุดกึ่งกลางเฉลี่ย จุดที่เกิดขึ้นนี้อาจไม่เหมาะสมต่อการนำมากำหนดเป็นจุดเริ่มต้นเช่นกัน พิจารณาตัวอย่างดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 ตัวอย่างการกระจายของจุดตัด ผลกระทบที่เกิดขึ้นในการกำหนดจุดเริ่มต้น และจุดโฟกัส

2.2 ผลกระทบจากการกำหนดจุดตัดไปจากจุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 2.1 เกี่ยวกับการคำนวณหาจุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัด จะเห็นว่าปัญหาหลักคือถ้าส่วนโค้งในภาพลายนิ้วมือมีน้อย หรือไม่มีเลยจุดตัดที่เกิดขึ้นจะมีการกระจายทั่วภาพลายนิ้วมือ พิจารณาลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ถ้าอาณาบริเวณใดๆที่สนใจภายในแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมมีสนามทิศทางที่มีลักษณะเป็นเส้นขนาน หรือมีทิศที่สับสนแล้ว จุดตัดที่เกิดจากการคำนวณโดยวิธีการหาจุดกึ่งกลางเฉลี่ยอาจไม่เหมาะสม พิจารณาดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ตัวอย่างการกระจายของจุดตัดในกรณีที่อาณาบริเวณสนามทิศทางสับสน หรือเป็นเส้นขนาน (ก) สนามทิศทางที่มีลักษณะทิศทางที่ค่อนข้างขนานกัน, (ข) การกระจายของจุดตัดซึ่งมีการกระจายสูงมาก และ (ค) วงกลมสีดำแสดงความคลาดเคลื่อนของจุดกึ่งกลางเฉลี่ย ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายสูง ไม่ลู่เข้าไปสู่จุดเดียวกัน

2.3 แบบจำลองที่ใช้ไม่ยืดหยุ่นเพียงพอ

เมื่อพิจารณาค่าปัจจัยแสดงความคล้ายคลึงกับเลนส์ครึ่งวงกลม (α) ตามสมการที่ (10) จะพบว่าสมการดังกล่าวนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ได้แก่ส่วนที่เป็นการบ่งชี้สัดส่วนจำนวนการใช้งานของบล็อกในแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมเทียบกับพื้นที่ในหน่วยเดียวกันของแบบจำลองที่มีขนาดเต็มแบบจำลอง ค่าดังกล่าวมีไว้เพื่อใช้ในการเพิ่มความน่าเชื่อถือ จากปริมาณการใช้ข้อมูล (เพราะในกรณีที่ข้อมูลมีการเปรียบเทียบน้อยแต่มีความถูกต้องสูง อาจทำให้ค่า α ที่

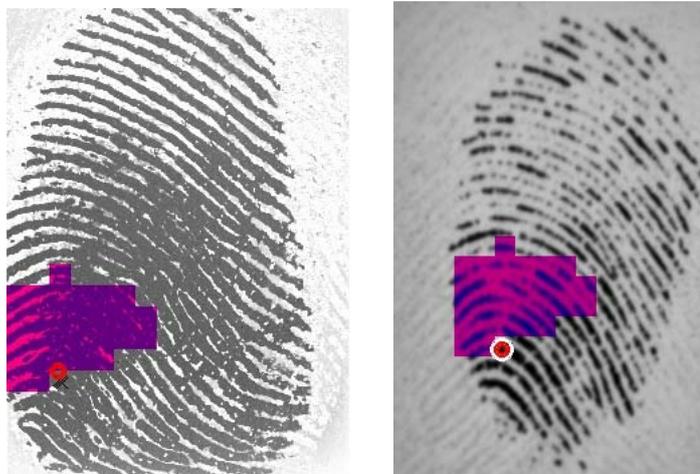
เกิดจากสมการดังกล่าวไม่เหมาะสมในการนำมาใช้งาน) กำหนดให้ η เป็นค่าแสดงสัดส่วนดังกล่าว ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\eta = \frac{N}{M} \quad (15)$$

และส่วนที่ใช้ในการบ่งชี้ความคล้ายคลึงเฉลี่ยสะสมของสนามทิศทางภายในแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม ซึ่งกำหนดให้ λ เป็นค่าดังกล่าว พิจารณาตามสมการดังนี้

$$\lambda = 1 - \sum_{(i,j) \in CL} \frac{|\theta_{fh}(i,j) - \theta_{cl}(i,j)|}{N\pi/2} \quad (16)$$

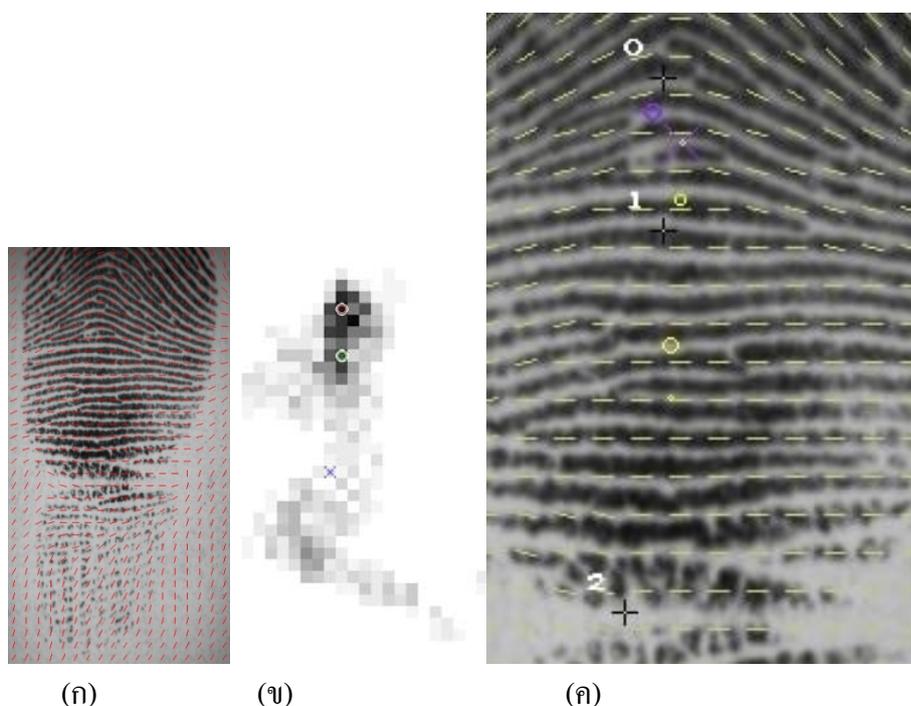
พิจารณาสมการที่ (15) และ (16) เมื่อข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบมีปริมาณน้อย จะพบว่าค่า η ที่ได้มีค่าต่ำมากถึงแม้ว่าค่า λ มีค่ามากเพียงใด ด้วยเหตุนี้เองจะพบว่าในกรณีที่เป็นแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมตกอยู่ในอาณาบริเวณที่มีข้อมูลสนามทิศทางน้อย แต่มีทิศทางที่ถูกต้อง ค่า α ที่ได้จะมีค่าต่ำมากเนื่องจากถูกลดทอนโดยค่า η นั้นเอง พิจารณาอีกกรณีหนึ่งคือในกรณีที่ η มีค่ามากแต่ α มีค่าน้อย ตัวอย่างเช่น อาณาบริเวณแบบจำลองตกอยู่ในลายนิ้วมือที่มีสนามทิศทางที่เป็นเส้นขนาน และมีบล็อกที่ใช้ในการคำนวณปริมาณเยอะจะพบว่าค่า η เป็นตัวคูณทำให้ค่า α มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นปัญหาของการให้ค่า หรือรูปแบบการคำนวณจากสมการดังกล่าว อาจไม่สมบูรณ์เท่าใดนัก พิจารณาภาพตัวอย่างของปัญหาที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม

2.4 การเลือกจุดสิ้นสุดยังไม่เหมาะสม

ปัญหาที่เกิดขึ้นในหัวข้อย่อยนี้ พิจารณาจากขั้นตอนการหาจุดสิ้นสุดซึ่งได้นำเสนอมาแล้ว พบว่าการกำหนดจุดสิ้นสุดโดยใช้ค่า ϵ มีปัญหาที่สำคัญคือในกรณีที่ลายนิ้วมือมีลักษณะเป็นเส้นขนาน หรือมีการเปลี่ยนแปลงความโค้งดัดมาก อาทิเช่นลายนิ้วมือประเภทกระโจมหรือกระโจมสูง จะพบว่าจุดสิ้นสุดจะไม่ถูเข้าที่ค่าใดค่าหนึ่ง และขั้นตอนวิธีจะนับเอาจุดสุดท้ายก่อนที่จุดดังกล่าวจะหลุดจากภาพเป็นจุดสิ้นสุด ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับเปลี่ยนโดยการนำค่า α มาพิจารณาในแต่ละช่วงของการวนซ้ำแทน ซึ่งพบว่ามามีค่าที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า α ที่ใช้ก็ยังมีปัญหาดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อย่อย 2.3 ซึ่งพบว่าจุดสิ้นสุดที่ทำการกำหนดขึ้นในกรณีปัญหาลักษณะลายนิ้วมุดังกล่าว มีผลลัพธ์ที่ไม่แม่นยำเท่าที่ควร พิจารณาตัวอย่างดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 ปัญหาการเลือกจุดสิ้นสุดที่ไม่เหมาะสมซึ่งมักเกิดในภาพลายนิ้วมือประเภทกระโจมหรือกระโจมสูง (ก) ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือขุ่มโค้ง, (ข) การกระจายของจุดตัดซึ่งมีการกระจายสูงมาก และ (ค) ภาพขยายลายนิ้วมือ (ก) ตัวเลขสีขาวยระบุตำแหน่งจุดสิ้นสุดซึ่งไม่ถูเข้าสู่จุดเดียวกัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การพัฒนาขั้นตอนการหาจุดโฟกัสโดยใช้แบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมสำหรับการลงทะเบียนลายนิ้วมือซึ่งได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ นับเป็นแนวทางใหม่ที่เกิดจากการผสมผสานรูปแบบการหาจุดอ้างอิงด้วยวิธีการใช้แบบจำลอง และวิธีการฉายจุดเข้าด้วยกัน รูปแบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพทั้งในแง่ของเวลา และความถูกต้องแม่นยำ เนื่องจากสามารถทำการตรวจหาได้โดยไม่ต้องปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ และนอกจากนี้ จุดอ้างอิงที่นำเสนอด้วยวิธีการนี้ยังลู่เข้าสู่ตำแหน่งที่ถูกต้องได้อย่างรวดเร็ว และแม่นยำมาก จึงนับได้ว่าขั้นตอนการตรวจหาจุดโฟกัสที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติจริง แต่อย่างไรก็ตามจุดโฟกัสที่เสนอโดยวิทยานิพนธ์นี้ยังประสบปัญหาความแม่นยำในภาพลายนิ้วมือที่มีคุณภาพต่ำ หรือภาพลายนิ้วมือที่มีปัญหาดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในผลการทดลอง ด้วยเหตุนี้เอง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนาหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบ่งชี้คุณภาพของจุดโฟกัส ให้ชัดเจน เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบรู้จำลายนิ้วมือในแง่อื่นๆ อาทิเช่น การจำแนกประเภทลายนิ้วมือ, การจับคู่ลายนิ้วมือ หรือการเข้าถึงข้อมูล ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดต่อไปในอนาคตอันใกล้

ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้จะเสนอแนะถึงแนวทางการแก้ไขในปัญหาที่เกิดขึ้นจากที่ได้กล่าวมาแล้วใน ส่วนของการวิจารณ์ผล และนำเสนอการแนวทางการนำจุดโฟกัสไปประยุกต์ใช้ในงานรู้จำ ลายนิ้วมือด้านอื่นซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

1.1 ปัญหาเรื่องการกำหนดจุดเริ่มต้น

พิจารณารูปแบบการตรวจหาจุดเริ่มต้น ซึ่งทำการตรวจหาอาณาบริเวณที่มีปริมาณ จุดตัดมากที่สุด จะพบว่าวิธีการดังกล่าวอาจทำให้การกำหนดจุดเริ่มต้นนั้นผิดพลาดได้ สำหรับ วิธีการแก้ไข อาจทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบการกำหนดจุดเริ่มต้น โดยใช้คุณลักษณะอื่นๆแทน อาทิ เช่นตรวจสอบบริเวณจุดสูงสุดของความโค้งลายนิ้วมือ หรือจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความโค้งสูง อาทิเช่น จุดแกนเป็นต้น การหาจุดต่างๆดังที่กล่าวมาแล้วนั้นอาจทำให้การประมวลผลซับซ้อนขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องพัฒนาเพื่อให้ภาพรวมของระบบนั้นดีขึ้นในแง่ของเวลา และความแม่นยำต่อไป

1.2 ปัญหาเรื่องการกำหนดจุดสิ้นสุด

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อวิจารณ์ ปัญหาเรื่องการกำหนดจุดสิ้นสุดนั้น มักจะ เกิดกับภาพที่มีการกระจายของจุดตัดสูง (ไม่กระจุกตัวอยู่ที่ใดที่หนึ่ง) โดยเฉพาะภาพลายนิ้วมือ ประเภทกระโอม หรือกระโอมสูง จะพบว่าจุดโฟกัสจะมีลักษณะการลู่ออกจากบริเวณที่มีความโค้ง ไปไกลมาก สำหรับวิธีการแก้ไขอาจทำการคัดเลือกสนามทิศทางที่มีความโค้งเหมาะสม หรือ อาจ กำหนดค่าคุณภาพของจุดดังกล่าว เพื่อบ่งชี้ว่าจุดสิ้นสุดจุดนั้นนั้นเหมาะสมที่จะนำมาเอาไปใช้ พิจารณาต่อหรือไม่ อย่างไร ตัวอย่างค่าที่จะนำมากำหนดเป็นปัจจัยเชิงคุณภาพของจุดโฟกัส (Focal Point Quality Factor) อาทิเช่น ความแปรปรวนของจุดตัด, จำนวนจุดตัดในอาณาบริเวณที่สนใจ, ค่า ปัจจัยที่แสดงความคล้ายคลึงกับเลนส์ครึ่งวงกลม หรือลักษณะรูปร่างการกระจายตัวของจุดตัดก็เป็น ต้น นอกจากวิธีการแก้ไขโดยใช้ปัจจัยเชิงคุณภาพแล้ว อาจทำการพิจารณาลักษณะของสนามทิศทาง ต่างๆที่เกิดขึ้นได้จุดโฟกัส ว่าเหมาะสมว่าจะเป็นจุดหยุด มากหรือน้อยเพียงใด โดยใช้แบบจำลอง รูปร่างอื่นๆก็เป็นได้

1.3 ปัญหาเรื่องแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลม

ลักษณะปัญหาที่พบโดยมากนั้น มักเกิดมาจากการเว้า หรือแหงนของภาพหรือภาพที่มีคุณภาพลายนิ้วมือต่ำมาก ในกรณีที่กำหนดให้บล็อกซึ่งเป็นอาณาบริเวณในแบบจำลองเลนส์ครึ่งวงกลมมีความละเอียดของต่ำ ถ้าคุณภาพของลายนิ้วมือไม่ผ่านเกณฑ์ หรือมีคุณภาพต่ำอาจทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณถูกลดทอนให้มีค่าน้อยลง และส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของระบบได้ ดังนั้นแนวทางการแก้ไขอาจเพิ่มรูปแบบการตรวจหาจุดโฟกัสโดยเพิ่มความละเอียดภายในอาณาบริเวณให้สูงขึ้น, ปรับรับสี, ความกว้าง หรือความละเอียดในการบิดตัวของแบบจำลองให้กว้าง และละเอียดขึ้น เพื่อให้ได้จำนวนข้อมูลที่มากขึ้น และเหมาะสมที่จะนำไปตรวจหาจุดโฟกัสต่อไป พิจารณาตัวอย่างดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 การปรับความละเอียดของอาณาบริเวณที่สนใจในแบบจำลองเลนส์รูปครึ่งวงกลม

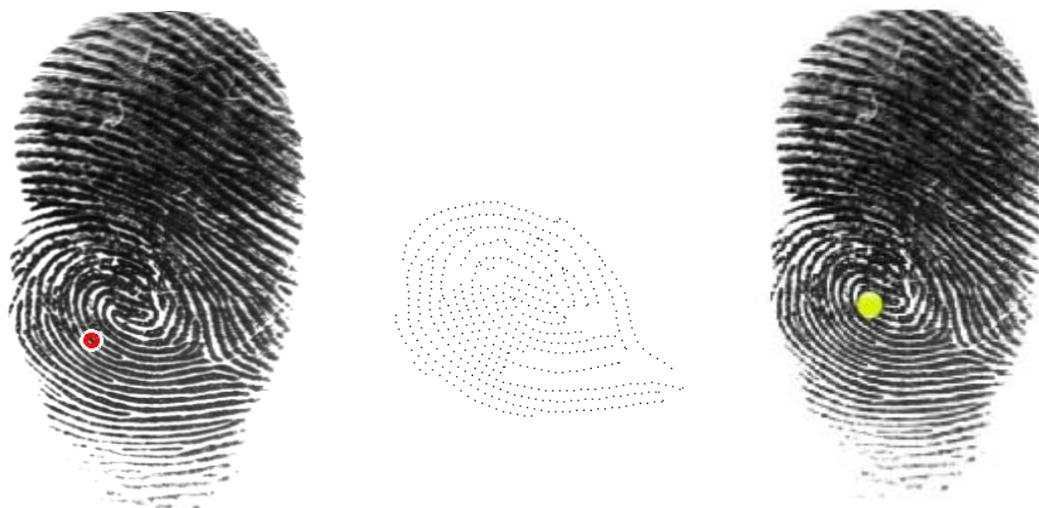
1.4 ปัญหาความผิดเพี้ยนยืดหยุ่นของลายนิ้วมือ

ลักษณะปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อสนามทิศทางที่ใช้ในการจุดโฟกัสโดยตรง ทำให้สนามทิศทาง ณ บริเวณที่สนใจมีการผิดเพี้ยนไปด้วย ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการกระจายของจุดตัดและจุดกึ่งกลางเฉลี่ยของจุดตัดที่เกิดขึ้น สำหรับวิธีการแก้ปัญหานี้จำเป็นต้องทำการตรวจวัดความผิดเพี้ยนยืดหยุ่นดังกล่าว เพื่อบ่งชี้ว่าอาณาบริเวณต่างๆของภาพลายนิ้วมือว่ามีลักษณะเป็นเช่นไร และทำการชดเชยสนามทิศทางในบริเวณนั้นๆ ให้ลักษณะของสนามทิศทางมีค่าที่เหมาะสมต่อการตรวจหาจุดโฟกัสต่อไป

2. แนวทางการนำจุดโฟกัสไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ

2.1 จุดโฟกัสระดับเส้นลายนิ้วมือ

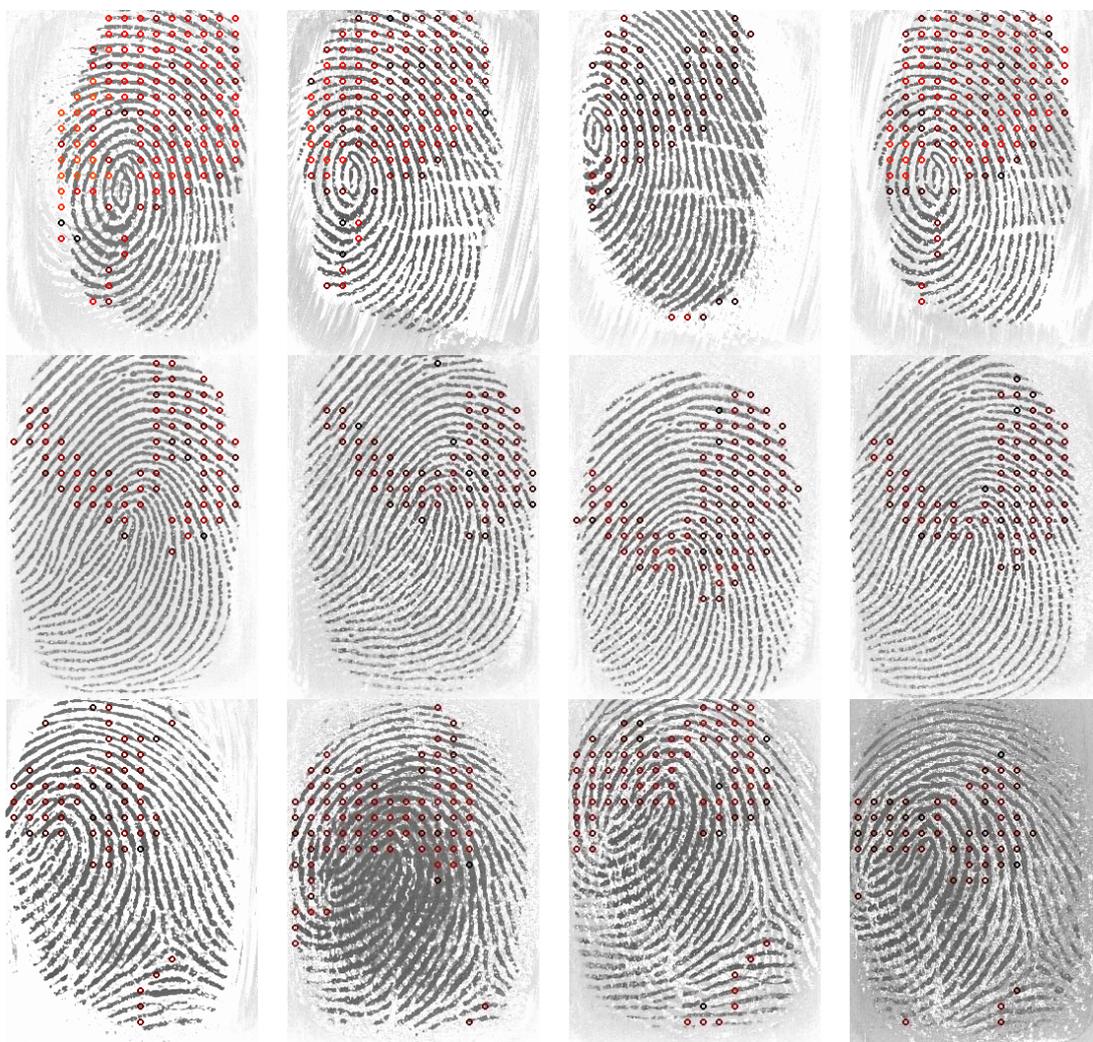
รูปแบบของจุดโฟกัสระดับเส้นลายนิ้วมือ คือรูปแบบการหาจุดโฟกัสจากข้อมูลที่เป็นตำแหน่ง และทิศทางของเส้นลายนิ้วมือที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงภาพ และกระบวนการทำให้บาง (Thinning) เมื่อพิจารณาถึงความละเอียดที่ใช้ในการตรวจหาจุดโฟกัสแล้ว พบว่ามีความคล้ายคลึงกับการตรวจหาจุดโฟกัสโดยใช้สนามทิศทางที่มีความละเอียดเท่ากับ 1 จุดภาพแต่ลักษณะของการตรวจหาด้วยวิธีการนี้จะใช้จุดที่อยู่บนเส้นลายนิ้วมือโดยตรง จะพบว่าข้อมูลดังกล่าวจะมีอยู่เฉพาะตามแนวเส้นลายนิ้วมือเท่านั้น ไม่มีการเฉลี่ยจากเส้นลายนิ้วมืออื่นใด (รูปแบบการทำงานจะคล้ายคลึงกับ Areekul *et al.*, 2006 แต่มีข้อแตกต่างกันในเรื่องของการกำหนดอาณาบริเวณที่จะใช้เส้นลายนิ้วมือ ซึ่งอาจกำหนดเป็นอาณาบริเวณรูปเลนส์ครึ่งวงกลม หรือรูปแบบอื่นที่แตกต่างกันออกไปได้) ข้อมูลที่ได้จึงเป็นข้อมูลจากเส้นลายนิ้วมือจริง ดังนั้นวิธีการดังกล่าวนี้อาจจะช่วยแก้ปัญหาภาพที่มีความผิดเพี้ยนยืดหยุ่นได้ เนื่องมาจากการใช้สมการเส้นตรงที่มีทิศทาง และตำแหน่งของข้อมูล ตรงกับเส้นลายนิ้วมือจริง พิจารณาดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 ตัวอย่างเปรียบเทียบตำแหน่งของจุดโฟกัสที่เกิดขึ้น ก) จุดโฟกัสของภาพที่ได้จากการหาด้วยสนามทิศทางขนาด 16×16 ข) เส้นลายนิ้วมือที่สนใจ และ ค) ผลลัพธ์ในการตรวจหาจุดโฟกัสด้วยเส้นลายนิ้วมือ

2.2 การจำแนกภาพลายนิ้วมือด้วยจุดโฟกัส

ลักษณะการจำแนกลายนิ้วมือด้วยจุดโฟกัส คือการจำแนกภาพลายนิ้วมือออกเป็นกลุ่มโดยใช้คุณลักษณะที่มีความสัมพันธ์ที่เกิดจากจุดโฟกัส ซึ่งในหัวข้อนี้จะขอยกตัวอย่างคุณลักษณะที่เรียกว่า “บล็อกที่เกี่ยวข้อง (Contribution Block)” ซึ่งลักษณะของบล็อกดังกล่าวเกิดจากบล็อกที่มีเส้นตั้งฉากสนามทิศทางต่างๆ ลากผ่านวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดโฟกัส และมีรัศมีใดๆ ซึ่งพบว่าคุณลักษณะดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกันในภาพลายนิ้วมือเดียวกัน ซึ่งนับว่าเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการจำแนกลายนิ้วมือต่อไปในอนาคต พิจารณาตัวอย่างภาพที่ 50



