

บทที่ 13

วิธีการดำเนินการวิจัย และผลการวิจัย

การยืนยันหรือระบุตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ

การดำเนินการวิจัยและผลการวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ 1) การลงทะเบียนภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยอาศัยการจับคู่ของจุด minutiae ที่ได้นำเสนอไปข้างต้น โดยจะแสดงผลของการจับคู่ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid, affine, การแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น และภาพที่มีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป (occlusion) 2) การยืนยันภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยอาศัยวิธีการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่นำเสนอไป และการหาค่าความแตกต่างโดยอาศัยคุณลักษณะที่ได้จากวิธี DFB มาใช้ร่วมกับการหาค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุด โดยทำการทดลองกับฐานข้อมูลของภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่เก็บมา

13.1 การลงทะเบียนภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยอาศัยการจับคู่ของจุด minutiae

ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ใช้ในการทดลองส่วนนี้ เป็นภาพลายพิมพ์ของนิ้วหัวแม่มือที่ได้จากเครื่องสแกนลายพิมพ์นิ้วมือ รุ่น L SCAN 100R โดยมีความละเอียดเท่ากับ 500 พิกเซลต่อนิ้ว (pixels per inch: ppi) เพื่อให้ได้ภาพที่มีการแปลงทางเรขาคณิตที่แตกต่างกัน ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ได้จะผ่านกระบวนการประมวลผลภาพเพื่อหาตำแหน่งของ minutiae ก่อนที่จะทำการสร้างรูปสามเหลี่ยม ขั้นตอนการประมวลผลภาพประกอบด้วย การนอร์มอลไลซ์ภาพ การฟิลเตอร์ภาพ การหาโครงร่างของลายพิมพ์นิ้วมือ และการหาตำแหน่งของ minutiae โดยชนิดของ minutiae ที่นำมาใช้คือ จุดสิ้นสุด (ending) และจุดแยก (bifurcation)

การจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ จะดำเนินการตามขั้นตอนการจับคู่ของรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจาก minutiae ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 11.2 โดยหลังจากที่หาคู่ของสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันได้แล้ว จุดยอดของรูปสามเหลี่ยม ซึ่งคือ minutiae ที่สอดคล้องกันจะถูกนำมาหาค่าพารามิเตอร์ของการแปลงเพื่อนำไปใช้ในการลงทะเบียนภาพและจัดวางภาพที่ต้องการตรวจสอบให้ตรงกับภาพต้นฉบับ โดยมีการแสดงผลการหาคู่ของรูปสามเหลี่ยมและการจัดวางภาพ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid, affine, การแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น และภาพที่มีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป (occlusion)

13.1.1 ผลการจับคู่รูปสามเหลี่ยมในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid

คู่ของรูปสามเหลี่ยมระหว่างภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ที่ได้จาก

วิธีการจับคู่ที่นำเสนอในหัวข้อที่ 11.2.1 แสดงดังภาพที่ 13.1(a) และ 13.1(b) ตามลำดับ ภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งสองก่อนและหลังการจัดวางให้ตรงกัน แสดงดังภาพที่ 13.2(a) และ 13.2(b) ตามลำดับ

นอกจากนี้ มีการหาค่าความผิดพลาดของการจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือ จากค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่าง minutiae ที่อยู่ใกล้กันที่สุด (distance map error) ระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ถูกแปลงมา การหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนการจัดวางภาพทำได้โดย การจัดวางจุดศูนย์กลางของภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน โดยคำนวณหาจุดศูนย์กลางของภาพลายพิมพ์นิ้วมือได้จาก ridges ทั้งหมด จากนั้นคำนวณระยะห่างเฉลี่ยระหว่างตำแหน่ง minutiae ทั้งหมด ระหว่างภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการทดสอบ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพทั้งสองแสดงดังตารางที่ 13.1 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยหลังจากการจัดวางภาพทั้งสองมีค่าเท่ากับ 1.864% เมื่อเทียบกับขนาดของนิ้วมือ

13.1.2 ผลการจับคู่รูปสามเหลี่ยมในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine

ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine การหาคู่ของรูปสามเหลี่ยมจะอาศัยคุณลักษณะที่ไม่แปรผันต่อการแปลงแบบ affine ซึ่งได้มาจากรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจาก convex hull ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 11.2.2 รูปสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันของภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบแสดงดังภาพที่ 13.3(a) และ (b) ตามลำดับ การจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งสองให้ตรงกันแสดงดังภาพที่ 13.4 หลังการจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งสองให้ตรงกัน ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่าง minutiae ที่อยู่ใกล้กันที่สุด ระหว่างทั้งสองภาพก่อนและหลังการจัดวางภาพแสดงดังตารางที่ 13.2 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยหลังจากการจัดวางมีค่าเท่ากับ 2.575% เมื่อเทียบกับขนาดของนิ้วมือ



ภาพที่ 13.1 คู่ของรูปสามเหลี่ยมของภาพต้นฉบับ (a) และภาพที่ต้องการตรวจสอบ (b) ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid



(a)

(b)

ภาพที่ 13.2 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid

ตารางที่ 13.1 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ rigid

	ก่อนการจัดวางภาพ	หลังการจัดวางภาพ
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (นิ้ว)	0.041	0.018
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเทียบกับขนาดนิ้วมือ (%)	4.349	1.864

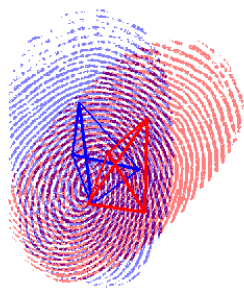


(a)



(b)

ภาพที่ 13.3 คู่ของรูปสามเหลี่ยมของภาพต้นฉบับ (a) และภาพที่ต้องการตรวจสอบ (b) ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine



(a)



(b)

ภาพที่ 13.4 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine

ตารางที่ 13.2 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบ affine

	ก่อนการจัดวางภาพ	หลังการจัดวางภาพ
ความผิดพลาดเฉลี่ย (นิ้ว)	0.084	0.015
ความผิดพลาดเฉลี่ยเทียบกับขนาดนิ้วมือ (%)	14.872	2.575

13.1.3 ผลการจับคู่สามเหลี่ยมกรณีภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ในขณะที่มีการเก็บภาพลายพิมพ์นิ้วมือ นิ้วมือที่กดลงบนเซนเซอร์ด้วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอ จะทำให้ได้ภาพลายพิมพ์ที่มีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่ ridges และ valleys บนภาพจะมีลักษณะชิดกันหรือห่างกันมากกว่าบนนิ้วมือจริง การจับคู่สามเหลี่ยมกระทำโดยอาศัยคุณลักษณะที่แสดงรูปร่างและขนาดของรูปสามเหลี่ยมร่วมกับคุณลักษณะที่ไม่แปรผันต่อการแปลง affine ดังที่นำเสนอในหัวข้อที่ 11.2.3 รูปสามเหลี่ยมที่เป็นคู่กันของภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบแสดงดังภาพที่ 13.5(a) และ (b) การจัดวางภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งสองให้ตรงกันแสดงดังภาพที่ 13.6 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่าง minutiae ที่อยู่ใกล้กันที่สุด ระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ต้องการตรวจสอบก่อนและหลังการจัดวางภาพแสดงดังตารางที่ 13.3 โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยหลังจากการจัดวางภาพทั้งสองมีค่าเท่ากับ 4.327% เมื่อเทียบกับขนาดของนิ้วมือ

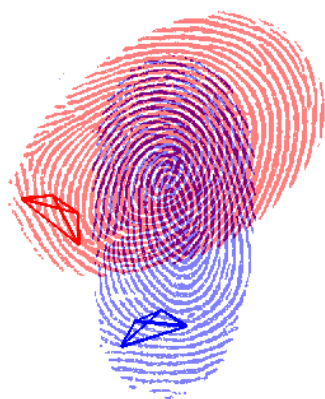


(a)



(b)

ภาพที่ 13.5 คู่ของรูปสามเหลี่ยมของภาพต้นฉบับ (a) และภาพที่ต้องการตรวจสอบ (b) ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น



(a)



(b)

