



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: ขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมืออัตโนมัติ
Automatic Fingerprint Verification Algorithm

โดย ผศ.ดร.วุฒิพงศ์ อารีกุล

มิถุนายน 2548

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: ขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมืออัตโนมัติ
Automatic Fingerprint Verification Algorithm

ผู้วิจัย

ผศ.ดร.วุฒิพงศ์ อารีกุล

สังกัดภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาแห่งชาติที่ได้ให้ทุนวิจัยสนับสนุนเพื่อพัฒนาศักยภาพอาจารย์ ทำให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสทำงานวิจัยอย่างเต็มที่ ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย “ระบบไบโอเมตริกและฮาร์ดแวร์ประมวลผลภาพดิจิทัล ระยะที่ 2 และ 3” ที่สามารถทำงานต่อ ยอดไปถึงระดับต้นแบบทางอุตสาหกรรมได้ ขอขอบคุณ ศ.ดร. สวัสดิ์ ตันตระรัตน์ นักวิจัยพี่เลี้ยงที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำและ สละเวลาแก้ไขบทความต่าง ๆ ในอดีต นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณผู้ช่วยนักวิจัย อุกฤษฏ์ วัชรฤทธิ์ ผู้ช่วยนักวิจัย กิตติวัฒน์ ศุภศรีวิสุทธิเศรษฐ์ ผู้ช่วยนักวิจัย สุขสันต์ จิระเฉวง ผู้ช่วยนักวิจัย ธิติษฎ์ ลีลาสวัสดิ์สุข ที่ได้ช่วยพัฒนาเขียนโปรแกรมทำงานตามความคิดของข้าพเจ้า และร่วมกันแก้ปัญหาซึ่งให้ได้มาถึงขั้นตอนวิธีตรวจสอบลายนิ้วมือของคนไทย และทำให้ได้มาซึ่งผลงานวิจัยต่าง ๆ ในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทีมงานนักวิจัย ห้องวิจัยประมวลสัญญาณและภาพเกษตรศาสตร์ (Kasetsart Signal & Image Processing Laboratory (KSIP Lab) <http://www.ksip.ee.ku.ac.th>) ทุกท่านที่อาจไม่ได้กล่าวชื่อ แต่ได้สนับสนุนทั้งทางตรงและโดยทางอ้อมต่อโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้

บทคัดย่อ

Project Code : MRG4680171

ชื่อโครงการ : ขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมืออัตโนมัติ

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน : วุฒิพงศ์ อารีกุล ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail Address : fengvpa@ku.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 กรกฎาคม พ.ศ.2546 ถึง 30 มิถุนายน พ.ศ.2548

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์คือเพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมืออัตโนมัติให้เป็นของไทย โดยงานวิจัยนี้จะเน้นการพัฒนาขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดส่วนหนึ่งในขั้นตอนวิธีตรวจสอบลายนิ้วมือที่มีผลโดยตรงกับความถูกต้องของระบบ งานวิจัยนี้ได้คิดค้นวิธีการใหม่ในการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือด้วยตัวกรองกาเบอ์ โดยขั้นตอนวิธีนี้ สามารถทำการปรับปรุงลายนิ้วมือได้เร็วกว่าและมีประสิทธิภาพดีกว่าเดิม โดยได้ทำการทดสอบกับฐานข้อมูลลายนิ้วมือมาตรฐานทั้งหมดจากการแข่งขันขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมือ สุดท้ายนี้ผลงานวิจัยจะนำไปใช้ในระบบไบโอเมตริกและฮาร์ดแวร์ตรวจสอบลายนิ้วมือต้นแบบของไทยเพื่อลดการนำเข้าและสร้างความเข้มแข็งให้อุตสาหกรรมไทยในอนาคตอันใกล้

คำหลัก : ขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมืออัตโนมัติ ขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ การปรับปรุงลายนิ้วมือด้วยตัวกรองกาเบอ์แบบแบ่งแยกได้

Abstract

Project Code : MRG4680171

Project Title : Automatic Fingerprint Verification Algorithm

Investigator : Vutipong Areekul, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

E-mail Address : fengvpa@ku.ac.th

Project Period : 1 July 2003 – 30 June 2005

The goal of this research project is to develop Thai automatic fingerprint identification algorithm. In this research, fingerprint enhancement algorithm, which is one of the most important parts of fingerprint identification process, is focused in order to improve the quality of fingerprint, resulting in higher accuracy of the system. The new way to implement fingerprint enhancement using Gabor filtering is introduced. The improved fingerprint enhancement algorithm performs faster with better quality of enhancement, comparing with a traditional fingerprint enhancement, using all standard Fingerprint Verification Competition (FVC) databases. Finally, the results of this research will be used in Thai biometric system and Thai fingerprint verification hardware prototype in order to reduce import biometric products and strengthened Thai industries in the near future.

Keywords : Automatic Fingerprint Identification Algorithm, Fingerprint Enhancement Algorithm, Fingerprint Enhancement Using Separable Gabor Filter.

1. บทนำ

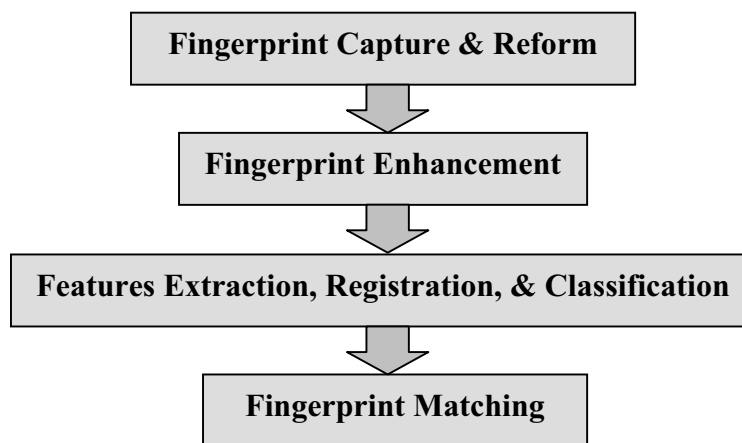
การใช้ลายนิ้วมือในการแสดงเอกลักษณ์ของมนุษย์แต่ละบุคคลมีความสำคัญมากขึ้นเป็นลำดับตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากไม่มีมนุษย์คนใดที่มีลายนิ้วมือที่เหมือนกันแม้แต่ฝาแฝด ลายนิ้วมือจึงถูกใช้ในการตรวจหาอาชญากร และถูกใช้เป็นหลักฐานที่เชื่อถือได้ทางกฎหมายมาเป็นเวลากว่าร้อยปีแล้ว ปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากลายนิ้วมือนั้นวันจะแพร่หลายมากขึ้นนอกจากจะใช้ในการตรวจหาผู้กระทำความผิดทางกฎหมายแล้ว ได้ถูกพัฒนาให้ใช้สำหรับการทำฐานข้อมูลบุคคล การตรวจสอบผู้ตาย การตรวจสอบผู้เข้าถึงระบบต่าง ๆ ที่สำคัญหรือที่เป็นส่วนตัว อาทิเช่น การเข้าถึงสถานที่ทำงาน หรือสถานที่ลับเฉพาะสำหรับกลุ่มบุคคลที่ได้รับอนุญาตเท่านั้น การเข้าถึงบัญชีธนาคารผ่านอินเทอร์เน็ต (Online Verification) การเข้าและขับขี่ยานต์ส่วนบุคคล การใช้โทรศัพท์มือถือ และอื่น ๆ อีกมาก

เทคโนโลยีทางการตรวจสอบเอกลักษณ์ทางชีวภาพปัจจุบันยังเป็นเทคโนโลยีที่มีการแข่งขันสูง ปกปิดและเป็นลิขสิทธิ์ของต่างชาติทั้งหมด เป็นที่น่าวิตกเป็นอย่างยิ่งว่าในอนาคต ประเทศไทยจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในระบบการป้องกันความปลอดภัยในลักษณะนี้โดยนำเข้าอุปกรณ์เกี่ยวกับระบบการตรวจสอบลายนิ้วมือจากต่างประเทศ และนับวันจะเพิ่มปริมาณมากขึ้น เนื่องจากความสะดวกในการเข้าถึงระบบที่ต้องการรักษาความปลอดภัยและความลับต่าง ๆ โดยไม่ต้องมีกุญแจ บัตร หรือแม้กระทั่งการจํารหัสผ่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเข้าถึงธนาคารหรือร้านค้าต่าง ๆ ผ่านทางอินเทอร์เน็ต จำเป็นต้องรักษาความปลอดภัยให้กับข้อมูลของลูกค้าและต้องการอำนวยความสะดวกให้แก่ลูกค้าในเวลาเดียวกัน การตรวจสอบเอกลักษณ์บุคคลผู้เข้าถึงข้อมูลทางอินเทอร์เน็ตจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ และเป็นเทคโนโลยีที่จะถูกนำมาใช้อย่างแน่นอน

การพัฒนาและวิจัยระบบไบโอเมตริกเป็นงานวิจัยที่ยังเป็นที่นิยมอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากมีปัญหาในการใช้งานจริง เนื่องจากลายนิ้วมือมีการบิดเบี้ยวตามลักษณะการกด การแตกแห้งตามลักษณะของผิวของแต่ละบุคคล รวมทั้งอากาศ การสัมผัสกับตัวกราดตรวจที่เปียกชื้นนั้นจากนิ้วหรือฝุ่นละอองต่าง ๆ ทำให้งานวิจัยทางด้านนี้ยังคงแก้ปัญหากันต่อไป อีกมาก สำหรับการตรวจเอกสารงานวิจัยทางการตรวจสอบลายนิ้วมือ ปัจจุบันงานวิจัยทางด้านนี้ยังคงมีการนำเสนออย่างต่อเนื่องและมีการแข่งขันสูงมากเนื่องจากการใช้งานเริ่มแพร่หลายและตลาดที่กว้างขวาง จากหนังสือตำราเกี่ยวกับการรู้จำลายนิ้วมือ [1] ได้กล่าวไว้ในบทนำอย่างชัดเจนว่า ถึงแม้งานวิจัยทางการตรวจสอบลายนิ้วมือจะมีต่อเนื่องมามากกว่า 40 ปีแล้ว ปัญหาของการทำกรู้จำแบบรูปลายนิ้วมือยังคงเป็นปัญหาต่อไปดังที่กล่าวไว้ตอนต้น ไม่ใช่ปัญหาที่ได้รับการแก้ไขและสำเร็จเรียบร้อยแล้วอย่างที่คนส่วนมากเข้าใจ ขั้นตอนวิธีใหม่ ๆ ยังคงจะมีการนำเสนอทางการประชุมวิชาการและวารสารวิชาการนานาชาติอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าผลิตภัณฑ์การตรวจสอบลายนิ้วมือได้ออกสู่ตลาดเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว ปัญหาของขั้นตอนวิธี (Algorithm) ก็ยังคงมีอยู่ จะเห็นได้ชัดจากที่มีการจัดการแข่งขัน Fingerprint Verification Competition มาทั้งหมด 3 ครั้งแล้ว ในปี ค.ศ. 2000, 2002, และ 2004 โดยเรียกย่อ ๆ ว่า FVC2000 [2], FVC2002 [3], และ FVC2004 [4] โดยเปิดโอกาสให้ทั้งบริษัท มหาวิทยาลัย และหน่วยงานต่าง ๆ ทั่วโลก เข้าร่วมส่งโปรแกรมเข้าแข่งขันโดยไม่จำเป็นต้องเปิดเผยข้อมูลที่เป็นความลับ เมื่อแข่งขันเสร็จแล้วจะเปิดเผยฐานข้อมูลลายนิ้วมือที่ใช้สู่สาธารณะ ซึ่งทำให้สามารถทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลกับการแข่งขันได้

2 ขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมือ

ขั้นตอนวิธี (Algorithm) ในการเปรียบเทียบลายนิ้วมือ ได้ถูกแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ตามรูปที่ 2.1 ซึ่งจะประกอบด้วยขั้นตอนวิธีการเก็บลายนิ้วมือ (Fingerprint Capture & Reform) ขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Enhancement) ขั้นตอนวิธีการดึงข้อมูลรายละเอียดสำคัญ การลงทะเบียน และการแบ่งกลุ่ม (Feature Extraction, Registration, and Classification) และขั้นตอนสุดท้ายคือ การเทียบคู่ลายนิ้วมือ (Fingerprint Matching)



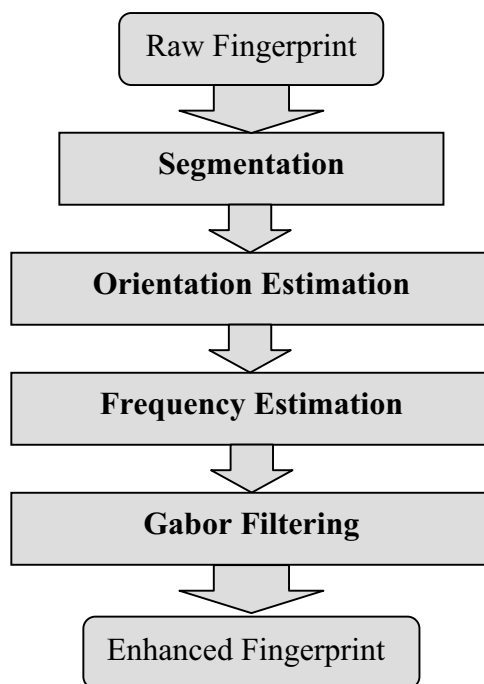
รูปที่ 2 1 โครงสร้างบล็อกของขั้นตอนวิธีการเปรียบเทียบลายนิ้วมือ

ในแต่ละขั้นตอนวิธีตามโครงสร้างบล็อก จะประกอบด้วยขั้นตอนวิธีย่อยหลายขั้นตอนวิธี ซึ่งจะมีทั้งวิธีที่ปรากฏอยู่ตามเอกสารอ้างอิง และถูกนำมาเรียบเรียงเขียนเป็นโปรแกรมตามความเข้าใจของนักวิจัย หรือเป็นแนววิธีการที่คิดค้นขึ้นใหม่ ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ จะเน้นหนักทางด้านการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Enhancement) เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากลายพิมพ์นิ้วมือจากเซ็นเซอร์หรือตัวรับภาพลายนิ้วมือหลาย ๆ แบบในปัจจุบัน มีปัญหาแตกต่างกันไป โดยเฉพาะกับสภาพลายนิ้วมือที่แห้ง เปียก และคราบรอยฝุ่นหรือรอยลายนิ้วมือเก่า

3. ขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ

การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือเป็นขั้นตอนวิธีที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากคุณภาพของลายนิ้วมือที่เข้ามามีความแตกต่างกันมากไม่ว่าจะเป็นเซ็นเซอร์แบบใดก็ตาม จะมีปัญหาหากหรือน้อย โดยทั่วไปถ้ามีความแห้งก็จะทำให้แตกและไม่ต่อเนื่อง และถ้ามีความชื้นหรือเปียกซึ่งจะทำให้เส้นลายนิ้วมือขยายตัวเชื่อมติดกัน รวมทั้งการบิดเบี้ยวและผิดเพี้ยนจากลายนิ้วมือที่ยึดหยุ่นทำให้รูปแบบลายนิ้วมือเปลี่ยนไป ทำให้การตรวจสอบลายนิ้วมือเป็นไปด้วยความยากลำบากและเกิดความผิดพลาดได้ง่าย

วัตถุประสงค์หลักในการทำการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ คือ การปรับภาพลายนิ้วมือให้มีคุณภาพใกล้เคียงกัน ลดสัญญาณรบกวน และเพิ่มความชัดเจนให้กับการหาลักษณะเด่น อาทิเช่น จุดมินูเทียร์หรือจุดโฟกัส ขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือที่พัฒนาใช้อยู่ในปัจจุบัน ใช้ตัวกรองกาเบอร์ (Gabor Filter) เป็นพื้นฐานในการปรับปรุงภาพ [5] หรือใช้ตัวกรองแบบอื่น ๆ ทางเชิงพื้นที่ [6] แต่มีขั้นตอนวิธีบางวิธีไม่ต้องการการทำ Fingerprint Enhancement โดยเน้นการเข้าหา ลักษณะเด่นโดยตรง อาทิเช่น ใช้วิธีการไล่ตามเส้นลายนิ้วมือโดยตรง (Direct Gray Scale) [7] สำหรับงานวิจัยนี้ จะเน้นการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือโดยใช้ตัวกรองกาเบอร์เป็นหลัก ฟังก์ชันของขั้นตอนการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือที่ใช้ในการทดลองนี้ แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1 โดยมีขั้นตอนวิธีย่อย ซึ่งประกอบด้วย การแบ่งแยกภาพ (Segmentation) การหาทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ (Orientation Estimation) การหาความถี่ของลายนิ้วมือ (Frequency Estimation) การกรองด้วยกาเบอร์ (Gabor Filtering). โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1. โครงสร้างการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ

3.1) การแบ่งแยกภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Segmentation)