ภาพที่ 50 คุณลักษณะของบล็อกที่เกี่ยวข้อง (Contribution block) ต่อการนำมาจำแนกลายนิ้วมือ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Areekul V., K. Suappasriwasuseth and S. Jirachaweng. 2006. The New Focal point Localization Algorithm for Fingerprint Registration, pp. 497-500. **18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR2006)**, vol. 4
- Areekul, V., Boonchaiseree, N. 2008. Fast Focal Point Localization Algorithm for Fingerprint Registration. **In Proc. 3rd IEEE ICIEA**, pp. 2089-2094
- Bazen, A.M., Gerez. S.H. 2002. Systematic Methods for the Computation of the Directional Fields and Singular Points of Fingerprints. **In IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.**, vol.24, pp. 905-919
- Boonchaiseree N., Areekul V. 2009. Focal point Detection Based on Half Concentric Lens Model for Singular Point Extraction in Fingerprint. **3rd IAPR/IEEE International Conference on Biometric (ICB2009)**, LNCS 5558, pp. 637-646
- FVC2000. 2000. Fingerprint Verification Competition 2000. Available Source: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2000>.
- FVC2002. 2002. Fingerprint Verification Competition 2002. Available Source: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2002>.
- FVC2004. 2004. Fingerprint Verification Competition 2004. Available Source: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004>.
- 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. **IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, Vol.20. No.8. pp. 777-789
- Hung, D.C.D., Huang, C. 1996. A Model "Optimized Singular Point Detection Algorithm for Fingerprint Images. **In Proc. Florida Artificial Intelligence Research Symposium (9th)**. pp. 444-448
- Huvanandana, S., Kim, C., and Hwang, J.N. 2000. Reliable and Fast Fingerprint Identification for Security Applications. **In Proc. Int. Conf. on Image Processing**, vol. 2, pp. 503-506
- Kawagoe, M., Tojo, A. 1984. Fingerprint Pattern Classification. **In. Pattern Recognition**, vol.17, pp. 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**, pp. 498-509.
- Liu T., Zhang C., Hao P. 2006. Fingerprint Reference Point Detection Based on Local Axial Symmetry. **In Proc. Int'l Conf. Pattern Recognition**, vol. I, pp. 1050-1053.
- 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. **In AVBPA 2005**, LNCS, vol. 3546, pp. 171-183
- 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**, vol. 39, pp.839-855
- Rerkrai, K. and V. Areekul, 2000. A New Reference Point for Fingerprint Recognition, pp. 499-502. **Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2000)**, vol. 2.
- Rämö, P., Tico, M., Onnia, V., Saarinen, J. 2001. Optimized Singular Point Detection Algorithm for Fingerprint Images. **In Proc. Int'l Conf. Image Processing**, vol 3, pp. 242-245.

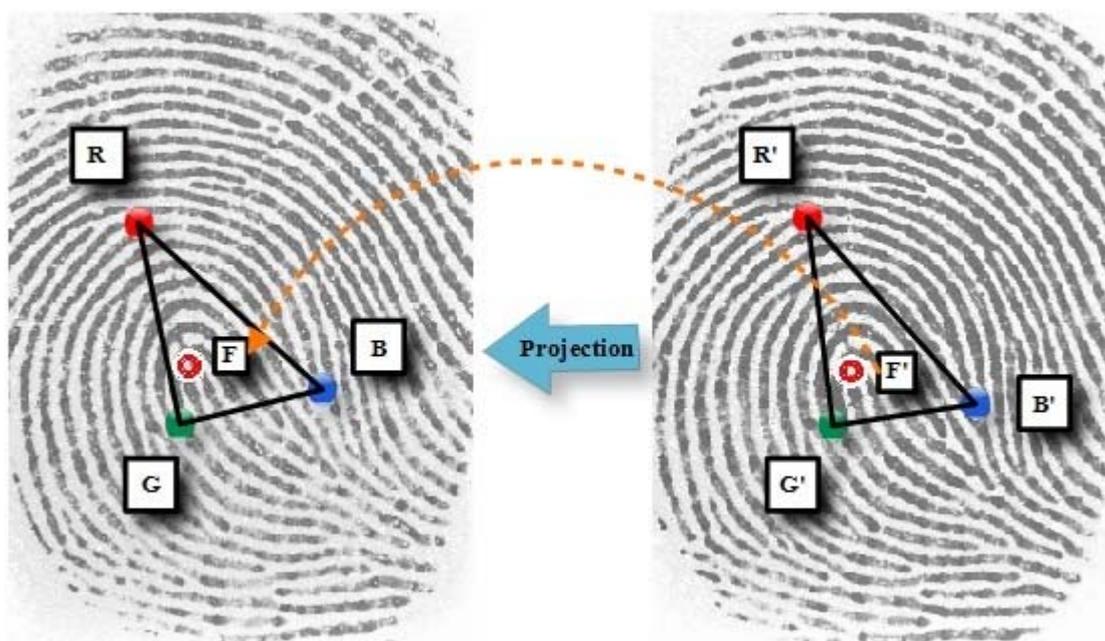
ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณการตรวจวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสด้วยวิธีการสามเหลี่ยม

ตัวอย่างการคำนวณการตรวจวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสด้วยวิธีการสามเหลี่ยม

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อเกี่ยวกับขั้นตอนการประเมินประสิทธิภาพ และการวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัส ในหัวข้อนี้จะนำเสนอตัวอย่างการคำนวณการตรวจวัดความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการสามเหลี่ยม รูปแบบการวัดด้วยวิธีการนี้แบ่งได้ 2 กรณีได้แก่ กรณีที่จุดโฟกัสอยู่ภายในและกรณีที่จุดโฟกัสอยู่นอกอาณาบริเวณรูปสามเหลี่ยมที่เกิดจากการลากเส้นเชื่อมจุดสามจุดที่ทำกรกำหนดขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณารายละเอียดการคำนวณได้ดังตัวอย่างการคำนวณต่อไปนี้

1. กรณีจุดโฟกัสอยู่ภายในสามเหลี่ยม พิจารณาตัวอย่างดังภาพผนวกที่ ก1



ภาพผนวกที่ ก1 การวัดความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการฉายจุดโฟกัสในกรณีที่จุดโฟกัสตกอยู่ภายในสามเหลี่ยม ของภาพถ่ายนิ้วมือของบุคคลคนเดียวกัน

พิจารณาพิสัยของจุดต่างๆที่เกิดขึ้นจากภาพผนวกที่ ก1 ด้านบนซึ่งเป็นภาพตัวอย่างที่ได้ทำการกำหนดจุด มีรายละเอียดดังตารางผนวกที่ ก1

ตารางผนวกที่ ก1 พิกัดที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัส

| จุดที่สนใจ | ค่าพิกัดตามแกนนอน (x) | ค่าพิกัดตามแกนตั้ง (y) |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| R (x_R, y_R) | 72 | 122 |
| G (x_G, y_G) | 91 | 236 |
| B (x_B, y_B) | 161 | 218 |
| F (x_F, y_F) | 104 | 196 |
| R' ($x_{R'}, y_{R'}$) | 75 | 123 |
| G' ($x_{G'}, y_{G'}$) | 92 | 239 |
| B' ($x_{B'}, y_{B'}$) | 162 | 223 |
| F' ($x_{F'}, y_{F'}$) | 103 | 196 |

จากตารางผนวกที่ ก1 จะสามารถคำนวณหาค่าระยะส่วนของเส้นตรงต่างๆที่สำคัญได้ดังวิธีการตามตัวอย่าง

$$\overline{RG} = \sqrt{(x_R - x_G)^2 + (y_R - y_G)^2} = 115.5725$$

พิจารณาตัวอย่างการคำนวณข้างต้น จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางผนวกที่ ก2

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าระยะทางจากส่วนของเส้นตรงต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ

| พารามิเตอร์ | ค่า | พารามิเตอร์ | ค่า |
|-----------------|----------|-------------------|----------|
| \overline{RG} | 115.5725 | $\overline{R'G'}$ | 117.2391 |
| \overline{GB} | 72.2772 | $\overline{G'B'}$ | 71.8053 |
| \overline{BR} | 130.9084 | $\overline{B'R'}$ | 132.5481 |
| \overline{RF} | 80.6226 | $\overline{R'F'}$ | 78.1857 |
| \overline{GF} | 42.0595 | $\overline{G'F'}$ | 44.3847 |
| \overline{BF} | 61.0983 | $\overline{B'F'}$ | 64.8845 |

จากนั้นคำนวณหาค่าความชันเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสัดส่วนพิจารณา
รายละเอียดดังตารางผนวกที่ ก3 และรูปแบบตัวอย่างการคำนวณดังนี้

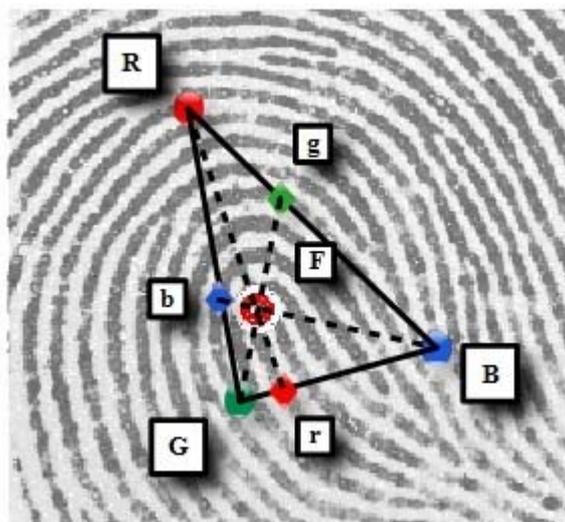
$$m_{RG} = \frac{y_R - y_G}{x_R - x_G} = \frac{122 - 236}{72 - 91} = 6.000$$