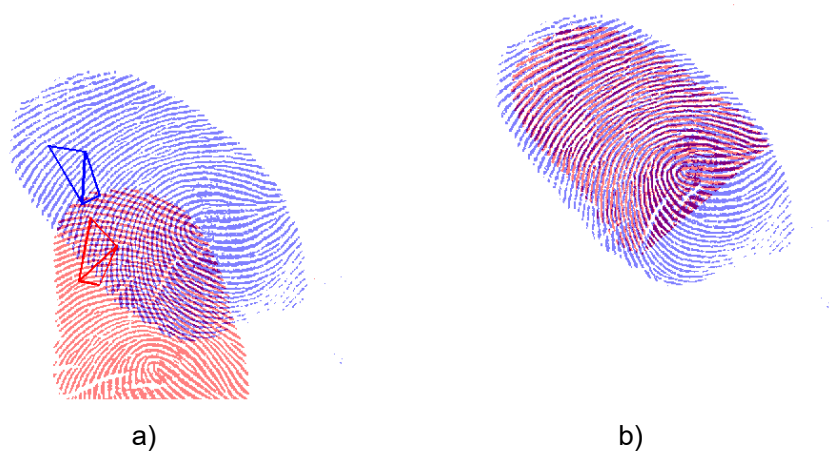
ภาพที่ 13.6 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 13.3 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น

	ก่อนการจัดวางภาพ	หลังการจัดวางภาพ
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (นิ้ว)	0.075	0.038
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเทียบกับขนาดนิ้วมือ (%)	8.672	4.327

13.1.4 ผลการจับคู่สามเหลี่ยมในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป (occlusion)

ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป คู่ของรูปสามเหลี่ยมที่หาได้จากวิธีการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือตามหัวข้อที่ 11.2.1 แสดงดังภาพที่ 13.7 นอกจากนี้ยังมีการใช้วิธีการจับคู่โดยอาศัยคุณลักษณะร่วมตามหัวข้อที่ 11.2.3 เพื่อหาคู่ของรูปสามเหลี่ยม โดยผลการจับคู่แสดงดังภาพที่ 13.8 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยหลังจากการจัดวางภาพทั้งสองมีค่าเท่ากับ 1.397% เมื่อเทียบกับขนาดของนิ้วมือ แสดงดังตารางที่ 13.4



ภาพที่ 13.7 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือนับแบบและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป ซึ่งได้จากการจับคู่โดยอาศัยคุณลักษณะที่แสดงรูปร่างและขนาดของรูปสามเหลี่ยม



ภาพที่ 13.8 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือนับแบบและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ก่อน (a) และหลัง (b) การจัดวางภาพให้ตรงกัน ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป ซึ่งได้จากการจับคู่โดยอาศัยคุณลักษณะร่วม ตามหัวข้อที่ 11.2.3

ตารางที่ 13.4 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยก่อนและหลังการจัดวางภาพต้นฉบับและภาพที่ต้องการตรวจสอบ ในกรณีที่ภาพที่ต้องการตรวจสอบมีบางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป

	ก่อนการจัดวางภาพ	หลังการจัดวางภาพ	
		การจับคู่โดยอาศัย คุณลักษณะรูปร่างและ ขนาดของสามเหลี่ยม	การจับคู่โดยอาศัย คุณลักษณะร่วม
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (นิ้ว)	0.048	0.011	0.010
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเทียบกับขนาดนิ้วมือ (%)	6.337	1.397	1.346