การแบ่งแยกภาพลายนิ้วมือ เป็นการแยกภาพลายนิ้วมือกับพื้นหลังหรือคราบสกปรกต่าง ๆ ที่เป็นสัญญาณรบกวนและไม่ชัดเจน โดยทั่วไปแล้ว วิธีการนี้มีพื้นฐานคือการแบ่งลายนิ้วมือออกเป็นบล็อก และทำการวิเคราะห์แต่ละบล็อกว่าควรจะพิจารณาว่าเป็นลายนิ้วมือหรือไม่ แต่ก็อาจมีขั้นตอนวิธีอื่นที่ไม่จำเป็นต้องทำในลักษณะการแบ่งเป็นบล็อกก็ได้ สำหรับขั้นตอนวิธีหรืออัลกอริทึมที่แก้ปัญหการแบ่งแยกภาพลายนิ้วมือ ได้มีทั้งวิธีที่คิดค้นโดยผู้อื่นและทาง KSIP Lab เอง โดยสรุปขั้นตอนวิธีต่าง ๆ ที่ได้ทำการวิจัยทางด้านการแบ่งแยกภาพลายนิ้วมือสรุปเป็นดังตารางที่ 3.1 โดยมีทั้งหมด 4 วิธีที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น รายละเอียดของแต่ละวิธีจะแสดงในตารางที่ 3.1-1 ถึง ตารางที่ 3.1-4 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหการแบ่งแยกภาพลายนิ้วมือ

(Table 3.2 Fingerprint Segmentation Algorithm)

#	Algorithm	Concept	Details in Table	Reference
1	วิธีทางสถิติ (Statistics Method)	ทดสอบจากค่า Mean และ Variance	3.1-1	[8]
2	วิธีทางฮิสโตแกรม (Histogram Method)	หา Histogram ของภาพลายนิ้วมือ โดยคาดว่า จะเป็นโมเดลของภูเขาสองลูก หาค่า Threshold ที่ระหว่างกลาง	3.1-2	KSIP Lab
3	วิธีทางการตรวจวัดระดับความแน่นอนของทิศทาง (Orientation Certainty Level Method)	ตรวจสอบความแน่นอนของทิศทางโดยดูจาก ความเข้มข้นของ Gradient ในสมการ CL ของ A.K. Jain เป็นตัวชี้วัด	3.1-3	[9]
4	วิธีทางความสอดคล้องของทิศทาง (Orientation Coherence Method)	พิจารณาความสอดคล้องของทิศทาง โดยมีสมการของ Bazén เป็นตัวชี้วัด	3.1-4	[10]

ตารางที่ 3.1-1 รายละเอียดขั้นตอนวิธีการแบ่งภาพทางสถิติ (Statistics Method)

Algorithm	Fingerprint Segmentation Using Statistics Method
Problem	การเลือกพื้นที่ที่เป็นลายนิ้วมือและไม่ใช่ลายนิ้วมือ มีปัญหาโดยเฉพาะลายนิ้วมือที่แห้ง แดง หรือเปื่อยกินไป รวมทั้งคราบลายนิ้วมือเก่าด้วย
Method	1. แบ่งภาพลายนิ้วมือออกเป็นบล็อกย่อยขนาด 16×16 2. ทำการหาค่าเฉลี่ย M และความแปรปรวน VAR ของภาพในแต่ละบล็อกย่อย 3. ตัดสินใจว่าบล็อกนั้นเป็นบริเวณลายนิ้วมือหรือไม่ โดยตั้งสมมุติฐานไว้ว่า ภาพลายนิ้วมือจะมีค่าความแปรปรวนสูง และมีค่าเฉลี่ยปานกลาง จากสมมุติฐานข้างต้น บล็อกที่จะเป็นบริเวณลายนิ้วมือนั้น จะต้องมีความเฉลี่ย $M_{\max} > M > M_{\min}$ และ ความแปรปรวน $VAR > VAR_{\min}$ 4. ทำการลบบล็อกบริเวณฉากหลังที่พื้นพื้นน้อย (จำนวนบล็อกที่อยู่ติดกันน้อยกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน) ออกไป
Advantage	ขั้นตอนวิธีไม่ซับซ้อน
Disadvantage	ไม่สามารถใช้ได้กับฐานข้อมูลลายนิ้วมือที่มีคุณภาพต่างกันมาก ๆ เนื่องจากเงื่อนไขที่นำมาใช้ยังไม่เพียงพอ
Reference	วรารกร คำแก้ว, “การประมวลผลภาพสำหรับการรู้จำลายนิ้วมือ”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พ.ศ. 2543

ตารางที่ 3.1-2 รายละเอียดขั้นตอนวิธีการแบ่งภาพทางฮิสโตแกรม (Histogram Method)

Algorithm	Fingerprint Segmentation Using Histogram Method
Problem	การเลือกพื้นที่ที่เป็นลายนิ้วมือและไม่ใช่ลายนิ้วมือ มีปัญหาโดยเฉพาะลายนิ้วมือที่แห้ง แดง หรือเปื่อยกินไป รวมทั้งคราบลายนิ้วมือเก่าด้วย
Method	1. ทำการหาฮิสโตแกรมของภาพลายนิ้วมือ 2. ปรับฮิสโตแกรมให้มีความเรียบและต่อเนื่องมากขึ้น โดยเฉลี่ยฮิสโตแกรมด้วยหน้าต่างขนาด M 3. ตรวจสอบจุดยอด (Local Maxima) ทั้งหมดในฮิสโตแกรมนี้ 4. หาค่าขีดเริ่มเปลี่ยนในการแปลงภาพลายนิ้วมือให้เป็นภาพสองระดับ โดยแบ่งเป็นกรณีดังนี้ - กรณีที่ฮิสโตแกรมนี้มีจุดยอด 2 จุด ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนจะเท่ากับ จุดกึ่งกลางของจุดยอดทั้งสอง - กรณีที่ฮิสโตแกรมนี้ไม่มีจุดยอด ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนจะเท่ากับ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของภาพ - กรณีที่ฮิสโตแกรมนี้มีเพียง 1 จุดยอด ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนจะเท่ากับ จุดเริ่มโค้งขึ้น หรือ จุดเริ่มโค้งลงของจุดยอด (เงื่อนไขนี้ยังไม่ชัดเจนและสมเหตุสมผลมากนัก ผู้ช่วยวิจัย กิตติวัฒน์กำหนดไว้จากการทดลองกับฐานข้อมูล FVC 2000 Db2) 5. ทำภาพลายนิ้วมือให้เป็นภาพสองระดับ 6. แบ่งภาพสองระดับออกเป็นบล็อกย่อยขนาด 16×16 7. ทำการหาค่าเฉลี่ย M และความแปรปรวน VAR ของภาพสองระดับในแต่ละบล็อกย่อย 8. ตัดสินใจว่าบล็อกนั้นเป็นบริเวณลายนิ้วมือหรือไม่ โดยตั้งสมมุติฐานไว้ว่า ภาพลายนิ้วมือจะมีค่าความแปรปรวนสูง และมีค่าเฉลี่ยปานกลาง จากสมมุติฐานข้างต้น บล็อกที่จะเป็นบริเวณลายนิ้วมือนั้น จะต้องมีความเฉลี่ย $M_{\max} > M > M_{\min}$ และ ความแปรปรวน $VAR > VAR_{\min}$ 9. ทำการลบบล็อกบริเวณฉากหลังที่พื้นพื้นน้อย (จำนวนบล็อกที่อยู่ติดกันน้อยกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน) ออกไป
Advantage	1. รู้สภาพของรูปลายนิ้วมือว่ามีความจางหรือเข้ม มากน้อยเพียงใด 2. เป็นการปรับภาพทำให้ส่วนของลายนิ้วมือเป็นสีดำและพื้นหลังเป็นสีขาว ทำให้การทำ Segmentation สะดวกมากขึ้น
Disadvantage	1. เป็นวิธีการก่อนทำการแบ่งแยกลายนิ้วมือด้วยวิธีทางสถิติทำให้ใช้เวลามากขึ้นกว่าปกติ
Reference	KSIP Lab Original Idea

ตารางที่ 3.1-3 รายละเอียดขั้นตอนวิธีการแบ่งภาพโดยพิจารณาจากความระดับความแน่นอนของทิศทาง

(Orientation Certainty Level Method)

Algorithm	Fingerprint Segmentation Using Orientation Certainty Level Method
Problem	การเลือกพื้นที่ที่เป็นลายนิ้วมือและไม่ใช่ลายนิ้วมือ มีปัญหาโดยเฉพาะลายนิ้วมือที่แห้ง แตก หรือเปื่อยเกินไป รวมทั้งคราบลายนิ้วมือเก่าด้วย
Method	- แบ่งภาพลายนิ้วมือออกเป็นบล็อกย่อยขนาด $w \times w$ 16×16 - คำนวณหาเกรเดียนต์เวกเตอร์ $[G_x \ G_y]$ ของแต่ละจุดภาพในแต่ละบล็อก โดยใช้ Kirch Operator - คำนวณหาค่า V_x, V_y และ V_e ในแต่ละบล็อก ดังสมการต่อไปนี้ $V_x = \sum_u \sum_v 2G_x(u,v)G_y(u,v)$ $V_y = \sum_u \sum_v (G_x^2(u,v) - G_y^2(u,v))$ $V_e = \sum_u \sum_v (G_x^2(u,v) + G_y^2(u,v))$ - คำนวณหาค่าระดับความแน่นอนของทิศทาง (Certainty Level CL) ดังสมการต่อไปนี้ $CL = \sqrt{\frac{1}{w \times w} \frac{V_x^2 + V_y^2}{V_e}}$ - ถ้าค่าระดับความแน่นอนของทิศทาง CL มีค่าสูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน จะกำหนดให้บล็อกนั้นเป็นบริเวณลายนิ้วมือ
Advantage	ขั้นตอนวิธีไม่ซับซ้อน
Disadvantage	ขั้นตอนวิธีนี้ใช้ไม่ได้ในบริเวณที่มีสัญญาณรบกวนสูง
Reference	A.K. Jain, L. Hong, S. Pankanti, R. Bolle, "An Identity-Authentication System Using Fingerprints", Proceeding of the IEEE, Volume: 85 Issue: 9, September 1997, Page(s): 1365-1388.

ตารางที่ 3.1-4 รายละเอียดขั้นตอนวิธีการแบ่งภาพโดยพิจารณาจากความสอดคล้องกันของทิศทาง

(Coherence Orientation Method)

Algorithm	Fingerprint Segmentation Using Coherence Orientation Method
Problem	การเลือกพื้นที่ที่เป็นลายนิ้วมือและไม่ใช่ลายนิ้วมือ มีปัญหาโดยเฉพาะลายนิ้วมือที่แห้ง แตก หรือเปื่อยกินไป รวมทั้งคราบลายนิ้วมือเก่าด้วย
Method	- คำนวณหาเกรเดียนต์เวกเตอร์ $[G_x \ G_y]$ ของแต่ละจุดภาพ โดยใช้ Kirch Operator ถ้าค่า G_x มีค่าน้อยกว่าศูนย์ จะทำการกลับเครื่องหมายของ G_x และ G_y (ดังนั้นค่า G_x จะมีค่าเป็นบวกเสมอ) - คำนวณเกรเดียนต์เวกเตอร์เฉลี่ย $[\overline{G_{sx}} \ \overline{G_{sy}}]$ ของแต่ละจุดภาพ ในหน้าต่าง W (ในการเฉลี่ยจะทำการหาค่ามุมของเกรเดียนต์เวกเตอร์ให้เป็นสองเท่า และยกกำลังสองค่าขนาดของเกรเดียนต์เวกเตอร์ ก่อนจึงจะทำการเฉลี่ยเพื่อจะกำจัดผลของความไม่ต่อเนื่องของทิศทาง (ที่ 0 องศา และ 359 องศา) และทำให้การเฉลี่ยค่าทิศทางถูกต้อง) โดยเวกเตอร์เฉลี่ยจะมีค่าดังสมการต่อไปนี้ $\begin{bmatrix} \overline{G_{sx}} \\ \overline{G_{sy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx} - G_{yy} \\ 2G_{xy} \end{bmatrix}$ $G_{xx} = \sum_W G_x^2$ $G_{yy} = \sum_W G_y^2$ $G_{xy} = \sum_W G_x G_y$ - คำนวณหาค่าความสอดคล้องกันของทิศทาง (Coherence Coh) ของแต่ละจุดภาพ ตามสมการต่อไปนี้ $Coh = \frac{\sqrt{(G_{xx} - G_{yy})^2 + 4G_{xy}^2}}{G_{xx} + G_{yy}}$ - ถ้าค่าความสอดคล้องกันของทิศทาง Coh มีค่าสูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน จะกำหนดให้จุดภาพนั้นเป็นบริเวณลายนิ้วมือ
Advantage	สามารถแบ่งแยกบริเวณได้ในระดับจุดภาพ และสามารถใช้ร่วมกับขั้นตอนวิธีประมาณทิศทางของเส้นลายนิ้วมือได้
Disadvantage	ใช้เวลาประมวลผลนาน
Reference	A.M. Bazen and S.H. Gerez, "Systematic Methods for the Computation of the Directional Fileds and Singular Points of Fingerprint", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume: 24 Issue: 7, July 2002, Page(s): 905-919.

3.2) การหาทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ (Orientation Estimation)

หลังจากการแบ่งบล็อกและทำการกำหนดว่าบล็อกใดเป็นลายนิ้วมือและบล็อกใดไม่เป็น จากขั้นตอนวิธีการทำ Segmentation ในขั้นตอนต่อไป จะเป็นขั้นตอนวิธีการหาทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ โดยเป็นการพยายามกำหนดทิศทางของแต่ละบล็อกที่เป็นลายนิ้วมือเพื่อที่จะได้ทำการกรองโดยใช้ตัวกรองให้ถูกทิศทาง ปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในการตรวจหาทิศทางคือ ความไม่ชัดเจนของลายนิ้วมือที่แห้ง หรือความทึบต่อเนื่องของลายนิ้วมือที่เปียก รวมทั้งคราบสกปรกต่าง ๆ ที่เป็นสัญญาณรบกวนและไม่ชัดเจน ขั้นตอนวิธีต่าง ๆ ที่ได้ลองทำขึ้นตามขั้นตอนที่มีการตีพิมพ์รวมทั้งคิดค้นขึ้นเองจากการวิจัย สรุปได้ 3 ขั้นตอนวิธีดังตารางที่ 3.2 และรายละเอียดดังตารางที่ 3.2-1 ถึง ตารางที่ 3.2-3 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาค่าทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ

(Table 3.2 Orientation Field Estimation Algorithm)

#	Algorithm	Concept	Details in Table	Reference
1	วิธีทางเกรเดียนต์ของ Hong (Hong's Gradient Based)	โดยการหา Gradient ของทิศทางของเส้นลายนิ้วมือในภาพที่แบ่งย่อย	3.2-1	[5]
2	วิธีทางเกรเดียนต์ของ Bazen (Bazen's Gradient Based)	โดยการหา Gradient ของทิศทางของเส้นลายนิ้วมือในระดับจุดภาพแล้วเฉลี่ย	3.2-2	[10]
3	วิธีทางความสอดคล้องของทิศทาง (Average Coherence Gradient Based)	พิจารณาความสอดคล้องของทิศทาง โดยมีสมการของ Bazen เป็นตัวชี้วัด	3.2-3	KSIP Lab

ตารางที่ 3.2-1 รายละเอียดขั้นตอนวิธีหาทิศทางลายนิ้วมือทางเกรเดียนต์ของ Hong (Hong's Gradient Method)

Algorithm	Orientation Estimation Based on Hong's Gradient
Problem	การหาทิศทางเส้นลายนิ้วมือในกรณีที่ลายนิ้วมือแห้ง (รอยไม่ต่อเนื่อง) เปียก (รอยติดกันเป็นปื้น) และมีคราบรอยเก่าหรือคราบเหงื่อ
Method	- แบ่งภาพลายนิ้วมือออกเป็นบล็อกย่อยขนาด $w \times w$ 16×16 - คำนวณหาเกรเดียนต์เวกเตอร์ $[G_x \ G_y]$ ของแต่ละจุดภาพในแต่ละบล็อก โดยใช้ Kirch Operator - ประมาณทิศทางของเกรเดียนต์เวกเตอร์เฉลี่ย θ ในแต่ละบล็อก ดังสมการต่อไปนี้ $V_x = \sum_u \sum_v 2G_x(u,v)G_y(u,v)$ $V_y = \sum_u \sum_v (G_x^2(u,v) - G_y^2(u,v))$ $\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{V_x}{V_y} \right)$ - ทำการเฉลี่ยค่าทิศทางในแต่ละบล็อกใหม่ โดยแปลงทิศทางประมาณให้อยู่ในรูปของ Continuous Vector Field Φ_x และ Φ_y ดังสมการต่อไปนี้ $\Phi_x = \cos(2\theta)$ $\Phi_y = \sin(2\theta)$ แล้วทำการกรองให้ค่า Φ'_x และ Φ'_y ด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านขนาด 5×5 บล็อก - คำนวณหาทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ θ จากสมการต่อไปนี้ $\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\Phi'_y}{\Phi'_x} \right) + \frac{1}{2} \pi$ <u>หมายเหตุ</u> สมการข้างต้นนี้อาจจะไม่ตรงกับสมการในบทความอ้างอิง เนื่องจากสมการในบทความมีข้อผิดพลาด
Advantage	เนื่องจากประมวลผลในระดับบล็อก จึงมีความซับซ้อนน้อย
Disadvantage	ทิศทางในบริเวณจุดเอกฐานมักจะผิดพลาด (เกิดจากการ Smooth)
Reference	L. Hong, Y. Wan, and A.K. Jain, "Fingerprint Image Enhancement; Algorithm and Performance Evaluation", IEEE Transactions on PAMI, vol. 20, No. 8, pp. 777-789, August 1998.