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าความชันของเส้นตรงต่างๆ

| พารามิเตอร์ | ค่า | พารามิเตอร์ | ค่า |
|-------------|---------|-------------|---------|
| m_{RG} | 6.000 | $m_{R'G'}$ | 6.8235 |
| m_{GB} | -0.2571 | $m_{G'B'}$ | -0.2286 |
| m_{BR} | 1.0786 | $m_{B'R'}$ | 1.1494 |
| m_{RF} | 2.3125 | $m_{R'F'}$ | 2.6071 |
| m_{GF} | -3.0769 | $m_{G'F'}$ | -3.9091 |
| m_{BF} | 0.3860 | $m_{B'F'}$ | 0.4576 |

ต่อมาทำการตรวจสอบว่าจุดโฟกัสอยู่ภายใน หรือภายนอกสามเหลี่ยมโดย
พิจารณาด้วยวิธีการที่เรียกว่า “แบรีเซนตริกซ์เทคนิค (Barycentric Technique)” (กล่าวละเอียดใน
ภาคผนวก ข) ซึ่งจะพบว่าจุดโฟกัสในตัวอย่างนี้ตกอยู่ในอาณาบริเวณสามเหลี่ยม ดังนั้นจะมีการ
คำนวณทั้งหมด 3 ครั้ง ตามจำนวนจุดที่กำหนดขึ้น (ในตัวอย่างนี้จะขออธิบายโดยละเอียดเฉพาะ
กรณีที่กำหนด R เป็นหลักเท่านั้น สำหรับการกำหนดจุด G และจุด B เป็นหลักจะมีรูปแบบการ
คำนวณที่เหมือนกัน)

ต่อมาทำการตรวจหาจุดตัดที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้ r, g และ b เป็นจุดตัดที่เกิดจาก
การลากจุดที่ทำการกำหนดขึ้นจุดใดจุดหนึ่งพาดผ่านจุดโฟกัส และไปตัดกันบนส่วนของเส้นตรงที่
เกิดจากจุดที่ทำการกำหนด 2 จุดที่เหลือ พิจารณาดังภาพผนวกที่ ก2



ภาพผนวกที่ ก2 ตัวอย่างจุดตัดที่เกิดจากการลากเส้นเชื่อมระหว่างจุดที่กำหนดพาดผ่านจุดโฟกัส

จากภาพผนวกที่ ก2 ตัวอย่างการคำนวณหาตำแหน่งของจุด r ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้วิธีการแก้ตามระบบสมการเส้นตรงดังสมการ (8) มีรายละเอียดดังนี้

$$\begin{aligned}
 x_r &= \frac{m_{GB}x_G - m_{RF}x_F - (y_G - y_F)}{m_{GB} - m_{RF}} \\
 &= \frac{(-0.2571)(91) - (2.3125)(104) - (236 - 196)}{-0.2571 - 2.3125} \\
 &= 118.2655 \\
 y_r &= \frac{m_{GB}(y_F - m_{RF}x_F) + m_{RF}(y_G - m_{GB}x_G)}{m_{GB} - m_{RF}} \\
 &= \frac{(-0.2571)(196 - (2.3125)(104)) + (2.3125)(236 - (-0.2571)(91))}{-0.2571 - 2.3125} \\
 &= 228.9889
 \end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ ก4 จุด r , g และ b ที่ได้จากการคำนวณ

| พารามิเตอร์ | ค่า | พารามิเตอร์ | ค่า |
|--------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| (x_r, y_r) | (118.2655, 228.9889) | $(x_{r'}, y_{r'})$ | (117.2771, 233.2223) |
| (x_g, y_g) | (113.5012, 166.7653) | $(x_{g'}, y_{g'})$ | (111.0688, 164.4584) |
| (x_b, y_b) | (82.9813, 187.8875) | $(x_{b'}, y_{b'})$ | (84.4545, 187.5131) |

เมื่อคำนวณจุดตัดเรียบร้อยแล้วจะทำการฉายจุดตัดจากภาพที่เปรียบเทียบไปยังภาพที่ต้องการทดสอบดังภาพผนวกที่ ก1 โดยใช้วิธีการฉายด้วยสัดส่วนที่เท่าๆกันของเส้นตรงยกตัวอย่างเช่นต้องการฉายข้อมูลจุดที่อยู่บน $\overline{R'r}$ ไปยัง \overline{Rr} เริ่มต้นโดยการหาความยาวระหว่างจุดโฟกัสที่เกิดขึ้นจนถึงจุดตัดพบว่ามีค่าดังตารางผนวกที่ ก5

ตารางผนวกที่ ก5 ค่าระยะทางระหว่างจุดตัดที่เกิดขึ้น กับจุดโฟกัส และจุดที่กำหนดต่างๆ

| พารามิเตอร์ | ค่า | พารามิเตอร์ | ค่า |
|-----------------|---------|-------------------|---------|
| \overline{Fr} | 35.9412 | $\overline{F'r'}$ | 39.8665 |
| \overline{Fg} | 30.7398 | $\overline{F'g'}$ | 32.5573 |
| \overline{Fb} | 22.5300 | $\overline{F'b'}$ | 20.3952 |
| \overline{Gr} | 28.1525 | $\overline{G'r'}$ | 25.9290 |
| \overline{rB} | 44.1248 | $\overline{r'B'}$ | 45.8763 |
| \overline{Bg} | 69.8650 | $\overline{B'g'}$ | 77.5958 |
| \overline{gR} | 61.0434 | $\overline{g'R'}$ | 54.9523 |
| \overline{Rb} | 66.7963 | $\overline{R'b'}$ | 65.2022 |
| \overline{bG} | 48.7762 | $\overline{b'G'}$ | 52.0369 |

จากนั้นทำการฉายสัดส่วนของด้านที่มีจุดตัดตกอยู่ ซึ่งเมื่อพิจารณาจุด r พบว่าสัดส่วนดังกล่าว คือ

$$\overline{Gr} : \overline{rB} = \overline{G'r'} : \overline{r'B'}$$

กำหนดให้ r_{Proj_x} และ r_{Proj_y} เป็นค่าพิกัดที่เกิดขึ้นจากการฉายข้อมูลข้ามภาพลายนิ้วมือ สามารถคำนวณหาได้ตามตัวอย่าง

$$r_{\text{Proj}_x} = \frac{\overline{G'r'} \cdot x_B + \overline{r'B'} \cdot x_G}{\overline{G'r'} + \overline{r'B'}} = \frac{(25.9290)(161) + (45.8763)(91)}{25.9290 + 45.8763} = 116.2770$$

$$r_{\text{Proj}_y} = \frac{\overline{G'r'} \cdot y_B + \overline{r'B'} \cdot y_G}{\overline{G'r'} + \overline{r'B'}} = \frac{(25.9290)(218) + (45.8763)(236)}{25.9290 + 45.8763} = 229.5001$$

ผลลัพธ์จากการฉายเส้นดังกล่าวจะได้จุดตัดที่ถูกฉาย ดังตารางผนวกที่ ก6 นี้

ตารางผนวกที่ ก6 จุดตัดที่เกิดขึ้นในแต่ละด้านของการกำหนดมุมหลักเป็น R, G และ B ตามลำดับ

| พารามิเตอร์ | ค่า |
|--------------------|----------------------|
| (rProj_x, rProj_y) | (116.2770, 229.5001) |
| (gProj_x, gProj_y) | (108.8980, 161.8000) |
| (bProj_x, bProj_y) | (82.5668, 185.4008) |

หลังจากที่ได้จุดตัดใหม่ที่เกิดจากการฉายแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการฉายเส้นที่พาดผ่านจุดโฟกัสจากภาพเปรียบเทียบไปยังภาพที่ทำการทดสอบ ซึ่งสัดส่วนที่ใช้พิจารณาได้แก่

$$\overline{RF}:\overline{Fr} = \overline{R'F'}:\overline{F'r'}$$

กำหนดให้ frProj_x และ frProj_y เป็นจุดโฟกัสที่เกิดจากการฉาย ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังตัวอย่าง

$$\text{frproj}_x = \frac{\overline{R'F'} \cdot x_{\text{rProj}_x} + \overline{F'r'} \cdot x_R}{\overline{R'F'} + \overline{F'r'}} = \frac{(78.1857)(116.2770) + (39.8665)(72)}{78.1857 + 116.2770} = 101.3246$$

$$\text{frproj}_y = \frac{\overline{R'F'} \cdot y_{\text{rProj}_y} + \overline{F'r'} \cdot y_R}{\overline{R'F'} + \overline{F'r'}} = \frac{(83.8153)(229.5001) + (39.8665)(122)}{83.8153 + 116.2770} = 193.1971$$