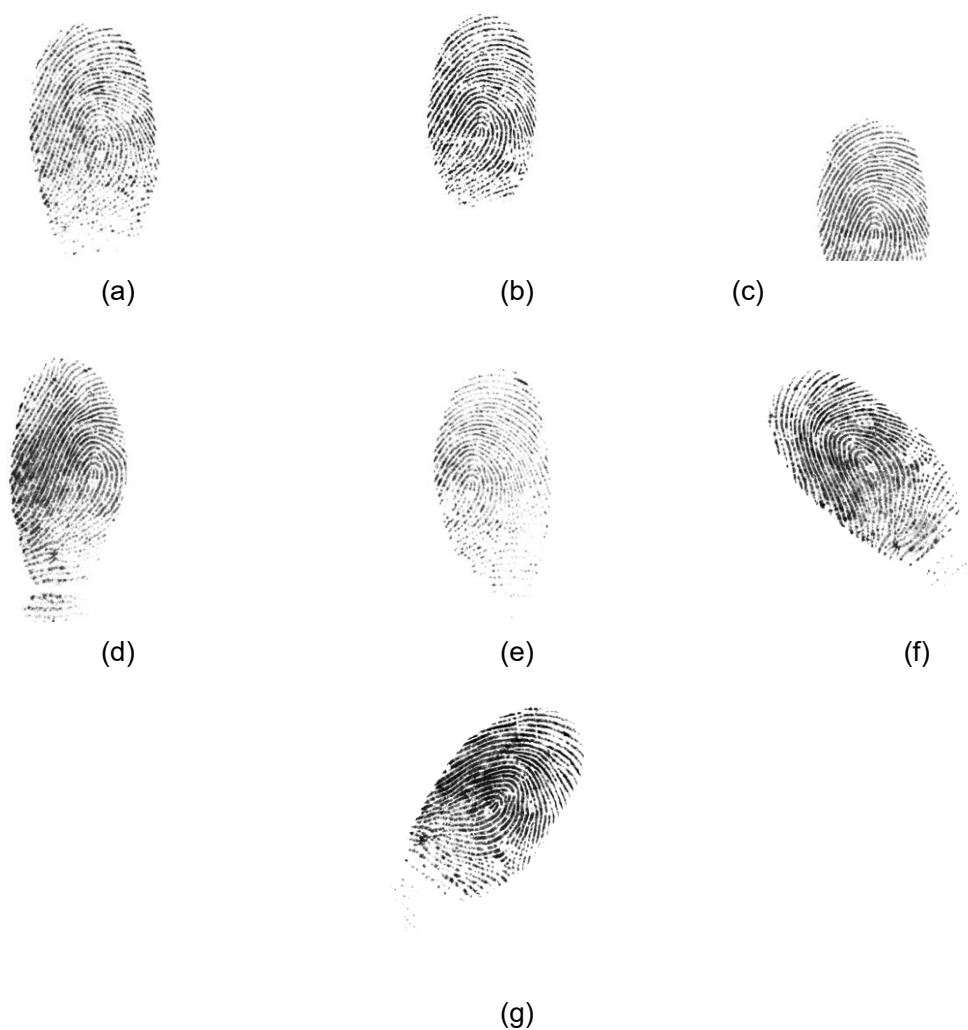
13.2 การยืนยันตัวบุคคลด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือ โดยอาศัยคุณลักษณะที่ร่วมซึ่งได้จากรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจาก minutiae

ฐานข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย ได้มาจากการเก็บภาพลายพิมพ์นิ้วมือของ นักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และนักศึกษาสาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จำนวน 40 คน โดยมีอายุอยู่ในช่วง 20-30 ปี และ 60% ของนักศึกษาเป็นผู้หญิง ในแต่ละคนจะมีการเก็บภาพลายพิมพ์นิ้วมือจากทั้งหมด 6 นิ้ว ได้แก่ นิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้ และนิ้วกลางของทั้งมือขวาและมือซ้าย โดยในแต่ละนิ้วมือจะมีการเก็บภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งหมด 7 ท่าทาง นั่นคือ 1) ภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับ โดยจะกำหนดให้วางนิ้วมือในแนวตั้งตรงและตั้งฉากกับเซนเซอร์ด้วยแรงกดปกติ 2) ภาพที่ได้จากการกดของนิ้วเบาๆ 3) ภาพที่บางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป 4) และ 5) ภาพที่ได้จากการกลิ้งนิ้วมือไปทางด้านข้าง (lateral roll) พร้อมกับแรงกดนิ้ว 6) และ 7) ภาพที่ได้จากการเอียงนิ้วมือ พร้อมกับแรงกดนิ้วโดยที่นิ้วมือเอียงอย่างอิสระ ด้วยมุมที่มากกว่าหรือเท่ากับ ± 45 องศา กระทำกับแนวตั้งของเซนเซอร์ ตัวอย่างภาพลายพิมพ์นิ้วมือแต่ละท่าทางแสดงดังภาพที่ 13.9 โดยขณะที่เก็บภาพลายพิมพ์นิ้วมือ ไม่ได้มีการทำความสะอาดเซนเซอร์เพลตอย่างมีระบบ จากภาพลายพิมพ์นิ้วมือในฐานข้อมูล มีทั้งภาพที่ได้จากนิ้วมือที่แห้งและชื้นเนื่องจากเหงื่อ ทำให้มีภาพรบกวนบนภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ได้