ตารางที่ 3.2-2 รายละเอียดขั้นตอนวิธีหาทิศทางลายนิ้วมือทางเกรเดียนต์ของ Bazen (Bazen's Gradient Method)

Algorithm	Orientation Estimation Based on Bazen's Gradient
Problem	การหาทิศทางเส้นลายนิ้วมือในกรณีที่ลายนิ้วมือแห้ง (รอยไม่ค่อยเนื่อง) เปียก (รอยติดกันเป็นปื้น) และมีคราบรอยเก่าหรือคราบเหงื่อ
Method	- คำนวณหาเกรเดียนต์เวกเตอร์ $[G_x \ G_y]$ ของแต่ละจุดภาพ โดยใช้ Kirch Operator ถ้าค่า G_x มีค่าน้อยกว่าศูนย์ จะทำการกลับเครื่องหมายของ G_x และ G_y (ดังนั้นค่า G_x จะมีค่าเป็นบวกเสมอ) - คำนวณเกรเดียนต์เวกเตอร์เฉลี่ย $[\overline{G_{xx}} \ \overline{G_{yy}}]$ ของแต่ละจุดภาพ ในหน้าต่าง W (ในการเฉลี่ยจะทำการเพิ่มค่ามุมของเกรเดียนต์เวกเตอร์ให้เป็นสองเท่า และยกกำลังสองค่าขนาดของเกรเดียนต์เวกเตอร์ ก่อนจึงจะทำการเฉลี่ยเพื่อจะกำจัดผลของความไม่ต่อเนื่องของทิศทาง (ที่ 0 องศา และ 359 องศา) และทำให้การเฉลี่ยค่าทิศทางถูกต้อง) โดยเวกเตอร์เฉลี่ยจะมีค่าดังสมการต่อไปนี้ $\begin{bmatrix} \overline{G_{xx}} \\ \overline{G_{yy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx} - G_{yy} \\ 2G_{xy} \end{bmatrix}$ โดยที่ $G_{xx} = \sum_W G_x^2$, $G_{yy} = \sum_W G_y^2$, $G_{xy} = \sum_W G_x G_y$ - คำนวณหามุมของเวกเตอร์เกรเดียนต์เฉลี่ย Φ (ซึ่งจะตั้งฉากกับทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ) ดังสมการต่อไปนี้ $\Phi = \frac{1}{2} \angle(G_{xx} - G_{yy}, 2G_{xy})$ - คำนวณหาทิศทางเฉลี่ยของเส้นลายนิ้วมือ θ ดังสมการต่อไปนี้ $\theta = \begin{cases} \Phi + \frac{1}{2}\pi, & \Phi \leq 0 \\ \Phi - \frac{1}{2}\pi, & \Phi > 0 \end{cases}$
Advantage	คำนวณหาทิศทางได้ในระดับจุดภาพ
Disadvantage	ใช้เวลาประมวลผลนานเนื่องจากทำการเฉลี่ยในระดับจุดภาพ
Reference	A.M. Bazen, S.H. Gerez, "Systematic Methods for the Computation of the Directional Fields and Singular Points of Fingerprint", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume: 24 Issue: 7, July 2002, Page(s): 905-919.

ตารางที่ 3.2-3 รายละเอียดขั้นตอนวิธีการประมาณทิศทางโดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยความสอดคล้องกันของทิศทาง

Algorithm	Orientation Estimation Based on Average Coherence Gradient
Problem	การหาทิศทางเส้นลายนิ้วมือในกรณีที่ลายนิ้วมือแห้ง (รอยไม่ต่อเนื่อง) เปียก (รอยติดกันเป็นปื้น) และมีคราบรอยเก่าหรือคราบเหงื่อ
Method	1. คำนวณหาเกรเดียนต์เวกเตอร์ $[G_x \ G_y]$ ของแต่ละจุดภาพ โดยใช้ Kirch Operator ถ้าค่า G_x มีค่าน้อยกว่าศูนย์ จะทำการกลับเครื่องหมายของ G_x และ G_y (ดังนั้นค่า G_x จะมีค่าเป็นบวกเสมอ) 2. คำนวณเกรเดียนต์เวกเตอร์เฉลี่ย $[\overline{G_{xx}} \ \overline{G_{yy}}]$ ของแต่ละจุดภาพ ในหน้าต่าง W (ในการเฉลี่ยจะทำการเพิ่มค่ามุมของเกรเดียนต์เวกเตอร์ให้เป็นสองเท่า และยกกำลังสองค่าขนาดของเกรเดียนต์เวกเตอร์ ก่อนจึงจะทำการเฉลี่ยเพื่อจะกำจัดผลของความไม่ต่อเนื่องของทิศทาง (ที่ 0 องศา และ 359 องศา) และทำให้การเฉลี่ยค่าทิศทางถูกต้อง) โดยเวกเตอร์เฉลี่ยจะมีค่าดังสมการต่อไปนี้ $\begin{bmatrix} \overline{G_{xx}} \\ \overline{G_{yy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx} - G_{yy} \\ 2G_{xy} \end{bmatrix}$ โดยที่ $G_{xx} = \sum_W G_x^2$ $G_{yy} = \sum_W G_y^2$ $G_{xy} = \sum_W G_x G_y$ 3. คำนวณหาค่าความสอดคล้องกันของทิศทาง (Coherence Coh) ของแต่ละจุดภาพ ตามสมการต่อไปนี้ $Coh = \frac{\sqrt{(G_{xx} - G_{yy})^2 + 4G_{xy}^2}}{G_{xx} + G_{yy}}$ 4. ทำการเฉลี่ยค่าเกรเดียนต์เวกเตอร์ใหม่โดยถ่วงน้ำหนักด้วยค่าความสอดคล้องกันของทิศทาง $[\overline{G'_{xx}} \ \overline{G'_{yy}}]$ ดังสมการต่อไปนี้ $\begin{bmatrix} \overline{G'_{xx}} \\ \overline{G'_{yy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G'_{xx} - G'_{yy} \\ 2G'_{xy} \end{bmatrix}$ โดยที่ $G'_{xx} = \sum_W G_{xx} \cdot Coh$, $G'_{yy} = \sum_W G_{yy} \cdot Coh$, $G'_{xy} = \sum_W G_{xy} \cdot Coh$ 5. คำนวณหามุมของเวกเตอร์เกรเดียนต์เฉลี่ย Φ (ซึ่งจะตั้งฉากกับทิศทางของเส้นลายนิ้วมือ) ดังสมการต่อไปนี้ $\Phi = \frac{1}{2} \angle(G'_{xx} - G'_{yy}, 2G'_{xy})$ 6. คำนวณหาทิศทางเฉลี่ยของเส้นลายนิ้วมือ θ ดังสมการต่อไปนี้ $\theta = \begin{cases} \Phi + \frac{1}{2}\pi & , \Phi \leq 0 \\ \Phi - \frac{1}{2}\pi & , \Phi > 0 \end{cases}$
Advantage	วิธีนี้จะให้ทิศทางในระดับจุดภาพที่มีความต่อเนื่องสูง
Disadvantage	ใช้เวลาประมวลผลนานมากเนื่องจากทำการเฉลี่ยในระดับจุดภาพ
Reference	KSIP Lab Original Idea

3.3) การหาความถี่ร่องลายนิ้วมือ (Ridge Frequency Estimation)

หลังจากการจำแนก ล็อกลายนิ้วมือและการหาทิศทางลายนิ้วมือในบล็อกเรียบร้อยแล้ว จะทำการหาความถี่เพื่อที่จะกำหนดตัวกรองแบบแถบความถี่ผ่านหรือ Bandpass Filter ได้ โดยหลักของตัวกรองคาบอร์หรือแบบอื่น ๆ จะทำการกรองแบบความถี่ต่ำ (Lowpass Filter) ในทิศทางเดียวกับเส้นลายนิ้วมือเพื่อทำการเชื่อมต่อเส้น และทำการกรองแบบ Bandpass Filter ในทิศทางที่ตั้งฉากกับเส้นลายนิ้วมือ ปัญหาที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับวิธีอื่น ๆ ทั่วไปคือ ความไม่ชัดเจนของลายนิ้วมือที่แห้ง หรือความทึบต่อเนื่องของลายนิ้วมือที่เปียก รวมทั้งการสกรปกรต่าง ๆ ที่เป็นสัญญาณรบกวนและไม่ชัดเจน ขั้นตอนวิธีต่าง ๆ ที่ได้ลองทำขึ้นตามขั้นตอนที่มีการตีพิมพ์รวมทั้งคิดค้นขึ้นเองจากการวิจัย สรุปได้ 2 ขั้นตอนวิธีดังตารางที่ 3.3 และรายละเอียดดังตารางที่ 3.3-1 ถึง ตารางที่ 3.3-2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาความถี่ของเส้นลายนิ้วมือ

(Table 3.3 Ridge Frequency Estimation Algorithm)

#	Algorithm	Concept	Details in Table	Reference
1	วิธีทางโดเมนพื้นที่ของ Hong (Hong's Spatial Domain)	โดยการหา Signature ของทางแนวตั้งฉากกับเส้นลายนิ้วมือและทำการหาความถี่	3.3-1	[5]
2	วิธีทางการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform Based)	โดยการแปลงไปทาง Frequency Domain ด้วย FFT แล้วหา Impulse Peak เพื่อตรวจหาค่าความถี่	3.3-2	KSIP Lab

ตารางที่ 3.3-1 รายละเอียดขั้นตอนวิธีการประมาณความถี่เส้นลายนิ้วมือของ Hong (Hong's Spatial Domain Method)

Algorithm	Ridge Frequency Estimation Based on Spatial Domain by Hong
Problem	การหาความถี่เส้นลายนิ้วมือในกรณีที่ลายนิ้วมือแห้ง (รอยไม่ต่อเนื่อง) เปียก (รอยติดกันเป็นปื้น) และมีคราบรอยเก่าหรือคราบเหงื่อ
Method	- แบ่งภาพลายนิ้วมือออกเป็นบล็อกย่อย 16×16 - ในแต่ละบล็อก ซึ่งมีจุดศูนย์กลางที่ (i, j) สร้าง หน้าต่างขนาด $l \times w$ (32×16) โดยมีจุดศูนย์กลางเดียวกับจุดศูนย์กลางของบล็อกย่อย และมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของลายนิ้วมือในบล็อกย่อยนั้นๆ - คำนวณหา ซิกเนเจอร์เฉลี่ย $X[0], X[1], \dots, X[l-1]$ จากสมการต่อไปนี้ $X[k] = \frac{1}{w} \sum_{d=0}^{w-1} G(u, v) \quad , k = 0, 1, \dots, l-1$ $u = i + (d - \frac{w}{2}) \cos O(i, j) + (k - \frac{l}{2}) \sin O(i, j)$ $v = j + (d - \frac{w}{2}) \sin O(i, j) + (\frac{l}{2} - k) \cos O(i, j)$ โดยที่ G คือ ภาพลายนิ้วมือ และ O ภาพทิศทางของลายนิ้วมือในแต่ละบล็อก จากขั้นตอนนี้จะได้ ซิกเนเจอร์เฉลี่ย ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของเส้นลายนิ้วมียาว 32 จุด และใช้ซิกเนเจอร์เฉลี่ยนี้เป็นตัวแทนของสัญญาณในบล็อกย่อยนั้นๆ - ประมาณค่าความถี่ของซิกเนเจอร์ ซึ่งอาจคำนวณได้จากส่วนกลับของระยะจากจุดยอดถึงอีกจุดยอดหนึ่ง (วิธีนี้ได้ทดลองแล้ว ปรากฏว่าความถี่ที่ได้มักจะสูงกว่าความเป็นจริง) หรืออาจนำซิกเนเจอร์ที่ได้ไปแปลงฟูเรียร์แบบเร็วและคำนวณหาขนาดของสัญญาณ (Magnitude) จากนั้นหาความถี่ที่เด่นที่สุด โดยทั่วไป ภาพลายนิ้วมือที่ความละเอียด 500 dpi นั้น ลายนิ้วมือจะมีความอยู่ในช่วง $[\frac{1}{3}, \frac{1}{25}]$ หากความถี่ที่คำนวณได้นั้นมีค่าอยู่นอกช่วงนี้ ถือว่าไม่น่าเชื่อถือ อาจจะมีสัญญาณรบกวนมาก ในบล็อกนั้นๆ จะถือยังประมาณค่าความถี่ไม่ได้และกำหนดค่าไว้เป็น -1 - ในบล็อกซึ่งยังประมาณความถี่ไม่ได้นั้น จะทำการประมาณความถี่ใหม่โดยใช้วิธี Interpolation ด้วย Gaussian Kernel ขนาด 7×7 บล็อก - ทำการกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อให้ความถี่ที่ประมาณได้มีความต่อเนื่องกัน
Advantage	ความถี่ที่ประมาณ ได้จากสัญญาณแนวตั้งฉากกับทิศทางเส้นลายนิ้วมือที่ประมาณได้
Disadvantage	-
Reference	L. Hong, Y. Wan, and A.K. Jain, "Fingerprint Image Enhancement; Algorithm and Performance Evaluation", IEEE Transactions on PAMI, vol. 20, No. 8, pp. 777-789, August 1998.

ตารางที่ 3.3-2 รายละเอียดขั้นตอนวิธีการประมาณความถี่เส้นลายนิ้วมือ โดยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform Method)

Algorithm	Ridge Frequency Estimation Based on Fast Fourier Transform Method
Problem	การหาความถี่เส้นลายนิ้วมือในกรณีที่ลายนิ้วมือแห้ง (รอยไม่ต่อเนื่อง) เปียก (รอยติดกันเป็นปื้น) และมีคราบรอยเก่าหรือคราบเหงื่อ
Method	- แบ่งภาพลายนิ้วมือออกเป็นบล็อกย่อย $N \times N$ (32×32 เพื่อให้ครอบคลุมเส้นลายนิ้วมืออย่างน้อย 2-3 เส้น) ซึ่งมีจุดศูนย์กลางที่ (i, j) - ในแต่ละบล็อกย่อย แปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และคำนวณหา ขนาดของสัญญาณ (Magnitude) - หาพิกัดของสเปกตรัมที่มีขนาดสูงที่สุดในแต่ละบล็อก (u, v) จากนั้นคำนวณค่าความถี่ของสเปกตรัมสูงสุด f จากสมการดังนี้ $f = d \times w_0 \quad w_0 = \frac{1}{N}$ $d = \sqrt{(u - i)^2 + (v - j)^2}$ โดยทั่วไป ภาพลายนิ้วมือที่ความละเอียด 500 dpi นั้น ลายนิ้วมือจะมีความอยู่ในช่วง $[\frac{1}{3}, \frac{1}{25}]$ หากความถี่ที่คำนวณได้นั้นมีค่าอยู่นอกช่วงนี้ ถือว่าไม่น่าเชื่อถือ อาจจะมีสัญญาณรบกวนมาก ในบล็อกนั้นๆ จะถือว่าประมาณค่าความถี่ไม่ได้และกำหนดค่าไว้เป็น -1 - ในบล็อกซึ่งยังประมาณความถี่ไม่ได้นั้น จะทำการประมาณความถี่ใหม่โดยใช้วิธี Interpolation ด้วย Gaussian Kernel ขนาด 7×7 บล็อก - แบ่งบล็อกย่อยใหม่ให้มีขนาด $n \times n$ (16×16) ในแต่ละบล็อกย่อยนี้กำหนดให้มีค่าความถี่ประมาณเท่ากับค่าความถี่ของบล็อกใหญ่ขนาด 32×32 - ทำการกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อให้ความถี่ที่ประมาณได้มีความต่อเนื่องกัน
Advantage	-
Disadvantage	- มีความซับซ้อนสูง เนื่องจากต้องแปลงฟูเรียร์ ความถี่ที่ประมาณได้อาจจะผิดพลาดได้ง่ายเนื่องจากวิเคราะห์ค่าความถี่สูงสุด - ความถี่ที่ประมาณ อาจจะไม่ตรงกับทิศทางของเส้นลายนิ้วมือที่ประมาณได้ เนื่องจากตรวจสอบหาสเปกตรัมสูงสุดโดยตรง
Reference	KSIP Lab Original Idea

3.4) การกรองด้วยตัวกรองกาเบอร์ (Gabor Filtering)

หลังจากการแบ่งบล็อก ทำการกำหนดว่าบล็อกใดเป็นลายนิ้วมือ รวมทั้งหาทิศทางและความถี่ในแต่ละบล็อกเรียบร้อยแล้ว ก็ถึงวิธีการทำการกรองด้วยตัวกรองกาเบอร์ ซึ่งจะมีหลายแบบที่ได้ออกมาพัฒนาขึ้นมาใหม่ และกับของเก่าเพื่อใช้แก้ปัญหา ปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในการตรวจหาทิศทางคือ ความไม่ชัดเจนของลายนิ้วมือที่แห้ง หรือความทึบต่อเนื่องของลายนิ้วมือที่เปียก รวมทั้งคราบสกปรกต่าง ๆ ที่เป็นสัญญาณรบกวนและไม่ชัดเจน ขั้นตอนวิธีต่าง ๆ ที่ได้ลองทำขึ้นตามขั้นตอนที่มีการตีพิมพ์รวมทั้งคิดค้นขึ้นเองจากการวิจัย สรุปได้ 4 ขั้นตอนวิธีใหญ่ดังตารางที่ 3.4 และรายละเอียดดังตารางที่ 3.4-1 ถึง ตารางที่ 3.4-4 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.4 ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการกรองด้วยตัวกรองกาเบอร์