ค่าต่างๆจากการฉายจุดโฟกัสพิจารณาดังตารางด้านล่าง

ตารางผนวกที่ ก7 จุดโฟกัสที่เกิดจากการฉายในแต่ละมุมหลัก R, G และ B ตามลำดับ

| พารามิเตอร์ | ค่า |
|----------------------|----------------------|
| (frProj_x, frProj_y) | (101.3246, 193.1971) |
| (fgProj_x, fgProj_y) | (101.3246, 193.1971) |
| (fbProj_x, fbProj_y) | (101.3246, 193.1971) |

ขั้นตอนต่อมาทำการหาความคลาดเคลื่อนของจุดโฟกัสในภาพทดสอบเทียบกับจุดโฟกัสที่ทำการฉายจากภาพเปรียบเทียบตามสมการที่ (14) ดังตัวอย่างการคำนวณด้านล่าง จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆดังตารางผนวกที่ ก8

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_R &= \sqrt{(x_F - x_{\text{fitProj}_x})^2 + (y_F - y_{\text{fitProj}_y})^2} \\ &= \sqrt{(104 - 101.3246)^2 + (196 - 193.1971)^2} \\ &= 3.8748\end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ ก8 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการฉายจุดเมื่อกำหนดมุมหลักเป็น R, G และ B

| พารามิเตอร์ | ค่า |
|-----------------|--------|
| \mathcal{E}_R | 3.8748 |
| \mathcal{E}_G | 3.8748 |
| \mathcal{E}_B | 3.8748 |

ขั้นตอนสุดท้ายทำการหาค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนทั้งหมดที่คำนวณได้ ดังตัวอย่างด้านล่าง

$$\mathcal{E}_{\text{total}} = \frac{\mathcal{E}_R + \mathcal{E}_G + \mathcal{E}_B}{3} = 3.8748$$

ผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนรวมมีค่าเท่ากับ 3.8748 ค่าดังกล่าวนี้ จะใช้ในการบ่งชี้ความคลาดเคลื่อนที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ผลนั่นเอง

1.2 กรณีจุดโฟกัสอยู่ภายนอกสามเหลี่ยม ขั้นตอนการวัดในเงื่อนไขดังกล่าวนี้ จะมีรูปแบบการพิจารณาเหมือนกับกรณีที่จุดโฟกัสตกอยู่ในสามเหลี่ยม แต่มีข้อแตกต่างกันตรงที่ การคำนวณจะพิจารณาเพียงด้านที่สามารถฉายลงบนระนาบสามเหลี่ยมได้เพียงด้านเดียวเท่านั้น ค่าผลลัพธ์ที่ออกมาจะสามารถนำมากำหนดเป็นค่าเฉลี่ยเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ได้โดยตรง

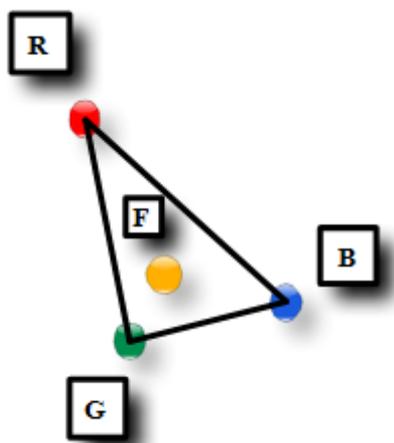
ภาคผนวก ข

การประยุกต์ใช้เทคนิคแบรีเซนทริกซ์ในการตรวจสอบจุดในสามเหลี่ยม

การประยุกต์ใช้เทคนิคแบรีเซนทริกซ์ในการตรวจสอบจุดในสามเหลี่ยม

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อวิธีการวัด ในขั้นตอนการตรวจวัดความคลาดเคลื่อน และในภาคผนวก ก จะพบว่าจำเป็นต้องมีขั้นตอนในการตรวจสอบว่าจุดโฟกัสตกอยู่ภายใน หรือภายนอก อาณาบริเวณสามเหลี่ยมอย่างไร ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการตรวจสอบจุดในสามเหลี่ยมที่เรียกว่า “เทคนิคแบรีเซนทริกซ์” ซึ่งจะอธิบายต่อไป

วิธีการโดยทั่วไปที่จะใช้ในการตรวจสอบว่าจุดใดๆนั้นตกอยู่ในสามเหลี่ยมที่สนใจหรือไม่ คือการกำหนดให้แต่ละด้านของสามเหลี่ยมเป็นเวกเตอร์ จากนั้นทำการคูณรวมของมุมที่เกิดขึ้นระหว่างเวกเตอร์ทั้ง 3 มุม ถ้าผลรวมดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 2π เรเดียน นั่นหมายความว่าจุดดังกล่าวนั้นอยู่ในสามเหลี่ยมนั่นเอง ข้อเสียของวิธีการดังกล่าวนี้คือ มีประสิทธิภาพในการคำนวณช้า เนื่องจากต้องคำนวณทุกจุดยอดของสามเหลี่ยม ด้วยเหตุนี้เองจึงนำแบรีเซนทริกซ์เทคนิคมาใช้ในการตรวจสอบแทน พิจารณาสามเหลี่ยมใดๆอาทิเช่นตัวอย่างดังภาพผนวกที่ ข1



ภาพผนวกที่ ข1 ตัวอย่างสามเหลี่ยมที่ใช้ในการคำนวณ

กำหนดให้ R เป็นจุดหลักที่ใช้ในการทดลองที่มีแกนของเวกเตอร์ RB และ RG ถ้าสมมุติให้มีจุดใดๆ หนึ่งจุดเกิดขึ้นในระนาบสามเหลี่ยมดังกล่าว จะสามารถอธิบายลักษณะของจุดดังกล่าวได้ด้วยสมการดังนี้

$$\vec{v}_2 = u\vec{v}_0 + v\vec{v}_1 \tag{15}$$

สมการที่ (15) กำหนดให้ พารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าดังนี้

$$v_0 = \begin{bmatrix} B_x - R_x \\ B_y - R_y \end{bmatrix}, \quad v_1 = \begin{bmatrix} G_x - R_x \\ G_y - R_y \end{bmatrix}, \quad v_2 = \begin{bmatrix} F_x - R_x \\ F_y - R_y \end{bmatrix} \quad (16)$$

จะสามารถแก้สมการหาค่า u และ v ได้จากสมการดังนี้

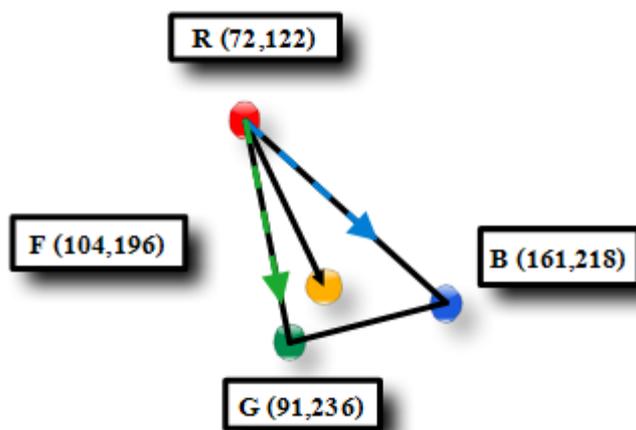
$$u = \frac{(\overline{v_1 \cdot v_1})(\overline{v_0 \cdot v_2}) - (\overline{v_0 \cdot v_1})(\overline{v_1 \cdot v_2})}{(\overline{v_0 \cdot v_0})(\overline{v_1 \cdot v_1}) - (\overline{v_0 \cdot v_1})(\overline{v_0 \cdot v_1})} \quad (17)$$

$$v = \frac{(\overline{v_0 \cdot v_0})(\overline{v_1 \cdot v_2}) - (\overline{v_0 \cdot v_1})(\overline{v_0 \cdot v_2})}{(\overline{v_0 \cdot v_0})(\overline{v_1 \cdot v_1}) - (\overline{v_0 \cdot v_1})(\overline{v_0 \cdot v_1})}$$

พิจารณาสมการที่ (17) u และ v เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของจุดบนระนาบสามเหลี่ยมที่สนใจ ว่าอยู่ภายในหรือภายนอกสามเหลี่ยม ซึ่งมีเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

- ก) กรณีที่ $u > 0$, $v > 0$ และ $u + v \leq 1$ พบว่าจุดตกอยู่ในสามเหลี่ยม
- ข) กรณีที่ $u > 0$, $v > 0$ และ $u + v > 1$ พบว่าจุดตกอยู่นอกสามเหลี่ยมตรงข้ามมุม A ต้องฉายลงด้าน BC
- ค) กรณีที่ $u < 0$ และ $v < 0$ พบว่าจุดตกอยู่นอกสามเหลี่ยมหลังมุม A ต้องฉายลงด้าน BC
- ง) กรณีที่ $u > 0$, $v < 0$ และ $u + v \leq 1$ พบว่าจุดตกอยู่นอกสามเหลี่ยมตรงข้ามมุม B ต้องฉายลงด้าน AC
- จ) กรณีที่ $u > 0$, $v < 0$ และ $u + v > 1$ พบว่าจุดตกอยู่นอกสามเหลี่ยมหลังมุม B ต้องฉายลงด้าน AC
- ฉ) กรณีที่ $u < 0$, $v > 0$ และ $u + v \leq 1$ พบว่าจุดตกอยู่นอกสามเหลี่ยมตรงข้ามมุม C ต้องฉายลงด้าน AB
- ช) กรณีที่ $u < 0$, $v > 0$ และ $u + v > 1$ พบว่าจุดตกอยู่นอกสามเหลี่ยมหลังมุม C ต้องฉายลงด้าน AB