ดังนั้น จะได้ฐานข้อมูลที่ประกอบด้วยภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้งหมด 1680 ($40 \times 6 \times 7$) ภาพที่เก็บได้จากนิ้วมือ 240 นิ้ว โดยที่แต่ละภาพมีขนาด 620×620 พิกเซล ฐานข้อมูลนี้จะถูกนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ จากฐานข้อมูลจะได้ว่า จำนวนคู่ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่เป็นคู่กันจริง (genuine matches) มีค่าเท่ากับ 5,040 คู่ (คำนวณได้จาก คู่ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่เป็นไปได้ 21 คู่จากนิ้วเดียวกัน $\times 6$ นิ้วมือต่อคน $\times 40$ คน = 5,040) จำนวนคู่ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ไม่ได้เป็นคู่กัน (impostor matches) มีค่า

เท่ากับ 28,680 คู่ (คำนวณได้จาก การเปรียบเทียบภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับจากนิ้วที่แตกต่างกัน จำนวนคู่ที่เป็นไปได้คือ $(240 \times 239) / 2 = 28,680$)

ในการยืนยันภาพลายพิมพ์นิ้วมือ การจับคู่ภาพกระทำโดยการจับคู่ของรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจาก minutiae โดยอาศัยคุณลักษณะร่วมที่ไม่แปรผันสมบูรณ์ ตามที่นำเสนอในหัวข้อที่ 11.2.3 ถ้าสามารถหาคู่ของสามเหลี่ยมระหว่างภาพต้นฉบับกับภาพที่ต้องการตรวจสอบได้ ภาพที่ต้องการตรวจสอบจะถูกแปลงให้อยู่ในตำแหน่งพิกัดเดียวกับภาพต้นฉบับ โดยใช้พารามิเตอร์การแปลงที่คำนวณได้จาก minutiae ที่สอดคล้องเป็นคู่กัน จากนั้นทำการหาค่าความผิดพลาดรวม ($\tilde{E}$) ที่นำเสนอในหัวข้อที่ 12.2 ซึ่งหาได้จากค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างจุดและค่าความแตกต่าง



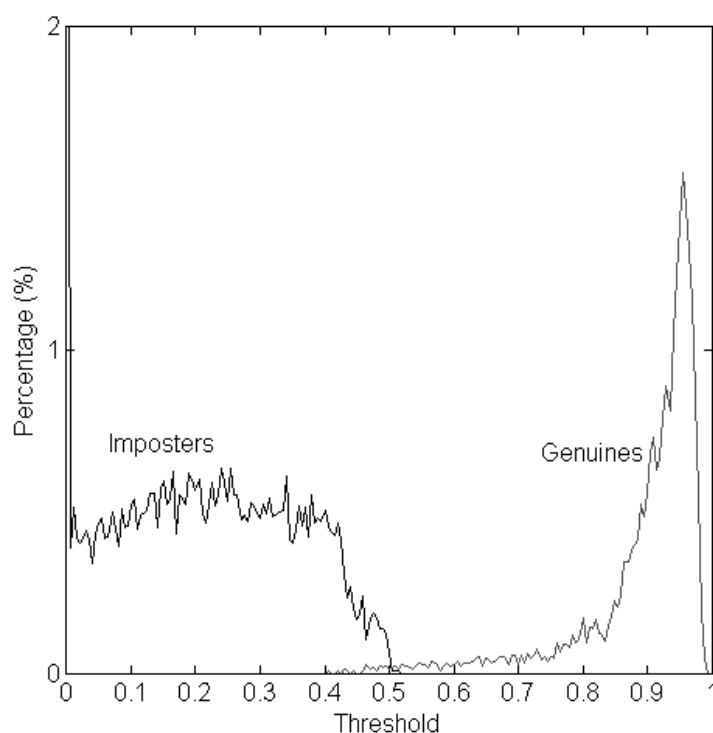
ภาพที่ 13.9 ภาพลายพิมพ์นิ้วมือทั้ง 7 ท่าทาง (a) ภาพลายพิมพ์นิ้วมือต้นฉบับ โดยจะกำหนดให้วางนิ้วมือในแนวตั้งตรงและตั้งฉากกับเซนเซอร์ด้วยแรงกดปกติ (b) ภาพที่ได้จากการกดของนิ้วเบาๆ (c) ภาพที่บางส่วนของลายพิมพ์นิ้วมือขาดหายไป (d) และ (e) ภาพที่ได้จากการกลิ้งนิ้วมือไปทางด้านข้าง (lateral roll) พร้อมกับแรงกดนิ้ว (f) และ (g) ภาพที่ได้จากการเอียงนิ้วมือ พร้อมกับแรงกดนิ้ว โดยที่นิ้วมือเอียงอย่างอิสระ ด้วยมุมที่มากกว่าหรือเท่ากับ ± 45 องศา กระทำกับแนวตั้งของเซนเซอร์