(Table 3.4 Gabor Filtering Algorithm)

#	Algorithm	Concept	Details in Table	Reference
1	ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติ แบบ 8 ทิศทาง (Conventional 2-D Gabor with 8 Orientations)	เป็นวิธีต้นแบบ โดยการทำกรองด้วยตัวกรองกาเบอร์แบบสองมิติ โดยต้องทำคอนโวลูชันสองมิติ และมีทิศทางทั้งหมดแปดทิศทาง	3.4-1	[1]
2	ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติ แบบทิศทางจริง (Conventional 2-D Gabor with Any Orientations)	พัฒนาจากวิธีต้นแบบ โดยการทำกรองด้วยตัวกรองกาเบอร์แบบสองมิติ และทิศทางตามความเป็นจริง	3.4-2	KSIP Lab
3	ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบ 8 ทิศทาง (กรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านก่อน) (Separable 2-D Gabor with 8 Orientations, Bandpass First)	คิดค้นวิธีแบ่งแยกกาเบอร์ออกเป็นมิติเดียว โดยกำหนดให้ใช้ 8 ทิศทางตามวิธีที่ 1 ทำให้การทำงานเร็วกว่าเดิม โดยการผ่านตัวกรองแถบความถี่ก่อน	3.4-3	KSIP Lab [7]
	3.1) ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบ 8 ทิศทาง (กรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านก่อน) (Separable 2-D Gabor with 8 Orientations, Lowpass First)	เหมือนกับวิธีที่ 3 แต่ผ่าน Lowpass Filter ก่อน	-	KSIP Lab
	3.2) ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบ 8 ทิศทาง และ มีการผสานบล็อกที่มีทิศทางเดียวกันเข้าด้วยกัน (กรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านก่อน) (Separable 2-D Gabor with 8 Orientations plus Merging Uniform Orientation, Lowpass First)	เหมือนกับวิธีที่ 3 แต่รวมบล็อกย่อยที่มีทิศทางเดียวกันเข้าด้วยกัน เพื่อให้เร็วขึ้น	-	KSIP Lab
4	ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบทิศทางจริง (กรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านก่อน) (Separable 2-D Gabor with Any Orientations, Bandpass First)	ขยายผลจากวิธีที่ 3 ให้ใช้ได้ ทุกทิศทาง ทำให้การทำงานเร็วกว่าเดิม และประสิทธิภาพดีกว่าเดิม โดยการผ่านตัวกรองแถบความถี่ก่อน	3.4-4	KSIP Lab [8]
	4.1) ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ และ ปรับตัวกรองตามบริเวณที่มีทิศทางเปลี่ยนแปลงสูง (กรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านก่อน) (Separable 2-D Gabor with Adapted Orientations depended on Core Orientation, Bandpass First)	ประยุกต์จากวิธีที่ 3 และ 4 โดยการผ่านตัวกรองแถบความถี่ก่อน โดยเลือกพื้นที่ใช้ บริเวณ Core ใช้ทุกทิศทาง บริเวณนอกใช้ 8 ทิศทาง	-	KSIP Lab

ตารางที่ 3.4-1 รายละเอียดขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพโดยใช้ตัวกรองกาเบอ์ของ Jain แบบ 8 ทิศทาง (Jain's 2-D Conventional Gabor Filtering with 8-Orientation)

Algorithm	Jain's 2-D Conventional Gabor Filtering with 8-Orientation
Problem	เพื่อปรับปรุงให้ลายนิ้วมือที่มีคุณภาพไม่ดี แห้งแตก หรือ ซ้ำกันเป็นปื้น ให้ชัดเจน
Method	แบ่งภาพลายนิ้วมือออกเป็นบล็อกย่อยขนาด 16×16 ทำการหาทิศทางโดยแบ่งเป็น 8 ทิศทางและหาความถี่ของเส้นลายนิ้วมือ แล้วทำการคอนโวลูชันแบบสองมิติด้วยตัวกรองแบบกาเบอ์ที่ออกแบบไว้ตามทิศทางและความถี่ดังกล่าว
Advantage	-
Disadvantage	-
Reference	L. Hong, Y. Wan, and A.K. Jain, "Fingerprint Image Enhancement; Algorithm and Performance Evaluation", IEEE Transactions on PAMI, vol. 20, No. 8, pp. 777-789, August 1998.

ตารางที่ 3.4-2 รายละเอียดขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพโดยใช้ตัวกรองกาเบอ์ของ Jain แบบทิศทางใด ๆ (Jain's 2-D Conventional Gabor Filtering with Any Orientation)

Algorithm	Jain's 2-D Conventional Gabor Filtering with Any Orientation
Problem	เพื่อปรับปรุงให้ลายนิ้วมือที่มีคุณภาพไม่ดี แห้งแตก หรือ ซ้ำกันเป็นปื้น ให้ชัดเจน
Method	แบ่งภาพลายนิ้วมือออกเป็นบล็อกย่อยขนาด 16×16 ทำการหาทิศทางโดยใช้ทิศทางจริงและหาความถี่ของเส้นลายนิ้วมือ แล้วทำการคอนโวลูชันแบบสองมิติด้วยตัวกรองแบบกาเบอ์ที่ออกแบบไว้ตามทิศทางและความถี่ดังกล่าว
Advantage	ประสิทธิภาพจะดีกว่าแบบ 8 ทิศทาง
Disadvantage	เวลาในการคำนวณจะเพิ่มขึ้น ความซับซ้อนสูงที่สุด
Reference	KSIP Lab Original Work

ตารางที่ 3.4-3 รายละเอียดขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพโดยใช้ตัวกรองกาเบอ์แบ่งแยกได้ แบบ 8 ทิศทาง(2-D Separable Gabor Filtering with 8-Orientation)

Algorithm	2-D Separable Gabor Filtering with 8-Orientation
Problem	เพื่อปรับปรุงให้ลายนิ้วมือที่มีคุณภาพไม่ดี แห้งแตก หรือ ซ้ำกันเป็นปื้น ให้ชัดเจน
Method	แบ่งภาพลายนิ้วมือออกเป็นบล็อกย่อยขนาด 16×16 ทำการหาทิศทางโดยทำการ Quantization เป็น 8 ทิศทางและหาความถี่ของเส้นลายนิ้วมือ แล้วทำการคอนโวลูชันแบบสองมิติด้วยตัวกรองแบบกาเบอ์แบบแบ่งแยกได้ที่ออกแบบไว้ตามทิศทางและความถี่ดังกล่าว
Advantage	ความเร็วสูงกว่าวิธีของ Jain ประมาณ 2.6 เท่า
Disadvantage	ผลการปรับปรุงแตกต่างจากวิธีของ Jain เล็กน้อยในทางลบ ถ้าเป็นลายนิ้วมือจริง เป็นที่น่าแปลกกว่าลายนิ้วมือเทียมกลับดีขึ้น
Reference	KSIP Lab Original Work [7]

ตารางที่ 3.4-4 รายละเอียดขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพโดยใช้ตัวกรองกาเบอร์แบ่งแยกได้ แบบทิศทางใด ๆ (2-D Separable

Gabor Filtering with Any Orientation

Algorithm	2-D Separable Gabor Filtering with Any Orientation
Problem	เพื่อปรับปรุงให้ลายนิ้วมือที่มีคุณภาพไม่ดี แห้งแตก หรือ ซ้ำกันเป็นปื้น ให้ชัดเจน
Method	แบ่งภาพลายนิ้วมือออกเป็นบล็อกย่อยขนาด 16×16 ทำการหาทิศทางโดยใช้ทิศทางจริงและหาความถี่ของเส้นลายนิ้วมือ แล้วทำการคอนโวลูชันแบบสองมิติด้วยตัวกรองแบบกาเบอร์แบบแบ่งแยกได้ที่ออกแบบไว้ตามทิศทางและความถี่ดังกล่าว
Advantage	ประสิทธิภาพจะดีกว่าแบบ 8 ทิศทาง
Disadvantage	เวลาในการคำนวณจะเพิ่มขึ้น
Reference	KSIP Lab Original Work [8]

3.5) การทดสอบการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือด้วยตัวกรองกาเบอร์ (Gabor Filtering Enhancement Experimental Results)

Results)

รายละเอียดตามลำดับขั้นตอนทดสอบตัวกรองกาเบอร์แบบต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

- 1) ขั้นตอนวิธีการระบุบริเวณลายนิ้วมือ (Fingerprint Segmentation) จะใช้วิธีทางสถิติ (Statistics Method) ทั้งหมดทุกฐานข้อมูล ยกเว้นฐานข้อมูล FVC2000 Db2B เท่านั้นที่จะใช้วิธีทางฮิสโตแกรม (Histogram Method)
- 2) ขั้นตอนวิธีการประมาณทิศทางลายนิ้วมือ (Orientation Estimation) ในการทดลองนี้จะเลือกใช้สองวิธี เพื่อทดลองว่า ผลลัพธ์ของตัวกรองแบบต่างๆจะขึ้นกับขั้นตอนวิธีประมาณทิศทางหรือไม่ ได้แก่
 - 2.1) วิธีของ Lin Hong และคณะ (L. Hong, Y. Wan, and A.K. Jain, "Fingerprint Image Enhancement; Algorithm and Performance Evaluation", IEEE Transactions on PAMI, vol. 20, No. 8, pp. 777-789, August 1998.)
 - 2.2) วิธีการเฉลี่ยทิศทางโดยใช้ความสอดคล้องกันของทิศทาง (Coherence) ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นเอง แต่อาศัยความรู้ทางทฤษฎีจากบทความของ A.M Bazen และ คณะ (A.M. Bazen, S.H. Gerez, "Systematic Methods for the Computation of the Directional Fields and Singular Points of Fingerprint", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume: 24 Issue: 7, July 2002, Page(s): 905-919.)
- 3) ขั้นตอนวิธีการประมาณความถี่ของลายนิ้วมือ (Frequency Estimation) ใช้วิธีของ Lin Hong และคณะ (L. Hong, Y. Wan, and A.K. Jain, "Fingerprint Image Enhancement; Algorithm and Performance Evaluation", IEEE Transactions on PAMI, vol. 20, No. 8, pp. 777-789, August 1998.) แต่เปลี่ยนแปลงวิธีการตรวจหาจุดยอด เป็นการแปลงฟูเรียร์เพื่อหาความถี่หลักแทน
- 4) ขั้นตอนวิธีการกรองด้วยตัวกรองกาเบอร์ (Gabor Filtering) จะเปลี่ยนแปลงรูปแบบของตัวกรองตามตารางที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้
 - 4.1) แบบที่ 1 ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติ แบบ 8 ทิศทาง เป็นตัวกรองกาเบอร์แบบปกติ ขั้นตอนวิธีการกรองได้ใช้คุณสมบัติความสมมาตร (Symmetric) ของตัวกรอง เพื่อให้กรองได้รวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของตัวกรองไว้ล่วงหน้าก่อนด้วย

- 4.2) แบบที่ 2 ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติ แบบทิศทางจริง เป็นตัวกรองกาเบอร์แบบปกติ และใช้คุณสมบัติความสมมาตร (Symmetric) ของตัวกรอง เช่นกัน แต่เนื่องจากทิศทางในการกรองไม่ได้ถูกควอนไทซ์ ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของตัวกรองไว้ล่วงหน้าได้ ตัวกรองจะถูกปรับเปลี่ยนไปทุกขบถ่อย
- 4.3) แบบที่ 3 ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบ 8 ทิศทาง (กรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านก่อน) ทำการกรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านในทิศทางตั้งฉากก่อน จากนั้นจึงกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในทิศทางของลายนิ้วมือ ทิศทางในการกรองจะถูกกำหนดไว้ตาม 8 ทิศทางที่เลือกไว้ ตัวกรองไม่มีการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของตัวกรองไว้ล่วงหน้า
- 4.4) แบบที่ 4 ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบทิศทางจริง (กรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านก่อน) ทำการกรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านในทิศทางตั้งฉากก่อน จากนั้นจึงกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในทิศทางของลายนิ้วมือ ทิศทางในการกรองจะใช้ทิศทางจริงแต่ต้องใช้ในการประมาณค่า (Interpolation) แต่การประมาณค่านี้จะใช้แค่เพียง 2 จุดภาพในการคำนวณเท่านั้น (โดยปกติแล้วต้องใช้ 4 จุดภาพในการคำนวณ) เนื่องจากในแนวแกน X หรือ แกน Y แนวใดแนวหนึ่งจะถูกกำหนดให้เป็นค่าพิกัดที่ลงตัวพอดี ตัวกรองไม่มีการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของตัวกรองไว้ล่วงหน้า
- 4.5) แบบที่ 5 ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ และปรับตัวกรองตามบริเวณที่มีทิศทางเปลี่ยนแปลงสูง (กรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านก่อน) ตัวกรองนี้เป็นการประยุกต์ใช้ตัวกรองในข้อ 4.3 และ 4.4 เข้าด้วยกัน โดยการทำการคำนวณหาบล็อกที่น่าจะมีจุดเอกฐาน (Singular Point) อยู่ จาก Pointcare Index บล็อกรอบๆจุดเอกฐานนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางสูง ดังนั้นการใช้ตัวกรองในทิศทางจริงตาม ข้อ 4.4 เพื่อให้ได้ความถูกต้องจากการกรองมากที่สุด ส่วนบล็อกอื่นนั้นจะมีทิศทางค่อนข้างคงที่ดังนั้นจะเลือกใช้ตัวกรอง ใน 8 ทิศทางเพื่อความรวดเร็วในการประมวลผล
- 4.6) แบบที่ 6 ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบ 8 ทิศทาง (กรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านก่อน) เหมือนกับวิธีในข้อ 4.3 แต่จะการกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านก่อนเท่านั้น
- 4.7) แบบที่ 7 ตัวกรองกาเบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบ 8 ทิศทาง และ มีการผสมบล็อกที่มีทิศทางเดียวกัน เข้าด้วยกัน (กรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านก่อน) เหมือนกับวิธีในข้อ 4.6 แต่จะใช้ข้อได้เปรียบของการกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่านก่อน ทำให้สามารถรวมบล็อกย่อยที่มีทิศทางเดียวกันและอยู่ติดกันให้เป็นบล็อกใหญ่เพียงบล็อกเดียว และทำการกรองพร้อมกัน ซึ่งจะลดความซ้ำซ้อนในการกรองลงไปได้อีก อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้จากการกรองอาจจะไม่เหมือนกับข้อ 4.6 เนื่องจากการกรองในบล็อกใหญ่นั้นจะใช้ความถี่เฉลี่ยความถี่เดียวในการกรองทั้งบล็อก ส่วนการกรองตามข้อ 4.6 นั้นแต่ละบล็อกย่อย ถึงแม้จะมีทิศทางเดียวกันแต่อาจจะมีความถี่ต่างกันก็ได้

3.6) ผลการทดลอง

การทดลองจะแบ่งเป็น 4 การทดลอง สองการทดลองแรกเป็น การวัดประสิทธิภาพของการเปรียบเทียบลายนิ้วมือโดยใช้ตัวกรองกาเบอร์ทั้ง 7 แบบดังกล่าว โดยมีความแตกต่างของทั้งสองการทดลองคือ การทดลองแรกจะใช้วิธีการประมาณทิศทางลายนิ้วมือของ Lin Hong [5] และการทดลองที่สองจะใช้วิธีการประมาณทิศทางลายนิ้วมือแบบการเฉลี่ยทิศทางจากความสัมพันธ์กันของทิศทาง (Coherence) ซึ่งเป็นผลงานการผสมผสานขั้นตอนวิธีขึ้นมาเอง ซึ่งทั้งสองการทดลองจะใช้ขั้นตอนวิธีการเปรียบเทียบลายนิ้วมือตามวิธีของ X. Jiang และคณะ [13] (X. Jiang and W.Y. Yau,

“Fingerprint Minutiae Matching Based on the Local and Global Structures,” Proceeding International Conference on Pattern Recognition (15th), vol.2, pp. 1042-1045, 2000) ส่วนการทดลองที่สามเป็นการปรับเปลี่ยนขั้นตอนวิธีของ X. Jiang และคณะ [13] โดยการปรับทิศทางของหางมินูเทียร์ และวัดประสิทธิภาพของการเปรียบเทียบลายนิ้วมือเหมือนการทดลองที่ 3.6.1

การทดลองสุดท้ายเป็นการวัดเวลาในการประมวลผล เพื่อเปรียบเทียบความซับซ้อนของตัวกรองกาเบอร์ทั้ง 7 แบบ ผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 3.6.1. การวัดประสิทธิภาพจากอัตราการเรียนรู้จำลายนิ้วมือ โดยใช้วิธีการประมาณทิศทางลายนิ้วมือของ Lin Hong และคณะ [5]

ตารางที่ 3.6-1 . เปรียบเทียบค่า EER ของตัวกรองแบบต่างๆ โดยใช้วิธีการประมาณทิศทางลายนิ้วมือของ Lin Hong

Gabor Type	EER of FVC 2000 Database (%)				EER of FVC 2002 Database (%)			
	Db1B	Db2B	Db3B	Db4B	Db1B	Db2B	Db3B	Db4B
1	19.340279	18.169643	18.226686	22.579365	24.139385	28.578869	32.581844	25.305061
2	16.021826	13.100199	13.296131	17.078373	22.507439	28.804565	30.682045	20.381945
3	17.713295	18.511906	17.130457	24.982639	23.839285	29.774307	38.296135	25.342262
4	15.582838	11.951885	14.900793	15.900297	21.321926	29.947918	35.704365	20.009922
5	18.234127	20.178570	15.935019	22.552082	22.648809	30.513393	35.496033	24.883430
6	18.152283	22.817461	18.087797	22.574406	23.720238	29.618057	36.974205	24.561012
7	18.898809	21.465775	18.291170	23.556547	23.100197	29.613094	36.465775	25.218254