เมื่อพิจารณาวิธีการดังกล่าวจากตัวอย่างการตรวจวัดความคลาดเคลื่อนของจุดโพลัสในภาคผนวก ก ซึ่งมีข้อมูลของสามเหลี่ยมดังภาพตัวอย่างดังนี้



ภาพผนวกที่ ข2 ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบจุดในสามเหลี่ยม

จากภาพผนวกที่ 4 พบว่าสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังต่อไปนี้

$$\vec{v}_0 = \begin{bmatrix} B_x - R_x \\ B_y - R_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 161 - 72 \\ 218 - 122 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 89 \\ 96 \end{bmatrix}$$

$$\vec{v}_1 = \begin{bmatrix} G_x - R_x \\ G_y - R_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 91 - 72 \\ 236 - 122 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19 \\ 114 \end{bmatrix}$$

$$\vec{v}_2 = \begin{bmatrix} F_x - R_x \\ F_y - R_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 104 - 72 \\ 196 - 122 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 32 \\ 74 \end{bmatrix}$$

$$\vec{v}_0 \cdot \vec{v}_0 = \begin{bmatrix} 89 \\ 96 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 89 \\ 96 \end{bmatrix} = (89)(89) + (96)(96) = 17137$$

$$\vec{v}_0 \cdot \vec{v}_1 = \begin{bmatrix} 89 \\ 96 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 19 \\ 114 \end{bmatrix} = (89)(19) + (96)(114) = 12635$$

$$\vec{v}_0 \cdot \vec{v}_2 = \begin{bmatrix} 89 \\ 96 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 32 \\ 74 \end{bmatrix} = (89)(32) + (96)(74) = 9952$$

$$\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_1 = \begin{bmatrix} 19 \\ 114 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 19 \\ 114 \end{bmatrix} = (19)(114) + (19)(114) = 13357$$

$$\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2 = \begin{bmatrix} 19 \\ 114 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 32 \\ 74 \end{bmatrix} = (19)(32) + (114)(74) = 9044$$

ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่า u และ v ได้ดังนี้

$$u = \frac{(\bar{v}_1 \cdot \bar{v}_1)(\bar{v}_0 \cdot \bar{v}_2) - (\bar{v}_0 \cdot \bar{v}_1)(\bar{v}_1 \cdot \bar{v}_2)}{(\bar{v}_0 \cdot \bar{v}_0)(\bar{v}_1 \cdot \bar{v}_1) - (\bar{v}_0 \cdot \bar{v}_1)(\bar{v}_0 \cdot \bar{v}_1)} = \frac{(13357)(9952) - (12635)(9044)}{(17137)(13357) - (12635)(12635)} = 0.2694$$

$$v = \frac{(\bar{v}_0 \cdot \bar{v}_0)(\bar{v}_1 \cdot \bar{v}_2) - (\bar{v}_0 \cdot \bar{v}_1)(\bar{v}_0 \cdot \bar{v}_2)}{(\bar{v}_0 \cdot \bar{v}_0)(\bar{v}_1 \cdot \bar{v}_1) - (\bar{v}_0 \cdot \bar{v}_1)(\bar{v}_0 \cdot \bar{v}_1)} = \frac{(17137)(9044) - (12635)(9952)}{(17137)(13357) - (12635)(12635)} = 0.4223$$

จากผลลัพธ์ที่ได้จะพบว่าค่า $u = 0.2694$ และ $v = 0.4223$ และ $u + v = 0.6917 \leq 1$ ดังนั้นตรงตามเงื่อนไข ก) แสดงว่าจุดอยู่ในสามเหลี่ยม ขั้นตอนต่อจากนี้จะกลับไปสู่รูปแบบการวัดความคลาดเคลื่อนหลักในภาคผนวก ก ต่อไป

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองการตรวจหาจุดโฟกัสจำแนกตามประเภทลายนิ้วมือ

ผลการทดลองจากฐานข้อมูลลายนิ้วมือ FVC2000DB2a

ตารางผนวกที่ ค1 ผลการวัดความคลาดเคลื่อนโดยวิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมในฐานข้อมูล FVC2000DB2a ที่นำเสนอโดยวิทยานิพนธ์นี้

| Parameter | Criterion | Type of fingerprint | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | | Right | Left | Whorl | Twin | Arch | Tented | Total |
| Number of | Exist | 216 | 253 | 168 | 16 | 40 | 104 | 797 |
| Focal Point | Inexist | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| Distance Error (DE), (Pixel) | $0 \leq DE \leq 5$ | 76 | 118 | 83 | 9 | 8 | 13 | 307 |
| | $5 < DE \leq 10$ | 104 | 114 | 66 | 6 | 18 | 46 | 354 |
| | $10 < DE \leq 15$ | 15 | 10 | 16 | 1 | 9 | 26 | 77 |
| | $15 < DE \leq 20$ | 14 | 9 | 2 | 0 | 4 | 6 | 35 |
| | $DE \geq 20$ | 7 | 2 | 1 | 0 | 1 | 13 | 24 |
| Statistical of DE | Max | 99.37 | 70.02 | 29.07 | 12.31 | 27.12 | 74.60 | 99.37 |
| | Min | 1.90 | 1.55 | 2.22 | 3.84 | 2.79 | 2.34 | 1.55 |
| | Mean | 8.55 | 6.68 | 6.49 | 5.86 | 9.68 | 12.78 | 8.08 |
| | Variance | 9.00 | 5.25 | 3.69 | 2.27 | 5.11 | 11.13 | 55.55 |

ตารางผนวกที่ ค2 ผลการวัดความคลาดเคลื่อนโดยวิธีการวัดแบบการฉายจุดด้วยตาในฐานข้อมูล FVC2000DB2a ที่นำเสนอโดยวิทยานิพนธ์นี้

| Parameter | Criterion | Type of fingerprint | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|-------|-------|------|--------|--------|-------|
| | | Right | Left | Whorl | Twin | Arch | Tented | Total |
| Number of | Exist | 216 | 253 | 168 | 16 | 40 | 104 | 797 |
| Focal Point | Inexist | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| Distance Error (DE), (Pixel) | $0 \leq DE \leq 5$ | 137 | 136 | 109 | 14 | 8 | 14 | 418 |
| | $5 < DE \leq 10$ | 58 | 102 | 44 | 2 | 7 | 55 | 268 |
| | $10 < DE \leq 15$ | 14 | 12 | 12 | 0 | 21 | 19 | 78 |
| | $15 < DE \leq 20$ | 4 | 2 | 2 | 0 | 1 | 2 | 11 |
| | $DE \geq 20$ | 3 | 1 | 1 | 0 | 3 | 14 | 22 |
| Statistical | Min | 57.62 | 28.39 | 30.87 | 7.36 | 31.64 | 90.49 | 90.49 |
| | Max | 1.96 | 1.44 | 1.21 | 2.96 | 2.60 | 2.03 | 1.21 |
| | Mean | 5.49 | 5.30 | 5.08 | 4.03 | 10.261 | 12.87 | 4.09 |
| | Variance | 4.91 | 3.05 | 3.71 | 1.08 | 5.95 | 14.47 | 49.23 |

ตารางผนวกที่ ค3 ผลการวัดความคลาดเคลื่อนโดยวิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมในฐานข้อมูล
FVC2000DB2a ที่นำเสนอ โดย Boonchaiseree *et al.* (2009)

| Parameter | Criterion | Type of fingerprint | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | | Right | Left | Whorl | Twin | Arch | Tented | Total |
| Number of | Exist | 216 | 256 | 168 | 16 | 40 | 104 | 800 |
| Focal Point | Inexist | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Distance Error (DE), (Pixel) | $0 \leq DE \leq 5$ | 74 | 97 | 44 | 3 | 0 | 7 | 225 |
| | $5 < DE \leq 10$ | 99 | 127 | 94 | 12 | 21 | 46 | 399 |
| | $10 < DE \leq 15$ | 19 | 24 | 25 | 0 | 13 | 25 | 106 |
| | $15 < DE \leq 20$ | 14 | 5 | 3 | 0 | 3 | 12 | 37 |
| | $DE \geq 20$ | 10 | 3 | 2 | 1 | 3 | 14 | 33 |
| Statistical of DE | Max | 96.70 | 72.81 | 49.36 | 22.62 | 31.57 | 83.34 | 96.70 |
| | Min | 1.97 | 1.91 | 2.36 | 4.23 | 6.39 | 3.31 | 1.92 |
| | Mean | 8.62 | 7.20 | 8.06 | 7.10 | 11.90 | 9.84 | 10.352 |
| | Variance | 8.51 | 5.69 | 4.78 | 4.10 | 13.71 | 14.96 | 9.327 |