จากคุณลักษณะที่ได้จากวิธี DFB โดยที่แต่ละค่าความผิดพลาดจะถ่วงน้ำหนักด้วยค่าแฟคเตอร์เท่ากับ 0.5 ท้ายที่สุดจะมีการแปลงค่าความผิดพลาดรวมไปเป็นคะแนนการจับคู่ (matching score) แสดงดังสมการที่ 13.1

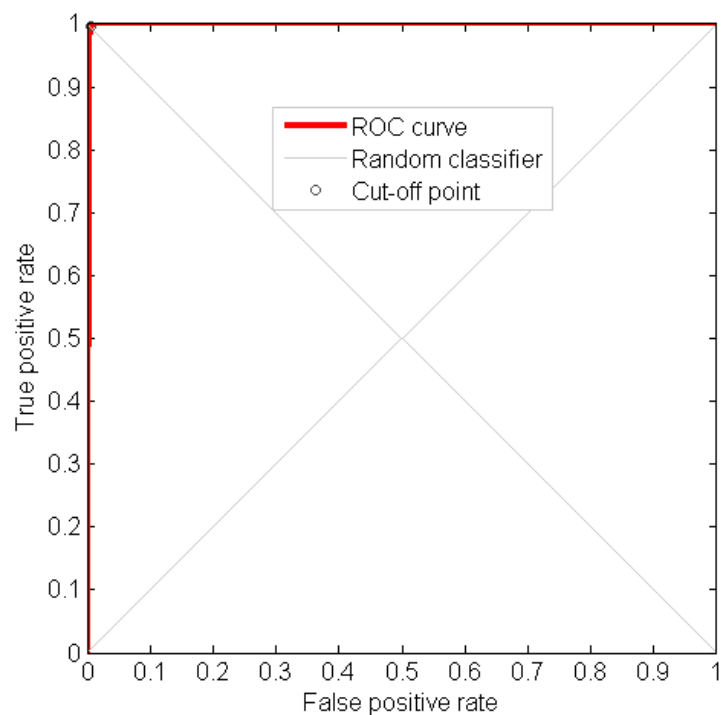
$$\tilde{S} = 1 - (\tilde{E}/100) \quad (13.1)$$

โดยที่ $\tilde{S}$ คือ คะแนนการจับคู่ และ $\tilde{E}$ คือ ค่าความผิดพลาดรวม ซึ่งคำนวณได้สมการที่ 11.8

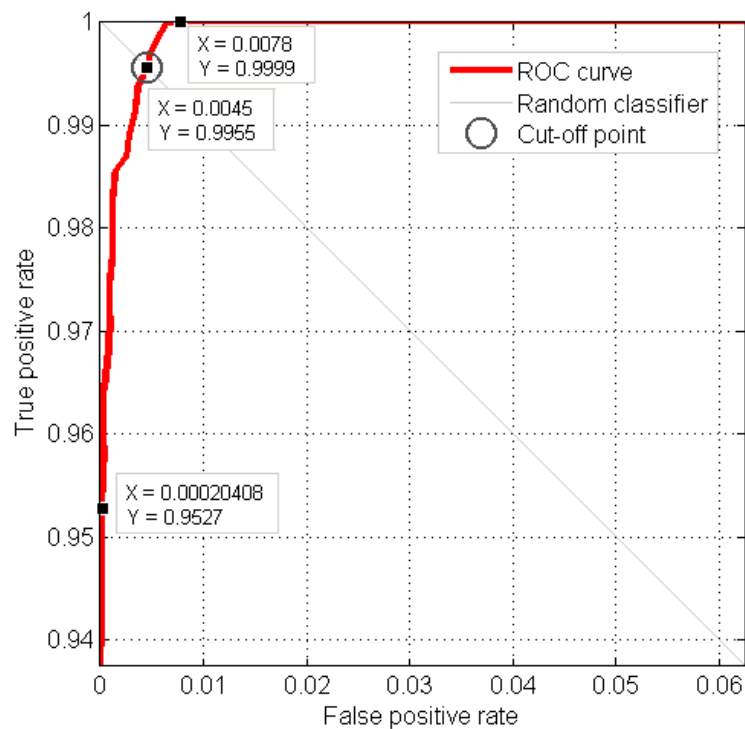
หลังจากนั้น นำคะแนนการจับคู่ที่ได้จากการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่เป็นคู่กันจริง และที่ได้จากการจับคู่ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ไม่ได้เป็นคู่กัน มาสร้างฮิสโตแกรมการกระจายของคะแนนการจับคู่ แสดงดังภาพที่ 13.10 จากการกระจายที่ได้ สามารถสร้างกราฟ ROC (receiver operating characteristic) ดังภาพที่ 13.11 และภาพขยายของกราฟ ROC แสดงดังภาพที่ 13.12 พื้นที่ใต้กราฟมีค่าเท่ากับ 0.99967 จากภาพที่ 13.10 พบว่าค่าระดับกัน (ที่ฮิสโตแกรมทั้งสองตัดกัน) ของ Bayesian classifier เท่ากับ 0.505 ค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดเฉลี่ย (average probability of error) ที่ค่าระดับกันนี้ มีค่าเท่ากับ 0.713%