การทดลองที่ 3.6.2. การวัดประสิทธิภาพจากอัตราการเรียนรู้จำลายนิ้วมือ โดยใช้วิธีการประมาณทิศทางลายนิ้วมือแบบการเฉลี่ยทิศทางจากความสอดคล้องกันของทิศทาง (Coherence)

ตารางที่ 3.6-2 เปรียบเทียบค่า EER ของตัวกรองแบบต่างๆ โดยใช้วิธีการประมาณทิศทางลายนิ้วมือแบบการเฉลี่ยทิศทางจากความสอดคล้องกันของทิศทาง (Coherence)

Gabor Type	EER of FVC 2000 Database (%)				EER of FVC 2002 Database (%)			
	Db1B	Db2B	Db3B	Db4B	Db1B	Db2B	Db3B	Db4B
1	19.422123	16.512897	15.230655	24.208830	26.639385	32.073414	32.996033	25.778770
2	18.320934	14.508928	14.756945	20.687004	20.838293	26.835318	31.765873	21.939484
3	19.238590	22.056051	18.839287	25.203373	25.000000	31.465775	35.778770	25.964783
4	19.112103	14.422123	14.578373	20.317459	20.307539	27.869545	31.961805	21.200397
5	18.226686	17.852182	17.507441	25.287699	23.152281	31.312004	36.800598	24.370039
6	18.816963	22.822420	15.553075	26.887402	24.248512	32.956352	34.903275	23.313492
7	19.521330	22.996033	16.021826	26.569939	25.039680	32.127975	33.794643	24.756945

จากสองการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ว่า โดยส่วนใหญ่แล้ว ตัวกรองกาเบอร์แบบแบ่งแยกใช้ทิศทางจริง สามารถทำงานได้ดีที่สุด ที่ใกล้เคียงกันหรือบางฐานข้อมูลจะดีกว่าคือ ตัวกรองกาเบอร์ปกติใช้ทิศทางจริง นอกนั้นประสิทธิภาพส่วนใหญ่จะไม่ดีเท่า มีบางกรณีในตารางที่ 3.6-1 ผลการทดสอบกับฐานข้อมูล FVC2002 DB2B แสดงตัวกรองกาเบอร์ปกติใช้ 8 ทิศทางดีที่สุด และในตารางที่ 3.6-2 ผลการทดสอบกับฐานข้อมูล FVC2000 DB1B แสดงตัวกรองกาเบอร์แบบแบ่งแยกได้ และปรับตัวกรองตามบริเวณที่มีทิศทางเปลี่ยนแปลงสูง ทำงานได้ดีที่สุด แต่เนื่องจากที่อัตราความผิดพลาดสูง และความแตกต่างไม่เกิน 1% ทำให้ผลการทดสอบไม่มีความสำคัญเท่าใดนักในเชิงปฏิบัติ จึงยังถือว่าวิธีการทำการกรองกาเบอร์ด้วยทิศทางจริงมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ไม่ว่าจะใช้แบบปกติหรือแบบแบ่งแยกได้

ข้อสรุปที่ได้จากสองตารางอีกอย่างหนึ่งก็คือ วิธีการประมาณทิศทางลายนิ้วมือของ Lin Hong ดีกว่าวิธีการประมาณทิศทางลายนิ้วมือแบบการเฉลี่ยทิศทางจากความสอดคล้องกันของทิศทาง (Coherence) ที่ได้คิดค้น ดัดแปลงขึ้น

การทดลองที่ 3.6.3. การวัดประสิทธิภาพจากอัตราการรู้จำลายนิ้วมือ โดยใช้วิธีการประมาณทิศทางลายนิ้วมือของ Lin Hong และคณะ [5] และปรับเปลี่ยนวิธีการรู้จำโดยการปรับทิศทางทางมุมเทียบ

ตารางที่ 3.6-3 . เปรียบเทียบค่า EER ของตัวกรองแบบต่างๆ โดยใช้วิธีการประมาณทิศทางลายนิ้วมือของ Lin Hong และปรับเปลี่ยนทิศทางทางของมุมเทียบของขั้นตอนวิธี X. Jiang และคณะ [13]

Gabor Type	EER of FVC 2000 Database (%)				EER of FVC 2002 Database (%)			
	Db1B	Db2B	Db3B	Db4B	Db1B	Db2B	Db3B	Db4B
1	14.104663	10.133928	13.134920	12.465278	16.408730	27.043652	24.913195	14.955358
2	11.490576	8.891369	10.461309	8.452381	14.712301	26.356647	23.487103	9.156746
3	12.834822	11.760913	13.169642	12.817461	17.395832	27.643848	26.235119	14.652779
4	11.356647	8.504465	10.126489	8.834326	15.565476	27.996033	23.891369	8.717758
5	13.673115	13.204365	11.951885	10.208333	15.334822	27.748016	29.439484	13.048115
6	14.474206	15.282738	12.313988	12.460318	16.413689	28.435020	28.546627	16.904762
7	14.861112	16.374008	12.961309	12.199902	16.321926	29.600697	27.564486	16.765873

สำหรับการทดลองที่ 3 เมื่อทำการปรับเปลี่ยนขั้นตอนวิธี ทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้นทั้งระบบ ในตารางที่ 3.6-3 นี้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ ตารางที่ 3.6-1 จะเห็นได้ชัดเจนว่า ประสิทธิภาพการรู้จำดีขึ้นโดยรวม และการทำกาเบอร์แบบทิศทางจริงให้ผลที่ดีกว่าแบบ 8 ทิศทาง

การทดลองที่ 3.6.4. การวัดประสิทธิภาพจากเวลาการประมวลผล

ตารางที่ 3.6-4 เปรียบเทียบเวลาในการคำนวณเฉพาะการทำการกรองกาเบอร์แบบต่าง ๆ

Gabor Type	Average filtering time of FVC 2000 Database (Seconds)				Average filtering time of FVC 2002 Database (Seconds)			
	Db1B	Db2B	Db3B	Db4B	Db1B	Db2B	Db3B	Db4B
1	0.629613	0.526100	0.839113	0.341588	0.490850	0.752688	0.348450	0.405062
2	1.152000	1.046813	1.734850	0.673650	1.022437	1.440325	0.729600	0.819550
3	0.242125	0.210525	0.314512	0.131438	0.191212	0.297450	0.140063	0.158388
4	0.463100	0.417213	0.669875	0.266987	0.405725	0.587838	0.287662	0.330875
5	0.260350	0.227375	0.328387	0.150625	0.209737	0.320300	0.155688	0.177763
6	0.242125	0.210525	0.314512	0.131438	0.191212	0.297450	0.140063	0.158388
7	0.223812	0.190263	0.278287	0.120662	0.171050	0.268775	0.129138	0.143900

ตารางที่ 3.6-5 เปรียบเทียบอัตราส่วนเวลาในการคำนวณการทำการกรองกาเบอร์แบบต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับวิธีพื้นฐาน
แบบ 8 ทิศทาง [5]

Gabor Type	Average filtering time of FVC 2000 Database (Ratio Compared with Conv. Gabor 8-Orientation)				Average filtering time of FVC 2002 Database (Ratio Compared with Conv. Gabor 8-Orientation)				Average. Ratio	Times Ratio
	Db1B	Db2B	Db3B	Db4B	Db1B	Db2B	Db3B	Db4B		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1.8399	1.9898	2.0675	1.9721	2.0830	1.9136	2.0938	2.0233	1.998	0.5
3	0.3867	0.4002	0.3748	0.3848	0.3896	0.3952	0.4020	0.3910	0.391	2.56
4	0.7396	0.7930	0.7983	0.7816	0.8266	0.7810	0.8255	0.8169	0.795	1.26
5	0.4158	0.4322	0.3914	0.4410	0.4273	0.4255	0.4468	0.4389	0.427	2.34
6	0.3867	0.4002	0.3748	0.3848	0.3896	0.3952	0.4020	0.3910	0.391	2.56
7	0.3575	0.3616	0.3316	0.3532	0.3485	0.3571	0.3706	0.3553	0.354	2.82

3.7) แผนงานวิจัยที่ต้องทำต่อในอนาคต

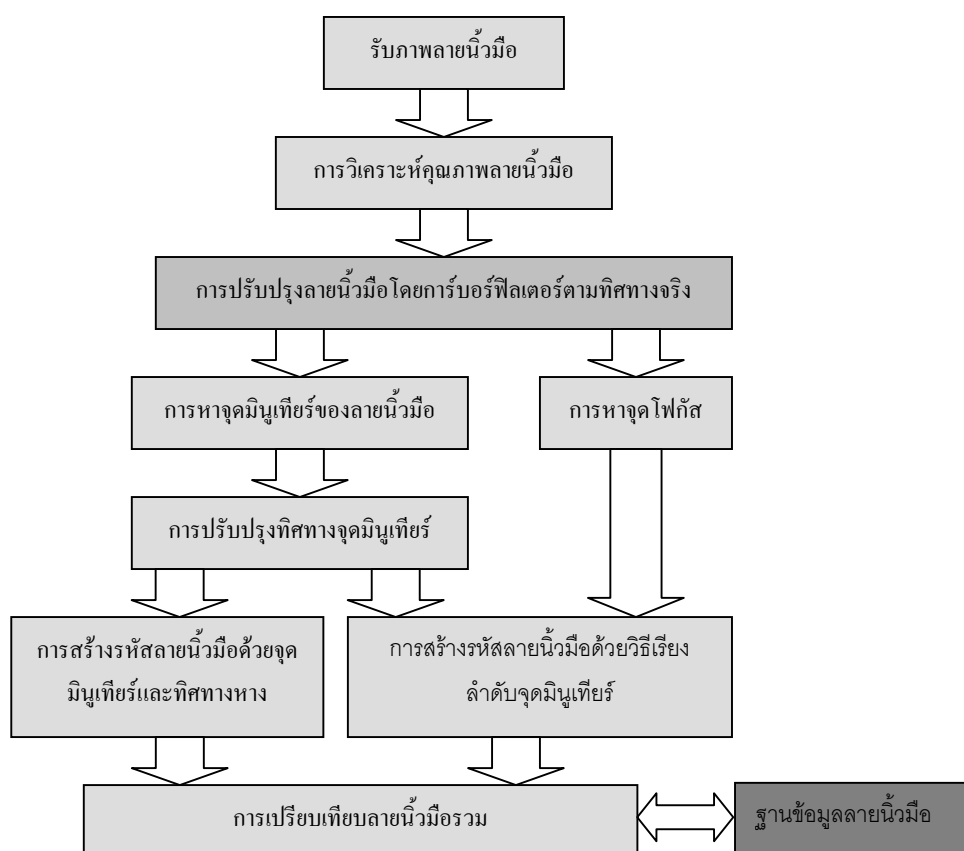
เนื่องจากงานวิจัยด้านการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือยังไม่สมบูรณ์ ปัญหาใหญ่ ๆ ที่พบในปัจจุบันมีดังต่อไปนี้

1. การหาทิศทางของลายนิ้วมือผิดพลาดในกรณีที่ภาพลายนิ้วมือมีคุณภาพที่ไม่ดี เช่น ในกรณีที่แห้งซึ่งจะทำให้ลายนิ้วมือแตกและจาง ในกรณีที่เปียกชื้นจะทำให้ติดกันเป็นปื้น และในกรณีที่ตัวเซนเซอร์ลายนิ้วมือเปื้อนรอยเหงื่อและคราบลายนิ้วมือเก่า ทั้งหมดนี้จะทำให้การตรวจสอบหาทิศทางผิดพลาดและทำให้การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือล้มเหลว ทำให้การรู้จำลายนิ้วมือล้มเหลวไปด้วย
2. การปรับปรุงภาพบริเวณก้นหอย หรือจุดโฟกัสของภาพมักล้มเหลว เนื่องจากทิศทางเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การแบ่งบล็อกขนาด 16×16 ใหญ่เกินไปทำให้ทิศทางขาดการเชื่อมต่อกันและสร้าง Blocking Artifacts ในบริเวณนี้

3. เวลาในการประมวลผลโดยใช้ตัวกรองกาเบอร์ เป็นขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูงมาก ถ้าเปลี่ยนเป็นวิธีอื่นที่ได้คุณภาพใกล้เคียงหรือดีกว่า ก็อาจจะมีประโยชน์ในการทำงานในฮาร์ดแวร์ที่มีทรัพยากรจำกัด ตัวอย่างเช่น การปรับปรุงภาพลายนิ้วมือโดยใช้วิธีตัวกรองตามลักษณะพื้นที่ (Fingerprint Enhancement Using Spatial Filtering) ของ Youling[6]

4. การทดสอบขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมืออัตโนมัติ

ขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมืออัตโนมัติรวม เรียกว่า Fingerprint Verification Software version 1.4 หรือเรียกย่อ ๆ ว่า FVS v.1.4 เนื่องจากเป็นการปรับปรุงครั้งที่ 4 แล้ว ขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมืออัตโนมัติ จะประกอบด้วยขั้นตอนวิธีย่อยต่าง ๆ ที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างบล็อกของขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมืออัตโนมัติของคนไทย

โดยรายละเอียดโดยย่อของขั้นตอนวิธีเรียงลำดับตามโครงสร้างบล็อก มีดังต่อไปนี้

4.1) การวิเคราะห์คุณภาพลายนิ้วมือ

เป็นขั้นตอนวิธีที่มีความสำคัญกับระบบโดยรวม โดยจำเป็นต้องวิเคราะห์คุณภาพของภาพลายนิ้วมือเพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์บอกเสถียรภาพของลายนิ้วมือ โดยจะแบ่งลายนิ้วมือออกเป็นบล็อกและทำการวิเคราะห์แต่ละบล็อกหรือแต่ละบริเวณเพื่อบ่งบอกคุณภาพของลายนิ้วมือ โดยมีการแบ่งคะแนนเป็น 5 ระดับ และระดับที่ 5 หมายถึงมีคุณภาพดีมากและ

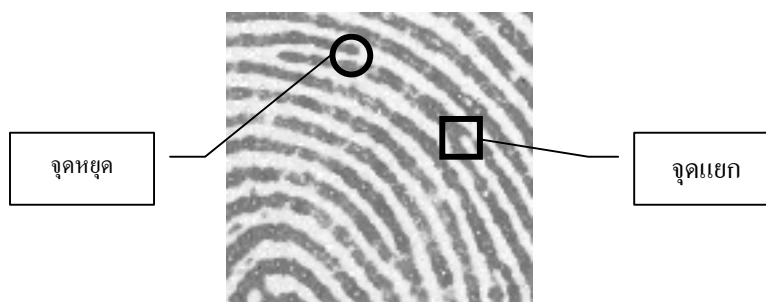
ระดับที่ 1 หมายความว่าไม่มีคุณภาพไม่มีลายนิ้วมือ หรืออาจเป็นคราบฝุ่นหรือรอยลายนิ้วมือเก่าก็เป็นที่ได้ ตั้งแต่ระดับที่ 3 ขึ้นไปถือว่าคุณภาพลายนิ้วมือสามารถใช้ในการระบุตัวบุคคลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2) การปรับปรุงลายนิ้วมือโดยการบอร์ฟิเตอร์ตามทิศทางจริง

เป็นขั้นตอนวิธีที่มีความสำคัญมากเป็นอันดับต้น ๆ กับระบบโดยรวม เพราะถ้าขั้นตอนการปรับปรุงลายนิ้วมือผิดพลาดจะส่งผลให้ประสิทธิภาพรวมของระบบลดลงทันที ขั้นตอนวิธีนี้จะทำการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือให้ชัดเจนทั้งภาพ และดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้จากภาพลายนิ้วมือต้นฉบับ เพื่อที่จะหาจุดอ้างอิงเพื่อที่จะใช้ในการเปรียบเทียบต่อไป

4.3) การหาจุดมินูเทียร์ของลายนิ้วมือ

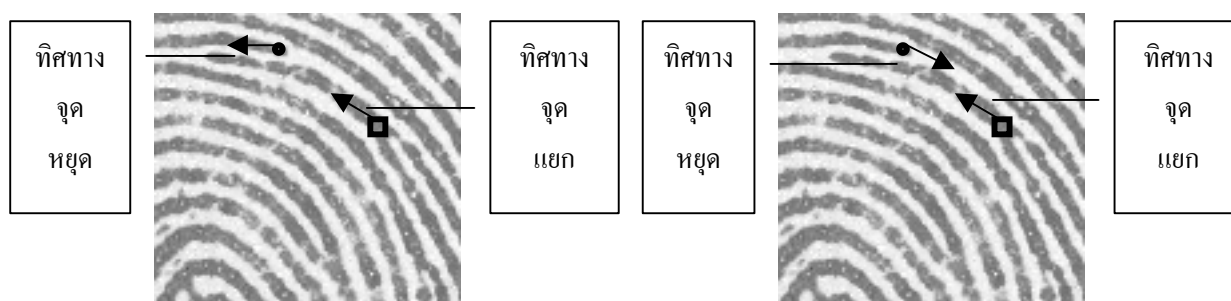
จากภาพลายนิ้วมือที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว จะทำการหาจุดมินูเทียร์ (Minutiae point) ของลายนิ้วมือ โดยทั่วไปจุดมินูเทียร์จะมี 2 ประเภทคือ 1) จุดหยุดหรือจุดสิ้นสุด (Termination minutiae) คือบริเวณเส้นลายนิ้วมือสิ้นสุด และ 2) จุดแยก (Bifurcation minutiae) คือบริเวณเส้นลายนิ้วมือแยกออกเป็นสองเส้น ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.2 ขั้นตอนวิธีนี้จะเก็บจุดแยกและจุดหยุดทั้งหมดที่หาได้ เพื่อใช้ในขั้นตอนวิธีการเปรียบเทียบลายนิ้วมือต่อไป