ตารางผนวกที่ ค4 ผลการวัดความคลาดเคลื่อนโดยวิธีการวัดแบบการฉายจุดด้วยตาในฐานข้อมูล FVC2000DB2a ที่นำเสนอ โดย Boonchaiseree *et al.* (2009)

| Parameter | Criterion | Type of fingerprint | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | | Right | Left | Whorl | Twin | Arch | Tented | Total |
| Number of | Exist | 216 | 256 | 168 | 16 | 40 | 104 | 800 |
| Focal Point | Inexist | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Distance Error (DE), (Pixel) | $0 \leq DE \leq 5$ | 92 | 125 | 48 | 5 | 3 | 9 | 282 |
| | $5 < DE \leq 10$ | 94 | 113 | 99 | 10 | 21 | 49 | 386 |
| | $10 < DE \leq 15$ | 11 | 14 | 19 | 0 | 11 | 24 | 79 |
| | $15 < DE \leq 20$ | 9 | 2 | 1 | 0 | 2 | 8 | 22 |
| | $DE \geq 20$ | 10 | 2 | 1 | 1 | 3 | 14 | 31 |
| Statistical | Min | 67.81 | 65.97 | 42.65 | 17.84 | 26.13 | 65.18 | 67.81 |
| | Max | 1.21 | 1.05 | 2.06 | 3.88 | 3.46 | 3.01 | 1.21 |
| | Mean | 5.46 | 5.89 | 7.07 | 6.14 | 11.90 | 11.88 | 6.481 |
| | Variance | 6.14 | 4.21 | 3.78 | 4.02 | 5.64 | 12.60 | 7.301 |

ผลการทดลองจากฐานข้อมูลลายนิ้วมือ FVC2002DB2a

ตารางผนวกที่ ค5 ผลการวัดความคลาดเคลื่อนโดยวิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมในฐานข้อมูล FVC2002DB2a ที่นำเสนอโดยวิทยานิพนธ์นี้

| Parameter | Criterion | Type of fingerprint | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| | | Right | Left | Whorl | Twin | Arch | Tented | Total |
| Number of | Exist | 199 | 238 | 216 | 16 | 63 | 64 | 796 |
| Focal Point | Inexist | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 |
| Distance Error (DE), (Pixel) | $0 \leq DE \leq 5$ | 25 | 23 | 19 | 0 | 4 | 3 | 74 |
| | $5 < DE \leq 10$ | 95 | 115 | 92 | 7 | 24 | 28 | 361 |
| | $10 < DE \leq 15$ | 36 | 58 | 61 | 7 | 24 | 17 | 203 |
| | $15 < DE \leq 20$ | 19 | 21 | 25 | 1 | 5 | 8 | 79 |
| | $DE \geq 20$ | 24 | 21 | 19 | 1 | 6 | 8 | 79 |
| Statistical | Max | 74.87 | 91.38 | 97.19 | 145.18 | 41.99 | 56.09 | 145.18 |
| | Min | 1.65 | 2.98 | 3.80 | 5.72 | 3.91 | 4.91 | 1.65 |
| | Mean | 14.65 | 16.54 | 14.76 | 18.78 | 12.64 | 15.97 | 15.28 |
| | S.D. | 31.61 | 43.47 | 35.29 | 32.84 | 6.81 | 30.70 | 35.45 |

ตารางผนวกที่ ๑๖ ผลการวัดความคลาดเคลื่อน โดยวิธีการวัดแบบการฉายจุดด้วยตาในฐานข้อมูล FVC2002DB2a ที่นำเสนอโดยวิทยานิพนธ์นี้

| Parameter | Criterion | Type of fingerprint | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|--------|--------|------|-------|--------|--------|
| | | Right | Left | Whorl | Twin | Arch | Tented | Total |
| Number of | Exist | 199 | 238 | 216 | 16 | 63 | 64 | 796 |
| Focal Point | Inexist | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 |
| Distance Error (DE), (Pixel) | $0 \leq DE \leq 5$ | 66 | 75 | 63 | 16 | 11 | 18 | 249 |
| | $5 < DE \leq 10$ | 62 | 102 | 93 | 0 | 31 | 32 | 320 |
| | $10 < DE \leq 15$ | 27 | 18 | 34 | 0 | 9 | 10 | 98 |
| | $15 < DE \leq 20$ | 26 | 6 | 5 | 0 | 3 | 0 | 40 |
| | $DE \geq 20$ | 18 | 37 | 21 | 0 | 9 | 4 | 89 |
| Statistical | Max | 46.04 | 137.35 | 142.08 | 4.31 | 59.27 | 26.24 | 142.08 |
| | Min | 2.04 | 2.34 | 1.70 | 2.56 | 3.46 | 2.28 | 1.70 |
| | Mean | 9.11 | 10.19 | 9.59 | 3.36 | 10.79 | 7.39 | 9.44 |
| | S.D. | 7.19 | 15.02 | 12.97 | 0.58 | 10.53 | 4.60 | 11.75 |

ผลการทดลองจากฐานข้อมูลลายนิ้วมือ FVC2004DB1a

ตารางผนวกที่ ค7 ผลการวัดความคลาดเคลื่อนโดยวิธีการวัดแบบสามเหลี่ยมฐานข้อมูล FVC2004DB1a ที่นำเสนอโดยวิทยานิพนธ์นี้

| Parameter | Criterion | Type of fingerprint | | | | | | Total |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | | Right | Left | Whorl | Twin | Arch | Tented | |
| Number of | Exist | 192 | 176 | 264 | 8 | 8 | 152 | 800 |
| Focal Point | Inexist | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Distance Error (DE), (Pixel) | $0 \leq DE \leq 5$ | 9 | 3 | 12 | 0 | 0 | 2 | 26 |
| | $5 < DE \leq 10$ | 56 | 70 | 90 | 3 | 0 | 33 | 252 |
| | $10 < DE \leq 15$ | 62 | 46 | 77 | 2 | 0 | 37 | 224 |
| | $15 < DE \leq 20$ | 28 | 24 | 43 | 3 | 0 | 28 | 126 |
| | $DE \geq 20$ | 37 | 33 | 42 | 0 | 8 | 52 | 172 |
| Statistical | Max | 50.17 | 90.26 | 71.33 | 19.28 | 49.75 | 158.28 | 158.28 |
| | Min | 3.26 | 4.26 | 3.04 | 9.64 | 20.89 | 5.40 | 3.04 |
| | Mean | 15.37 | 15.03 | 14.16 | 13.00 | 26.97 | 19.21 | 15.72 |
| | S.D. | 8.82 | 9.98 | 8.47 | 3.72 | 9.22 | 15.05 | 113.03 |

ตารางผนวกที่ ค8 ผลการวัดความคลาดเคลื่อนโดยวิธีการวัดแบบการฉายจุดด้วยตาในฐานข้อมูล FVC2004DB1a ที่นำเสนอโดยวิทยานิพนธ์นี้

| Parameter | Criterion | Type of fingerprint | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|-------|-------|------|-------|--------|--------|
| | | Right | Left | Whorl | Twin | Arch | Tented | Total |
| Number of | Exist | 192 | 176 | 264 | 8 | 8 | 152 | 800 |
| Focal Point | Inexist | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Distance Error (DE), (Pixel) | $0 \leq DE \leq 5$ | 41 | 43 | 76 | 4 | 0 | 23 | 187 |
| | $5 < DE \leq 10$ | 80 | 81 | 119 | 4 | 0 | 36 | 320 |
| | $10 < DE \leq 15$ | 43 | 28 | 50 | 0 | 3 | 33 | 157 |
| | $15 < DE \leq 20$ | 7 | 12 | 7 | 0 | 3 | 26 | 55 |
| | $DE \geq 20$ | 21 | 12 | 12 | 0 | 2 | 34 | 81 |
| Statistical | Max | 36.38 | 46.32 | 63.38 | 8.22 | 52.30 | 125.93 | 125.93 |
| | Min | 2.12 | 2.73 | 2.84 | 5.25 | 14.64 | 3.43 | 2.12 |
| | Mean | 11.02 | 10.32 | 9.20 | 6.53 | 22.37 | 16.58 | 4.09 |
| | S.D. | 6.74 | 7.14 | 6.04 | 1.19 | 12.08 | 14.43 | 49.23 |

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

| | |
|--------------------------------|--|
| ชื่อ –นามสกุล | นายณัฐวัชร บุญชัยเสรี |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด | 6 พฤศจิกายน 2526 |
| สถานที่เกิด | เขตบางคอแหลม จังหวัดกรุงเทพมหานคร |
| ประวัติการศึกษา | วศ.บ. (ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน | นักศึกษาปริญญาโท และผู้ช่วยวิจัยประจำห้องวิจัย ประมวลผลสัญญาณ และภาพดิจิทัล |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน | ชั้น 8, ตึก 2, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ | - |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ | ทุน JON KEE และทุนสกว.เลขที่ RMU4980027 |