ภาพที่ 13.10 ฮิสโตแกรมการกระจายของคะแนนการจับคู่ ของคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่เป็นคู่กันจริง และคู่ของภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่ไม่ได้เป็นคู่กัน แกนนอนคือค่าระดับกันของคะแนนการจับคู่

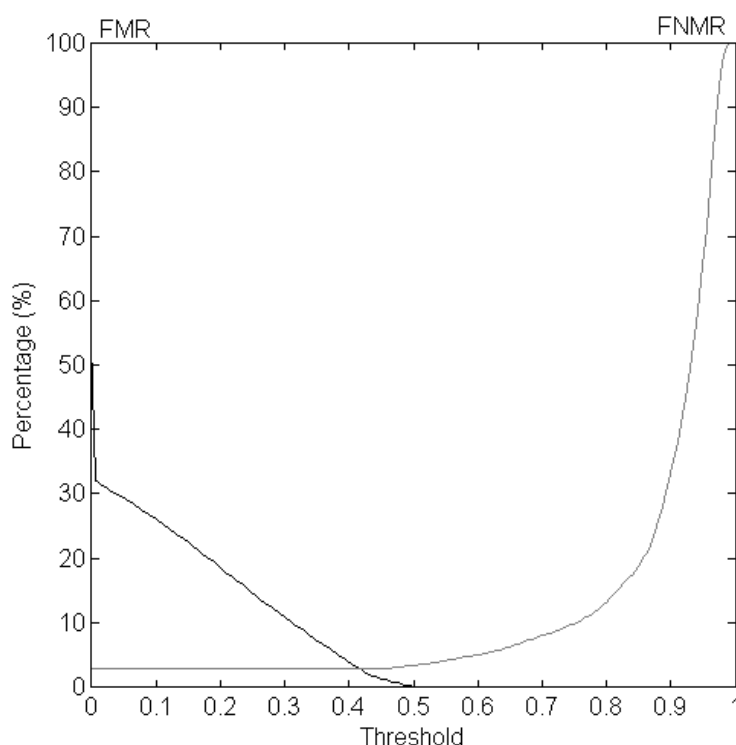


ภาพที่ 13.11 กราฟ ROC (receiver operating characteristic) เครื่องหมายวงกลมแสดงตำแหน่งของเส้นแบ่งที่ตัดกับกราฟ