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างจุดมินูเทียร์ของเส้นลายนิ้วมือ

4.4) การปรับปรุงทิศทางจุดมินูเทียร์

จากจุดแยกและจุดหยุดที่หาได้ จะทำการปรับทิศทางของจุดหยุดให้เหมาะสมคล้ายทิศทางของจุดแยก เพราะโอกาสที่จุดแยกจะกลายเป็นจุดหยุด และจุดหยุดจะกลายเป็นจุดแยกมีโอกาสดูงถ้าคุณภาพของลายนิ้วมือไม่ดี การปรับปรุงภาพผิดพลาดเป็นต้น ดังนั้นจึงต้องปรับทิศทางให้อยู่ในแนวเดียวกันเพื่อที่จะรองรับกรณีผิดพลาดดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการเปลี่ยนทิศทางของจุดมินูเทียร์

4.5) การหาจุดโฟกัส

เป็นการพัฒนาวิธีการหาจุดตัดรวมจากเส้นลายนิ้วมือโดยใช้วิธีการจาก [14] แต่ปรับปรุงให้มีความเร็วในการวิเคราะห์หาจุดโฟกัสได้เร็วขึ้นโดยพิจารณาเดินตามเส้นลายนิ้วมือเฉพาะบริเวณส่วนโค้งบนและทำการหาจุดตัดรวมที่ได้จากส่วนโค้งนั้น หลังจากนั้นนำจุดตัดที่ได้ไปพิจารณาเดินตามเส้นใหม่ จนจำจนได้จุดตัดที่มีความเสถียรไม่เลื่อนจากจุดตัดก่อนหน้ามากนัก กำหนดให้จุดตัดสุดท้ายนั้นเป็นจุดโฟกัส ตัวอย่างผลการทดลองใช้ขั้นตอนวิธีนี้ในการหาจุดโฟกัสแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5



(ก) Finger#076_03

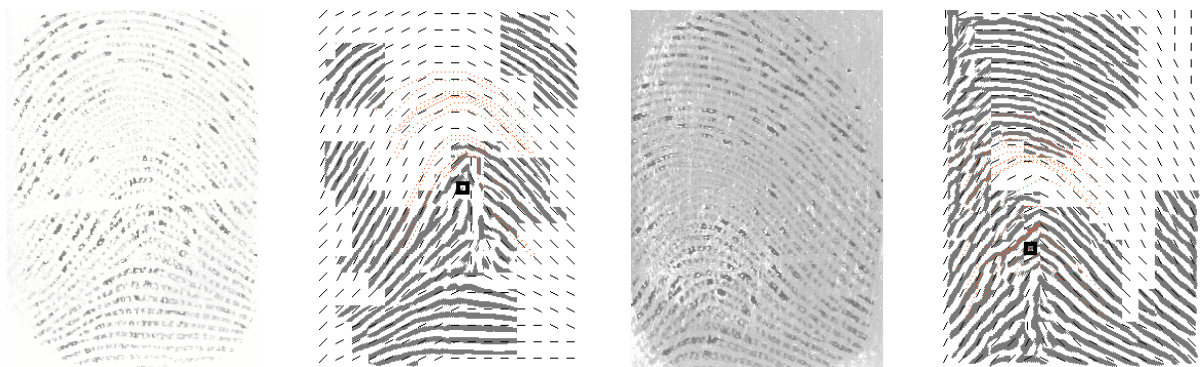
(ข) Finger#076_04

(ค) Finger#076_07

(ง) Finger#076_08

รูปที่ 4.4 ตัวอย่างการหาจุดโฟกัส แม้ว่าตำแหน่งจุดโฟกัสจะออกนอกภาพ ขั้นตอนวิธีก็สามารถหาตำแหน่งได้อย่างหยาบ ๆ

(Focal point localization algorithm results, DB2, FVC2000, $\delta=21.96$ pixels, $\sigma=15.17$ pixels)



(ก) Finger#100_02 Original

(ข) Focal point of Finger#100_02

(ค) Finger#100_04 Original

(ง) Focal point of Finger#100_04

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการหาจุดโฟกัส แม้ว่าคุณภาพของภาพจะมีปัญหา ขั้นตอนวิธีก็ยังสามารถหาตำแหน่งได้อย่างหยาบ ๆ

(Focal point localization algorithm results, DB2, FVC2000, $\delta=58.45$ pixels, $\sigma=33.94$ pixels (worst case)) โดยภาพ (ก)

และ (ค) คือภาพต้นฉบับ และภาพ (ข) และ (ง) คือภาพที่ถูกประมวลผลหาจุดโฟกัสแล้ว

4.6) การสร้างรหัสลายนิ้วมือด้วยจุดมินูเทียร์และทิศทางการ

เป็นขั้นตอนการสร้างรหัสเทมเพลตลายนิ้วมือ โดยใช้ตำแหน่งจุดมินูเทียร์และใช้เส้นทิศทางการเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

4.7) การสร้างรหัสลายนิ้วมือด้วยวิธีเรียงลำดับจุดมินูเทียร์

เป็นขั้นตอนการสร้างรหัสเทมเพลตลายนิ้วมืออีกแบบหนึ่ง โดยใช้ตำแหน่งจุดมินูเทียร์และจุดโฟกัส โดยการเรียงลำดับจุดมินูเทียร์รอบจุดโฟกัสซึ่งเป็นจุดอ้างอิง ทำให้สามารถเปรียบเทียบได้อย่างรวดเร็วขึ้น

4.8) การเปรียบเทียบลายนิ้วมือรวม

เป็นขั้นตอนสำหรับการเปรียบเทียบรหัสเทมเพลตลายนิ้วมือทั้งสองแบบกับฐานข้อมูลลายนิ้วมือที่มีอยู่

การวัดประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีใน FVS v.1.4 สามารถนำมาทดสอบกับฐานข้อมูล Fingerprint Verification Contest, FVC2000 [2] และ FVC2002 [3] รวมทั้ง ฐานข้อมูล FVC2004 [4] ที่ผ่านมาด้วย โดยมีรายละเอียดฐานข้อมูลลายนิ้วมือในแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 จากฐานข้อมูลลายนิ้วมือ FVC ทั้งหมด จะมีการเปรียบเทียบระหว่างคู่ลายนิ้วมือเดียวกันทั้งหมด 2,800 ครั้ง และเกิดการเปรียบเทียบระหว่างคู่ลายนิ้วมือที่ต่างกันทั้งหมด 319,600 ครั้ง ส่วนฐานข้อมูลของ KSIP Lab จะมีการเปรียบเทียบระหว่างคู่ลายนิ้วมือเดียวกันทั้งหมด 1,440 ครั้ง และเกิดการเปรียบเทียบระหว่างคู่ลายนิ้วมือที่ต่างกันทั้งหมด 458,880 ครั้ง

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการทดสอบขั้นตอนวิธีกับฐานข้อมูลลายนิ้วมือต่าง ๆ

#	Fingerprint Database	Image Size (pixel)	Sensor Type	Finger/ Images / Total Images	Product by	EER %	Rank/ Total Number of Participants
1	FVC2000 Db1A	300×300	Optic	100/8/800	Keytronic	10.28%	7/11
2	FVC2000 Db2A	256×364	Capacitive	100/8/800	ST Microelectronics	4.16%	5/11
3	FVC2000 Db3A	448×478	Optic	100/8/800	Identicator Tech DF-90	10.14%	5/11
4	FVC2000 Db4A	240×320	Synthetic	100/8/800	SFinGe	6.49%	5/11
	FVC2000 All	-	-	-	-	7.77%	9/14
5	FVC2002 Db1A	388×374	Optic	100/8/800	Identix Touch View II	10.12%	28/31
6	FVC2002 Db2A	296×560	Optic	100/8/800	Biometrika FX2000	13.74%	27/31
7	FVC2002 Db3A	300×300	Capacitive	100/8/800	Precise Biometric 100 SC	12.51%	25/31
8	FVC2002 Db4A	288×384	Synthetic	100/8/800	SfinGe v2.51	8.02%	25/31
	FVC2002 All	-	-	-	-	11.10%	27/31
9	FVC2004 Db1A	640×480	Optic	100/8/800	CrossMatch v300	28.62%	38/41
10	FVC2004 Db2A	328×364	Optic	100/8/800	Digital Persona	16.70%	39/41
11	FVC2004 Db3A	300×480	Thermal	100/8/800	Atmel Sweep	8.38%	31/41
12	FVC2004 Db4A	288×384	Synthetic	100/8/800	SfinGe v3.0	10.75%	36/41
	FVC2004 All	-	-	-	-	16.11%	38/41
13	KSIP OFP Db01R	352×288	Optic	240/4/960	NECTEC	7.83%	N/A
14	KSIP CFP Db01R	300×300	Capacitive	240/4/960	Veridicom	6.03%	N/A
15	KSIP OFP Db01W	352×288	Optic	240/4/960	NECTEC	4.66%	N/A
16	KSIP CFP Db01W	300×300	Capacitive	240/4/960	Veridicom	12.35%	N/A

สำหรับการทดสอบความเร็วหรือความซับซ้อนในการคำนวณของขั้นตอนวิธี ได้ทำการทดสอบบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Pentium IV 1.8 GHz, 256 MB RAM ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบเวลาในการคำนวณขั้นตอนวิธีต่าง ๆ ของ FVSv1.4 โดยใช้ฐานข้อมูลเดียวเป็นตัวทดสอบคือ KSIP CFP Db01R (300×300 pixels)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความเร็วในการคำนวณขั้นตอนวิธีการเปรียบเทียบลายนิ้วมือ FVS v.1.4

Algorithm Process	FVS v.1.4 Average Execution Time on Pentium IV 1.8GHz/256Mb (Second) Database KSIP CFP Db01R (300×300, 960 Images)	
	Algorithm	Time
1. Quality Analysis	Quality Testing	0.026
2. Enhancement	Sep-Gabor/Any Directions	0.413
3. Registration	Focal Point/Gabor/Thinning	0.698
4. Feature Extraction, Filtering, & Encoding	Minutiae Extraction	0.049
5. Matching	Focal Loop & Direction Order	0.035
Computational Complexity	Time (Second)	
(A) Enrollment Time (From Enhancement to Encoded Template)	0.757 Second	
(B) Average Verification Time (1:1) (Verifying Template to Template)	0.035 Second	
(C) Average Identification Time (1:960) (Identifying Template to 960 Template)	33.60 Seconds	

สำหรับตารางที่ 4.3 เป็นการจำลองการแข่งขัน FVC2000 มีผู้เข้าร่วมการแข่งขันทั้งหมด 11 ราย และมีอีก 3 รายที่ส่งขั้นตอนวิธีมาให้ประเมินในภายหลัง ตารางนี้จะเน้นการโดยการเปรียบเทียบ EER (Equal Error Rate) เป็นค่าเฉลี่ยรวมทั้ง 4 ฐานข้อมูลคือ FVC2000 DB1A, DB2A, DB3A, และ DB4A ผลทดสอบขั้นตอนวิธี FVS v1.4 ได้เป็นที่ 9 ของการจำลองการแข่งขันครั้งนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ FVSv.1.4 Algorithm ในการสมัครการแข่งขัน FVC2000 [2]

เฉลี่ยรวมทั้ง 4 ฐานข้อมูล DB1A, DB2A, DB3A, และ DB4A

Rank	Organization	Type	Country	Average EER%
1	Neurotechnologija Ltd. (Late Entry)	Industrial	Lithuania	1.37%
2	SAGEM (Algorithm #A)	Industrial	France	1.73%
3	SAGEM (Algorithm #B)	Industrial	France	2.28%
4	Center for Signal Processing Nanyang Technological University	Academic	Singapore	5.19%
5	TeKey Research Group (Late Entry)	Industrial	Israel	5.94%
6	CEFET-PR/Antheus Technologia Ltd.	Industrial	Brazil	6.32%
7	Centre for Wavelets, Approximation and Information Processing, Department of Mathematics, National University of Singapore	Academic	Singapore	7.08%
8	FingerPin AG Version2 (Late Entry)	Industrial	Switzerland	7.45%

(9)	FVS v.1.4 KSIP Lab (Simulation)	Academic	Thailand	7.77%
9	Kent Ridge Digital Labs	Industrial	Singapore	10.94%
10	Electrical Engineering, University of Twente	Academic	Netherlands	15.24%
11	FingerPin AG	Industrial	Switzerland	15.94%
12	Inha University	Academic	Korea	19.33%
13	Ditto Information & Technology Inc.	Industrial	Korea	20.97%
14	Natural Sciences and Mathematics, Institute of Informatics	Academic	Macedonia	47.84%

ตารางที่ 4.4 เป็นการจำลองการแข่งขัน FVC2002 ซึ่งเป็นการแข่งขันครั้งที่ 2 มีผู้เข้าร่วม 31 ราย ขั้นตอนวิธี FVS v 1.4 วัดเทียบได้เป็นที่ 27 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ยังต้องปรับปรุงขั้นตอนวิธีอีกมาก

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ FVSv1.4 Algorithm ในการสมัครการแข่งขัน FVC2002 [3]

Rank	Organization	Type	Country	Average EER%
1	Bioscrypt Inc.	Industrial	USA	0.19%
2	Anonymous	Industrial	-	0.33%
3	Anonymous	Industrial	-	0.41%
4	Bioscrypt Inc.	Industrial	USA	0.77%
5	Siemens AG	Industrial	Germany	0.92%
6	Neurotechnologija Ltd.	Industrial	Lithuania	0.99%
7	SAGEM	Industrial	France	1.18%
8	Andrey Nikiforov	Independent Developer	USA	1.31%
9	SAGEM	Industrial	France	1.42%
10	Deng Guoqiang	Independent Developer	China	2.18%
11	IDENCOM AG	Industrial	Switzerland	2.22%
12	Suprema Inc.	Industrial	Korea	2.50%
13	Anonymous	Industrial	-	3.31%
14	Biometrics System Lab, Beijing University of Posts and Telecommunications	Academic	China	3.76%
15	Anonymous	Industrial	-	4.19%
16	HZMS Biometrics Co.Ltd	Other	China	4.24%
17	ActivCard Canada	Industrial	Canada	5.21%
18	Antheus Tecnologia Ltd.	Industrial	Brazil	5.46%
19	TeKey Research Group	Industrial	Israel	5.72%
20	FINGERPIN AG	Industrial	Switzerland	6.05%
21	Inha University	Academic	Korea	6.07%
22	Aldebaran Systems	Industrial	USA	6.16%
23	Digital Fingerpass Corporation	Industrial	China	6.40%
24	DATAMICRO Co.Ltd.	Industrial	Russia	6.72%
25	Anonymous	Industrial	-	7.12%

26	Dept. of Comp. Science and Inf. Eng., Da-Yeh University	Academic	Taiwan	9.04%
(27)	FVS v.1.4 KSIP Lab (Simulation)	Academic	Thailand	11.10%
27	Anonymous	Industrial	-	12.09%
28	AILab, Institute of Automation, The Chinese Academy of Sciences	Academic	China	14.66%
29	Dept. of Electrical and Computer Eng., Univesity of Tehran,	Industrial	Iran	16.79%
30	Anonymous	Other	-	39.10%
31	Anonymous	Academic		50%

การแข่งขัน FVC2004 ครั้งล่าสุดเป็นการแข่งขันครั้งที่ 3 โดยแบ่งการแข่งขันออกเป็นสองประเภทคือประเภทเปิด (Open) กับประเภทจำกัด (Light) โดยมีความแตกต่างกันอยู่ที่การแข่งขันประเภทเปิด (Open) จะให้อิสระในการทำงานของ โปรแกรม โดยจำกัดเวลาในการลงทะเบียนไม่เกิน 0.5 วินาที เวลาในการเปรียบเทียบไม่เกิน 0.3 วินาที โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แบบ AMD ATHLON 1600+ (1.41GHz) โดยการใช้หน่วยความจำไม่เกิน 2M bytes และขนาดของเทมเพลตลายนิ้วมือ (Template) ไม่เกิน 2kbyte

สำหรับการแข่งขันแบบจำกัด (Light) จะเป็นขั้นตอนวิธีสำหรับการลงฮาร์ดแวร์ที่มีทรัพยากรจำกัด โดยจำกัดเวลาในการลงทะเบียนไม่เกิน 0.5 วินาที เวลาในการเปรียบเทียบไม่เกิน 0.3 วินาที โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แบบ AMD ATHLON 1600+ (1.41GHz) โดยการใช้หน่วยความจำไม่เกิน 2M bytes และขนาดของเทมเพลตลายนิ้วมือ (Template) ไม่เกิน 2kbyte

ตารางที่ 4.5 เป็นการจำลองการแข่งขันแบบเปิด เนื่องจากโปรแกรม FVS v.1.4 ไม่สามารถทำงานได้ในกรณีแบบ จำกัด สำหรับการแข่งขัน FVC2004 แบบเปิดมีผู้เข้าร่วม 41 ราย ขั้นตอนวิธี FVS v 1.4 วัดเทียบได้เป็นที่ 38

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ FVSv1.4 Algorithm ในการสมัครการแข่งขัน FVC2004 [4]

Rank	Organization	Type	Country	Average EER%
1	Bioscrypt Inc.	Industry	Canada	2.07%
2	Sonda Ltd.	Industry	Russia	2.10%
3	The Chinese Academy of Sci.	Academy	China	2.30%
4	Gevarius	Industry	Russia	2.45%
5	Jan Lunter	Independent.Developer	France	2.90%
6	NITGEN Co., Ltd	Industry	Korea	3.13%
7	Neurotechnologija Ltd.	Industry	Lithuania	3.24%
8	Suprema Inc.	Industry	Korea	3.31%
9	Anonymous (Siemens AG)	Industry	-	3.71%
10	IDENCOM Germany GmbH	Industry	Germany	4.03%
11	Beijing HanWang Technology	Industry	China	4.04%
12	Deng Guoqiang	Independent.Developer	China	4.27%
13	Testech Inc.	Industry	Korea	4.33%
14	Anonymous (SAGEM)	Industry	-	4.41%
15	Ariel Unanue	Industry	Argentina	4.79%
16	Miaxis Biometrics Co., Ltd.	Industry	China	4.89%

17	Changsha XingTong Tec. Dev.	Industry	China	5.66%
18	Integral Ltd.	Industry	Ukraine	6.12%
19	Anonymous	Independent.Developer	-	6.23%
20	Zaklad Techniki Mikroproc.	Industry	Poland	6.42%
21	Morphosoric	Industry	Germany	6.56%
22	Anonymous	Industry	-	6.80%
23	Anonymous	Industry	-	7.17%
24	Anonymous	Industry	-	7.27%
25	Anonymous	Academy	-	7.48%
26	DATAMICRO Co., Ltd.	Industry	Russia	7.64%
27	Anonymous	Academy	-	8.24%
28	Anonymous	Academy	-	8.29%
29	Futronic Technology Co. Ltd	Industry	China	8.30%
30	Li Lijuan	Independent.Developer	China	8.38%
31	Anonymous	Industry	-	9.57%
32	Anonymous	Industry	-	9.62%
33	Nyoun	Industry	Korea	10.03%
34	Anonymous	Industry	-	11.37%
35	Anonymous	Industry	-	12.29%
36	Anonymous	Independent.Developer	-	12.68%
37	Anonymous	Industry	-	13.08%
(38)	FVS v.1.4 KSIP Lab (Simulation)	Academic	Thailand	16.11%
38	Anonymous	Independent.Developer	-	16.84%
39	Anonymous	Academy	-	28.44%
40	Anonymous	Industry	-	36.77%
41	Anonymous	Academy	-	37.83%

จะเห็นว่า ยังต้องปรับปรุงขั้นตอนวิธีอีกมากแต่อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธียังต้องถูกวิจัยและพัฒนาต่อไปอีกอย่างแน่นอน โดยขั้นตอนวิธีใน FVS v.1.4 มีจุดอ่อนที่ต้องวิจัยและพัฒนาต่อดังต่อไปนี้

1. ปัญหาของขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Enhancement Algorithm)

- ขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพ (Fingerprint Enhancement) ใน FVS v.1.4 ยังคงมีปัญหที่ต้องแก้ไข อาทิเช่น
 - ภาพลายนิ้วมือที่มีความชื้นสูงเกินไป ทำให้ลายนิ้วมือดกกันบางส่วนดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) และ (ค) ทำให้ตรวจสอบทิศทางผิดพลาด ผลจากการทำการปรับปรุงภาพแบบตัวกรองกาบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบทิศทางจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) และ (ง)



(ก) Original Finger#039_05

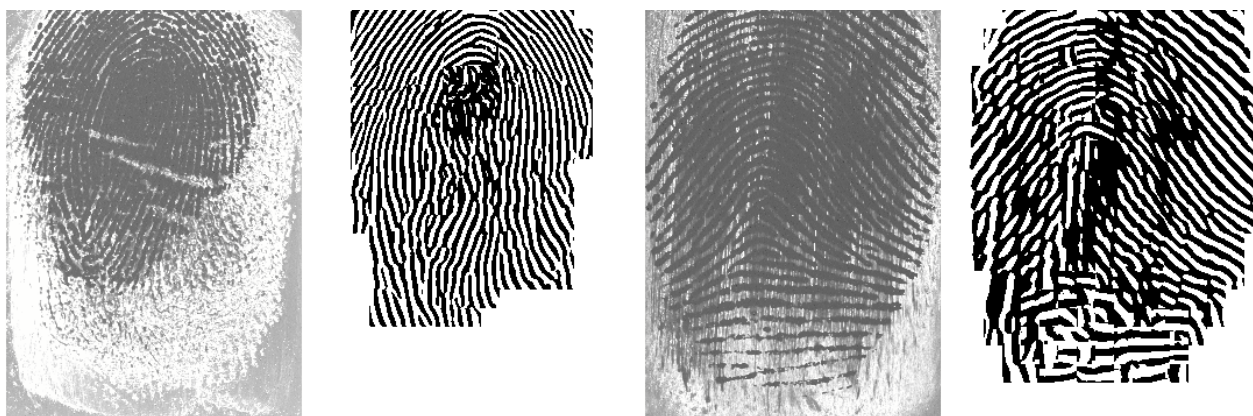
(ข) Enhanced Finger#039_05

(ค) Original Finger#085_08

(ง) Enhanced Finger#085_08

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือที่มีความชันสูงเกินไป สังเกตในบริเวณที่เป็นปื้นสีดำ ทำให้การกำหนดทิศทางในการทำ การกรองโดยใช้การบอร์ฟิลด์ผลาด (ภาพในฐานข้อมูล FVC2000 DB2a)

- ภาพลายนิ้วมือที่มีความชันสูงเกินไป ทำให้ลายนิ้วมือดกกันบางส่วน รวมทั้งมีคราบลายนิ้วมือเก่า มีรอย ครูดหรือฝุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก) และ (ค) ทำให้ตรวจสอบทิศทางผิดพลาด ผลจากการทำการปรับ ประูปภาพแบบตัวกรองกานอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบทิศทางจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข) และ (ง)



(ก) Original Finger#094_03

(ข) Enhanced Finger#094_03

(ค) Original Finger#045_06

(ง) Enhanced Finger#045_06

รูปที่ 4.7 ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือที่มีความชันสูงเกินไป สังเกตในบริเวณที่เป็นปื้นสีดำ รวมทั้งมีลายนิ้วมือเก่า รอยครูด หรือ ฝุ่นปนอยู่ด้วย ทำให้การกำหนดทิศทางในการทำกรองโดยใช้การบอร์ฟิลด์ผลาด (ภาพในฐานข้อมูล FVC2000 DB2a)

- ภาพลายนิ้วมือปกติ แต่มีคราบลายนิ้วมือเก่า รอยครูดหรือฝุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) และ (ค) ทำให้ ตรวจสอบทิศทางผิดพลาด ผลจากการทำการปรับปรุงภาพแบบตัวกรองกานอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบทิศทางจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ข) และ(ง)



(ก) Original Finger#057_04



(ข) Enhanced Finger#057_04



(ค) Original Finger#089_01



(ง) Enhanced Finger#089_01

รูปที่ 4.8 ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือปกติ แต่มีคราบลายนิ้วมือเก่า รอยครูดหรือฝุ่น ทำให้การกำหนดทิศทางในการทำการกรอง โดยใช้การรับอร์ผิดพลาด (ภาพในฐานข้อมูล FVC2000 DB2a)

- ภาพลายนิ้วมือที่มีความแห้งมากเกินไป ทำให้ลายนิ้วมือขาดออกจากกันดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) และ (ค) ทำให้ตรวจสอบทิศทางผิดพลาด ผลจากการทำการปรับปรุงภาพแบบตัวกรองกาบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบทิศทางจริงดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข) และ(ง)



(ก) Original Finger#087_05



(ข) Enhanced Finger#087_05



(ค) Original Finger#098_02



(ง) Enhanced Finger#098_02

รูปที่ 4.9 ตัวอย่างภาพลายนิ้วมือที่มีความแห้งมากเกินไป ทำให้ลายนิ้วมือขาดออกจากกัน ทำให้การกำหนดทิศทางในการทำการกรองโดยใช้การรับอร์ผิดพลาด (ภาพในฐานข้อมูล FVC2000 DB2a)

- ภาพลายนิ้วมือที่มีความแห้งมากเกินไป ทำให้ลายนิ้วมือขาดออกจากกัน รวมทั้งมีคราบลายนิ้วมือเก่าหรือฝุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) และ (ค) ทำให้ตรวจสอบทิศทางผิดพลาด ผลจากการทำการปรับปรุงภาพแบบตัวกรองกาบอร์ 2 มิติแบบแบ่งแยกได้ แบบทิศทางจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) และ(ง)



(ก) Original Finger#097_05

(ข) Enhanced Finger#097_05

(ค) Original Finger#100_05

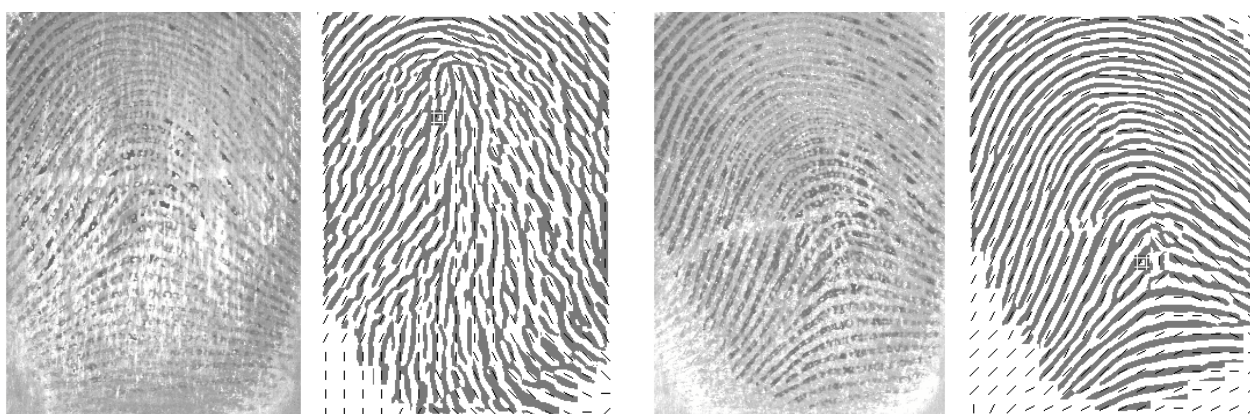
(ง) Enhanced Finger#100_05

รูปที่ 4.10 ภาพลายนิ้วมือที่มีความเข้มมากเกินไป ทำให้ลายนิ้วมือขาดออกจากกัน รวมทั้งมีคราบลายนิ้วมือเก่าหรือฝุ่น ทำให้การกำหนดทิศทางในการทำการกรองโดยใช้การบอร์นดิฟฟราด (ภาพในฐานข้อมูล FVC2000 DB2a)

- การทดสอบประสิทธิภาพขั้นตอนวิธีในปัจจุบันจะใช้ฐานข้อมูล FVC 2000 DB2a เป็นหลัก ปัญหาที่แสดงไว้ทั้งหมดเป็นการทดสอบกับฐานข้อมูลนี้ ซึ่งจะเห็นว่าจะได้ค่า EER ต่ำที่สุดที่ฐานข้อมูลนี้ แต่สำหรับฐานข้อมูลอื่น ยังไม่ได้ทำการปรับให้เหมาะสม จะต้องทำการวิจัยพัฒนาปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เหมาะสมในแต่ละฐานข้อมูล โดยเฉพาะในฐานข้อมูล FVC2000 DB1a, DB3a, และ DB4a รวมทั้งฐานข้อมูลอื่น ๆ เช่น FVC2002 และ FVC2004 ทั้งหมดต่อไป
- วิธีการแก้ไขปัญหาด้านการปรับปรุงภาพ จะต้องวิจัยและพัฒนาขั้นตอนวิธีที่สามารถวิเคราะห์คุณภาพของภาพบางส่วน ทำการปรับปรุงภาพบริเวณบางส่วนนั้น โดยเฉพาะ รวมทั้งการปรับปรุงการหาทิศทางของลายนิ้วมือให้ถูกต้องโดยทำก่อนหรือหลังขั้นตอนวิธีการทำ Gabor Filtering ก็ได้

2. ปัญหาของขั้นตอนวิธีการลงทะเบียนภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Registration Algorithm)

- ขั้นตอนวิธีการหาจุดโฟกัสยังไม่เสถียรเพียงพอ ทำให้ไม่สามารถนำจุดโฟกัสมาเป็นจุดอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้มีสาเหตุดังต่อไปนี้
 - การปรับปรุงภาพไม่สมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ผ่านมา การหาจุดโฟกัสซึ่งใช้ภาพที่ทำการปรับปรุงแล้ว ทำให้ไม่สามารถหาจุดโฟกัสที่มีเสถียรภาพได้ เนื่องจากภาพต้นฉบับไม่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11
 - ภาพบางภาพมีลักษณะการวางนิ้วที่ทำให้จุดโฟกัสอยู่ใกล้ขอบ ทำให้ยากแก่การทำให้เสถียรหรือไม่สามารถหาได้เลย ดังแสดงในรูปที่ 4.12
 - ลักษณะของลายนิ้วมือแบบโค้ง (Arch) และ โค้งกระโจม (Tented Arch) จะหาจุดโฟกัสให้เสถียรได้ยาก โดยธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข)
 - ลักษณะภาพที่สูญเสียส่วนโค้งด้านบน รวมทั้งการปรับปรุงภาพที่ผิดพลาด ทำให้ไม่สามารถหาจุดโฟกัสได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ค) และ (ง)



(ก) Original Finger#100_05

(ข) Focus Finger#100_05

(ค) Original Finger#100_07

(ง) Enhanced Finger#100_07

รูปที่ 4.11 ปัญหาการหาจุดโฟกัสไม่เสถียรจากขั้นตอนวิธีการปรับปรุงลายนิ้วมือที่ผิดพลาด (ข) กับถูกต้อง (ง) ของลายนิ้วมือเดียวกัน (ภาพในฐานข้อมูล FVC2000 DB2a)



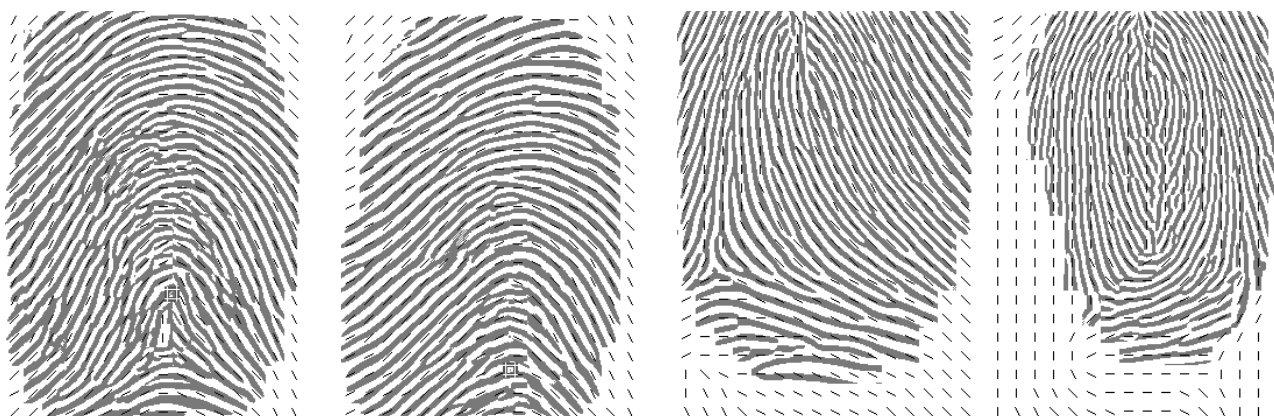
(ก) Original Finger#095_03

(ข) Enhanced Finger#095_03

(ค) Enhanced Finger#076_08

(ง) Enhanced Finger#076_08

รูปที่ 4.12 ปัญหาการหาจุดโฟกัสไม่เสถียรจากตำแหน่งการวางนิ้ว โดยทั้งสองภาพตัวอย่างไม่สามารถหาจุดโฟกัสได้ (ภาพในฐานข้อมูล FVC2000 DB2a)