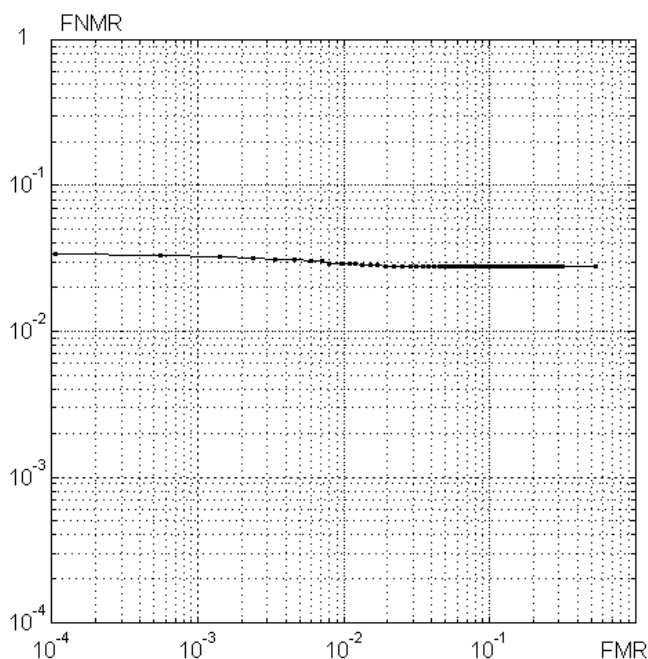


ภาพที่ 13.12 ภาพขยายของกราฟ ROC รูปสี่เหลี่ยมที่ภายในวงกลมแสดงตำแหน่งของเส้นแบ่งที่ตัดกับกราฟ

นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่นำเสนอตามวิธีการประเมินที่กำหนดไว้ใน Fingerprint Verification Competition (FVC) [29] ผลที่ได้ประกอบด้วย กราฟ False Match Rate (FMR) และ False Non-Match Rate (FNMR) ที่แสดงความผิดพลาดของอัลกอริทึมการจับคู่ที่ค่าระดับกันต่างๆ จาก 0 ถึง 1 แสดงดังภาพที่ 13.13 โดยที่ False Match Rate (FMR) เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่มาจากคนละนิ้ว แต่อัลกอริทึมให้ผลว่ามาจากนิ้วเดียวกัน ส่วน False Non-Match Rate (FNMR) เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือที่มาจากนิ้วเดียวกัน แต่อัลกอริทึมให้ผลว่าภาพทั้งสองมาจากคนละนิ้วกัน จากกราฟได้ค่าอัตราความผิดพลาดเฉลี่ยสมดุล (Equal Error Rate: EER) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เท่ากับ $2.68 \pm 0.18\%$ โดยถือว่าการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือแต่ละคู่ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน [77], [78] โดยที่ค่าระดับกันที่จุด EER มีค่าเท่ากับ 0.420 กราฟที่พล็อตระหว่าง FMR และ FNMR เรียกว่า Detection-Error Tradeoff (DET) curve แสดงดังภาพที่ 13.14



ภาพที่ 13.13 กราฟ False Match Rate (FMR) และ False Non-Match Rate (FNMR) ที่แสดงความผิดพลาดของอัลกอริทึมการจับคู่ที่ค่าระดับกันต่างๆ จาก 0 ถึง 1



ภาพที่ 13.14 กราฟที่พล็อตระหว่าง FMR และ FNMR (Detection-Error Tradeoff (DET) curve)

การเปรียบเทียบผลของการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับอัลกอริทึมอื่นๆ ดังนี้ วิธีมาตรฐานที่ใช้คุณลักษณะที่ได้จาก minutiae ในการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ [53], วิธีที่ใช้คุณลักษณะ DFB ที่เป็นที่รู้จัก [65] และวิธีที่ใช้รูปสามเหลี่ยมรวมกับการจำลองการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ Radial Basis Function (RBF) [79] แสดงดังตารางที่ 13.5 และ 13.6 จากตารางแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมที่นำเสนอมีค่า FNMR ต่ำกว่าค่า FNMR ของวิธีอื่นๆ โดยเปรียบเทียบกันที่ค่า FMR ที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 13.5 การเปรียบเทียบผลของการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับอัลกอริทึมอื่นที่ค่า FMR เท่ากับ 0.14% โดยประมาณ

อัลกอริทึมการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ	False Match Rate (%)	False Non-Match Rate (%)
วิธีมาตรฐานที่ใช้คุณลักษณะที่ได้จาก minutiae [53]	0.16	11.23
วิธีที่ใช้รูปสามเหลี่ยมรวมกับการจำลองการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ Radial Basis Function (RBF) [79]	0.18	8.48
อัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	0.14	3.27

ตารางที่ 13.6 การเปรียบเทียบผลของการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอ กับ อัลกอริทึมอื่นที่ค่า FMR เท่ากับ 1.09% โดยประมาณ

อัลกอริทึมการจับคู่ภาพลายพิมพ์นิ้วมือ	False Match Rate (%)	False Non-Match Rate (%)
วิธีที่ใช้คุณลักษณะ DFB ที่เป็นที่รู้จัก [65]	1.07	7.87
อัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้	1.09	2.89