(ก) Enhanced Finger#078_02

(ข) Enhanced Finger#078_04

(ค) Enhanced Finger#070_03

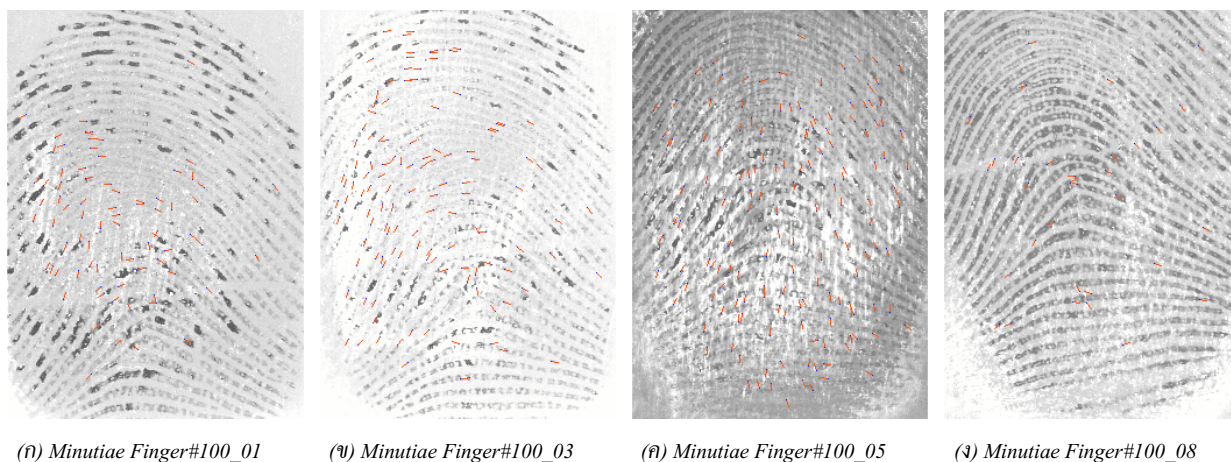
(ง) Enhanced Finger#096_05

รูปที่ 4.13 ปัญหาการหาจุดโฟกัสไม่เสถียรจากลักษณะของลายนิ้วมือแบบ Arch หรือแบบ Tented Arch ในภาพ (ก) และ (ข) กับภาพที่สูญเสียโค้งบน (ค) และ (ง) (ภาพในฐานข้อมูล FVC2000 DB2a)

- วิธีการแก้ไขปัญหาคัดโฟกัสไม่เสถียร โดยพัฒนาขั้นตอนวิธีที่ทำให้ไม่ขึ้นกับภาพที่ผ่านการทำ Gabor Filtering มาแล้วโดยใช้วิธี Direct Gray Scale รวมทั้งการนำจุด Core และ Delta มาช่วยอ้างอิง ทำให้สามารถหาองศาการหมุนของภาพที่เข้ามากับภาพในฐานข้อมูลได้ ทำให้การเปรียบเทียบมีความแม่นยำยิ่งขึ้น

3. ปัญหาของขั้นตอนวิธีการดึงลักษณะเด่นภาพลายนิ้วมือ (Fingerprint Feature Extraction Algorithm)

- การใช้จุดมินูเทียร์เป็นลักษณะเด่นในการเปรียบเทียบลายนิ้วมือใน FVS v1.4 มีประสิทธิภาพพอใช้ได้ แต่เนื่องจากการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือในปัจจุบันยังไม่สมบูรณ์ ทำให้มินูเทียร์ที่หาได้จากภาพที่ทำการปรับปรุงแล้วนั้น เป็นจุดมินูเทียร์ปลอมหรือเทียมจำนวนมาก ทำให้การเปรียบเทียบล้มเหลว ตัวอย่างเช่นรูปที่ 4.14 ขั้นตอนวิธีนี้จะถูกประเมินอีกครั้งเมื่อขั้นตอนวิธีการปรับปรุงได้รับการแก้ไขจนถึงที่สุดแล้ว



รูปที่ 4.14 ปัญหาจุดมินูเทียร์เทียมเกิดจากปรับปรุงภาพผิดพลาดโดยที่ทั้งสี่ภาพมาจากลายนิ้วมือเดียวกัน เส้นเล็ก ๆ จะมีหัวสีดำเป็นจุดมินูเทียร์ที่ตรวจจับได้จากโปรแกรม (ภาพในฐานข้อมูล FVC2000 DB2a)

- วิธีการแก้ไขปัญหาคัดการใช้จุดมินูเทียร์เป็นลักษณะเด่นที่มีมินูเทียร์ปลอม ต้องแก้ไขการปรับปรุงภาพ ในขณะเดียวกันขั้นตอนการดึงมินูเทียร์จะต้องมีการตรวจสอบและการกรองมินูเทียร์เทียม รวมทั้งขณะนี้ได้เตรียมพร้อมที่จะเพิ่มลักษณะเด่นอื่น ๆ ให้สามารถตรวจสอบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เพื่อเตรียมการแก้ปัญหาคัดการใช้จุดมินูเทียร์เปรียบเทียบเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ ถ้ามีจำนวนลายนิ้วมือมากในอนาคต

4. ปัญหาของขั้นตอนวิธีการเปรียบเทียบรหัสลายนิ้วมือ (Fingerprint Code Matching Algorithm)

- ขั้นตอนการเปรียบเทียบมีปัญหาในกรณีที่คุณภาพของภาพไม่ดี ถ้าขั้นตอนวิธีการปรับปรุงลายนิ้วมุล้มเหลว การเปรียบเทียบก็จะล้มเหลวตามไปด้วยเนื่องจากไม่สามารถตรวจจับจุดมินูเทียร์ที่แท้จริงได้ และได้แต่มินูเทียร์ปลอมและการรบกวนจากฝุ่น รอยเก่า และรอยการรูดนิ้ว
- วิธีการแก้ไขปัญหาคัดขั้นตอนวิธีการเปรียบเทียบ (Matching) กำลังอยู่ในช่วงเพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มเงื่อนไขที่รวมลักษณะเด่นอื่น ๆ เพื่อให้ทนทานต่อการรบกวนต่าง ๆ คาดว่าการตรวจสอบมีความแม่นยำ เชื่อถือได้สูงขึ้นเมื่อทำการพัฒนาแล้ว

5. วิจารณ์ผลการวิจัยและสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนาขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมืออัตโนมัติให้เป็นของไทย โดยได้ทำการพัฒนาขั้นตอนวิธีการตรวจสอบลายนิ้วมือที่มีอยู่ในวารสารทางวิชาการต่าง ๆ มาประยุกต์กับความรู้ที่มีและสร้างองค์ความรู้ใหม่ โดยเฉพาะสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้เน้นผลงานตีพิมพ์ จึงต้องทำงานเฉพาะในบางส่วนซึ่งสามารถตีพิมพ์ได้โดยให้ความสำคัญกับการพัฒนาตัวกรองกาเบอร์ที่เป็นที่นิยมใช้ในการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือ ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นและทำงานได้เร็วขึ้น ทำให้ความถูกต้องของการตรวจสอบลายนิ้วมือของระบบโดยรวมดีขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ถึงที่สุด จะเห็นว่ายังมีขั้นตอนวิธีประกอบอีกหลายส่วนที่ต้องพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อให้ขั้นตอนวิธีตรวจสอบลายนิ้วมือของไทยสามารถแข่งขันในระดับนานาชาติได้ ทั้งในเชิงการแข่งขัน FVC2006 ครั้งต่อไปและการแข่งขันในเชิงพาณิชย์และต้นแบบเชิงอุตสาหกรรมได้ด้วย

6. หนังสือและเอกสารอ้างอิง

- [1] D. Maltoni, D. Maio, A. K. Jain, and S. Prabhakar, "Handbook of Fingerprint Recognition", Springer, 2003.
- [2] D. Maio, D. Maltoni, R. Capelli, J.L. Wayman, and A.K. Jain, "FVC 2000: Fingerprint Verification Competition", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 24, No. 3, pp. 402-412, 2002. (FVC 2000 Website; <http://bias.csr.unibo.it/fvc2000/>)
- [3] D. Maio, D. Maltoni, R. Cappelli, U. Wayman, and A.K. Jain, "FVC2002: Second Fingerprint Verification Competition", *Proceedings of IEEE 16th International Conference on Pattern Recognition*, Vol.3, pp. 811-814, 2002. (FVC 2002 Website; <http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/>)
- [4] FVC 2004 Website; <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004/>
- [5] L. Hong, Y. Wan, and A.K. Jain, "Fingerprint Image Enhancement; Algorithm and Performance Evaluation", *IEEE Transactions on PAMI*, vol. 20, No. 8, pp. 777-789, August 1998.
- [6] Y. He, J. Tian, X. Luo, T. Zhang, "Image Enhancement and Minutiae Matching in Fingerprint Verification", *Pattern Recognition Letters*, 24, Elsevier, pp 1349-1360, 2003.
- [7] D. Maio and D. Maltoni, "Direct Gray-Scale Minutiae Detection in Fingerprints", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 19, No. 1, pp. 27-40, 1997.
- [8] วรากร คำแก้ว, "การประมวลผลภาพสำหรับการรู้จำลายนิ้วมือ", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พ.ศ. 2543
- [9] A.K. Jain, L. Hong, S. Pankanti, R. Bolle, "An Identity-Authentication System Using Fingerprints", *Proceeding of the IEEE*, Volume: 85 Issue: 9, September 1997, Page(s): 1365-1388.
- [10] A.M. Bazen, S.H. Gerez, "Systematic Methods for the Computation of the Directional Fields and Singular Points of Fingerprint", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume: 24 Issue: 7, July 2002, Page(s): 905-919.
- [11] V. Areekul, U. Watchareeruetai, and S. Tantaratana, "Fast Separable Gabor Filter for Fingerprint Enhancement," *Proceeding International Conference on Biometric Authentication (ICBA2004)*, LNCS3072, Springer, pp. 403-409, 2004.
- [12] V. Areekul, U. Watchareeruetai, K. Suppasriwasuseth, and S. Tantaratana, "Separable Gabor Filter Realization for Fast Fingerprint Enhancement," *Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2005)*, to be appeared.
- [13] X. Jiang and W.Y. Yau, "Fingerprint Minutiae Matching Based on the Local and Global Structures," *Proceeding International Conference on Pattern Recognition (15th)*, vol.2, pp. 1042-1045, 2000
- [14] K. Rerkrai and V. Areekul, "A New Reference Point for Fingerprint Recognition," *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2000)*, vol.2, September 10-13, 2000, pp. 499-502.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า)

ยังไม่มี มีแต่ Conference Proceeding ที่เป็น Lecture Note on Computer Science และมี Impact Factor เท่ากับ 0.515 ตามที่ Journal Impact Factor ปี 2002 (ตัวย่อ LECT NOTES COMPUT SC)

ขณะนี้กำลังอยู่ในช่วงการทดสอบขั้นตอนวิธีการปรับปรุงภาพลายนิ้วมือในส่วนที่ยังบกพร่องและมีปัญหาดังที่ได้กล่าวไว้ในรายงาน และจะทำการสรุปเขียนบทความวารสารวิชาการนานาชาติ ซึ่งขึ้นอยู่กับผลงานขั้นสุดท้ายว่าเหมาะสมจะส่งไปที่ใดใน

- 1.1) Pattern Recognition Letter (Impact Factor 0.809 /JIF 2003 (PATTERN RECOGN LETT))หรือ
- 1.2) Pattern Recognition (Impact Factor 1.611 /JIF 2003 (PATTERN RECOGN)) หรือ
- 1.3) IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence ในฉบับ May 2007 โดยมี Special Issue “Biometrics: Progress and Directions” Submission Deadline วันที่ 1 ธันวาคม 2548 นี้ (Impact Factor 3.823 /JIF 2003 (IEEE T PATTERN ANAL))

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- เชิงพาณิชย์ (มีการนำไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการนำไปประยุกต์ใช้โดยภาครัฐกิจ/บุคคลทั่วไป)

กำลังอยู่ในช่วงพัฒนาต้นแบบทางอุตสาหกรรมจากต้นแบบภาคสนามดังแสดงในรูปที่ 1 โดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาต้นแบบทางอุตสาหกรรมจาก NECTEC จะใช้เวลาอีกประมาณ 9 เดือนจะออกเป็นต้นแบบเชิงพาณิชย์ โดย มี บ ริ ษั ท เ อ ก ช น คื อ

Interphonic (Thailand) Co., Ltd ให้ความสนใจจะนำไปผลิตขาย



รูปที่ 1 ฮาร์ดแวร์ตรวจสอบลายนิ้วมืออัตโนมัติที่ออกแบบและพัฒนาโดยคนไทยทั้งหมด เป็นต้นแบบทดสอบภาคสนาม สามารถประมวลผลได้ในตัว (Standalone)

- เจริญนโยบาย (มีการกำหนดนโยบายองงานวิจัย/เกิดมาตรการใหม่/เปลี่ยนแปลงระเบียบข้อบังคับหรือวิธีการทำงาน)

ไม่มี

- เจริญสาธารณะ (มีเครือข่ายความร่วมมือ/สร้างกระแสความสนใจในวงกว้าง)
สำนักงานตรวจคนเข้าเมืองให้เข้าไปช่วยประเมินปัญหาและช่วยแก้ไขระบบตรวจสอบลายนิ้วมือบุคคลต่างด้าวที่ลักลอบเข้ามาทำงานในประเทศ

- เจริญวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)
สร้างนักวิจัยใหม่ทางด้านขั้นตอนวิธีตรวจสอบลายนิ้วมือ 3 คน คือ นายอุกฤษฏ์ วัชรฤทัย นายกิตติวัฒน์ ศุภศรีวิสุเศรษฐ์ และนายสุขสันต์ จิระเขวง

3. อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือการจดสิทธิบัตร)

- 3.1) V. Areekul, U. Watchareeruetai, and S. Tantaratana, “Fast Separable Gabor Filter for Fingerprint Enhancement,” ICBA2004, Lecture Notes in Computer Science LNCS3072, Springer-Verlag, pp. 403-409.

หมายเหตุ เป็นบทความประชุมวิชาการที่เป็น Lecture Notes in Computer Science ของสำนักพิมพ์ Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004 ในการประชุมวิชาการ First International Conference on Biometric Authentication, ICBA2004, Hong Kong, China, July 2004 มี Impact Factor 0.515 โดยอ้างอิง Impact Factor จาก Journal Citation Report (JCR) year 2002 – Science Edition

- 3.2) V. Areekul, U. Watchareeruetai, K. Suppasriwasuseth, and S. Tantaratana, “Separable Gabor Filter Realization for Fast Fingerprint Enhancement,” Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing 2005 (ICIP 2005), Genova, Italy, to be appeared.

หมายเหตุ ได้รับการตอบรับให้ไปนำเสนอบทความ IEEE ICIP 2005 ซึ่งเป็นการประชุมวิชาการทางด้าน Image Processing ที่ใหญ่และได้รับความเชื่อถือมากที่สุดในโลก มีบทความส่งเข้าประเมินทั้งหมด 2,100 บทความ ได้รับการตอบรับให้นำเสนอ 46% โดยใช้ Peer Review ทั้งหมด 3 ท่าน รายละเอียดสามารถดูได้จาก Website: <http://www.icip05.org>

ภาคผนวก

1. บทความประชุมวิชาการนานาชาติ

V. Areekul, U. Watchareeruetai, and S. Tantaratana, "Fast Separable Gabor Filter for Fingerprint Enhancement," ICBA2004, Lecture Notes in Computer Science LNCS3072, Springer-Verlag, pp. 403-409

2. บทความประชุมวิชาการนานาชาติ

V. Areekul, U. Watchareeruetai, K. Suppasriwasuseth, and S. Tantaratana, "Separable Gabor Filter Realization for Fast Fingerprint Enhancement," Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing 2005 (ICIP 2005), Genova, Italy, to be appeared.

David Zhang
Anil K. Jain (Eds.)

LNCS 3072

Biometric Authentication

First International Conference, ICBA 2004
Hong Kong, China, July 2004
Proceedings



Springer

Lecture Notes in Computer Science

3072

Commenced Publication in 1973

Founding and Former Series Editors:

Gerhard Goos, Juris Hartmanis, and Jan van Leeuwen

Editorial Board

Takeo Kanade

Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA

Josef Kittler

University of Surrey, Guildford, UK

Jon M. Kleinberg

Cornell University, Ithaca, NY, USA

Friedemann Mattern

ETH Zurich, Switzerland

John C. Mitchell

Stanford University, CA, USA

Moni Naor

Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel

Oscar Nierstrasz

University of Bern, Switzerland

C. Pandu Rangan

Indian Institute of Technology, Madras, India

Bernhard Steffen

University of Dortmund, Germany

Madhu Sudan

Massachusetts Institute of Technology, MA, USA

Demetri Terzopoulos

New York University, NY, USA

Doug Tygar

University of California, Berkeley, CA, USA

Moshe Y. Vardi

Rice University, Houston, TX, USA

Gerhard Weikum

Max-Planck Institute of Computer Science, Saarbruecken, Germany

Volume Editors

David Zhang

The Hong Kong Polytechnic University, Department of Computing

Hung Hom, Kowloon, Hong Kong

E-mail: csdzhang@comp.polyu.edu.hk

Anil K. Jain

Michigan State University, Department of Computer Science and Engineering

3115 Engineering Building, East Lansing, MI 48824-1226, USA

E-mail: jain@cse.msu.edu

Library of Congress Control Number: 2004107177

CR Subject Classification (1998): I.5, I.4, K.4.1, K.4.4, K.6.5, J.1

ISSN 0302-9743

ISBN 3-540-22146-8 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

This work is subject to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the material is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, re-use of illustrations, recitation, broadcasting, reproduction on microfilms or in any other way, and storage in data banks. Duplication of this publication or parts thereof is permitted only under the provisions of the German Copyright Law of September 9, 1965, in its current version, and permission for use must always be obtained from Springer-Verlag. Violations are liable to prosecution under the German Copyright Law.

Springer-Verlag is a part of Springer Science+Business Media

springeronline.com

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004

Printed in Germany

Typesetting: Camera-ready by author, data conversion by DA-TeX Gerd Blumenstein
Printed on acid-free paper SPIN: 11012559 06/3142 5 4 3 2 1 0