



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

การตรวจสอบเพื่อระบุใบหน้าและวัตถุจากภาพถ่ายดิจิทัล

Investigation for face and object identification from a digital image

เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย* ปัญจรัตน์ สมุทรสร วรล ชี้อตรง และนิติกร บุญสถิตย์

Kiattisak Sritrakulchai*, Pajarath Samuthsorn, Warun Suethong, and Nitikorn Boonsatit

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดนครปฐม 73170

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Nakhon Pathom, Thailand, 73170

Received October 2012

Accepted April 2013

บทคัดย่อ

การตรวจสอบคุณภาพในด้านของความถูกต้องของวัตถุที่มีความซับซ้อนในรายละเอียดมากที่ต้องใช้สายตาตามมนุษย์ในการตรวจสอบเป็นเวลานานนั้นมีข้อจำกัดในความเมื่อยล้า ความสามารถในการจำ และความชำนาญ งานวิจัยนี้จึงได้เสนอระบบการตรวจสอบที่รวดเร็ว ง่ายและ ราคาถูก สำหรับวัตถุที่มีรายละเอียดซับซ้อนโดยใช้ภาพถ่ายดิจิทัลด้วยวิธีเวฟเล็ตทรานฟอร์ม และการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก 2 มิติ โดยมีหกปัจจัยที่ใช้ทดสอบความถูกต้องกับใบหน้ามนุษย์และสิ่งของ คือ ชนิดเวฟเล็ต ระดับการแปลงเวฟเล็ต ลักษณะของภาพ ขนาดของภาพ จำนวนไอเกนเวกเตอร์ และจำนวนของฐานข้อมูล ผลการทดสอบพบว่าชนิดเวฟเล็ต Haar แปลงที่ระดับ 1 ภาพถ่ายทั้งศีรษะ ขนาดภาพ 100 x 100 พิกเซล ไอเกนเวกเตอร์เท่ากับ 5 จำนวนฐานข้อมูลเท่ากับ 8 มีค่าร้อยละความถูกต้องเท่ากับ 100 สำหรับการตรวจสอบระบุใบหน้าบุคคล หรือระบุชนิดของวัตถุ และค่าเฉลี่ยร้อยละความถูกต้องของทุกไอเกนเวกเตอร์เท่ากับ 98.75 สำหรับการตรวจสอบระบุใบหน้าบุคคล

คำสำคัญ : รู้จำภาพ เวฟเล็ตทรานฟอร์ม การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก การระบุเอกลักษณ์วัตถุ

Abstract

The quality investigation on complex detail accuracy of an object by using the human vision in a long time is limited on the fatigue, memory ability and skill. This research proposes the rapid simple and economical investigation system for a complex detail object on a 2D digital image by using the wavelet transform and 2D principal component analysis, 2DPCA. The six discriminated factors for the human face and object identification are wavelet type, wavelet level, picture characteristic, size of the picture, number of eigenvector and number of database. The experimental results from the suitably factor settings with the level 1 of Haar-wavelet transform, head shots, 100*100 pixel resolution size, 5 eigenvector and 8 database indicate 100

*Corresponding author. Tel.: +66-2889-2138 ext.6222; fax: +66-2889-2138 ext. 6229

Email address: kiattisak.sri@mahidol.ac.th

percent accuracy of the human face or object identification investigation and 98.75 percent average of every number of eigenvectors for the human face identification.

Keywords : Image recognition, Wavelet transform, Principal component analysis, Object identification

1. บทนำ

ในยุคอุตสาหกรรมปัจจุบันนี้ในส่วนของกระบวนการผลิต จำเป็นต้องมีการผลิตที่ถูกต้องแม่นยำ และมีความรวดเร็วเพราะคุณภาพจะเป็นตัวที่จะใช้แข่งขันกับคู่แข่งทางการตลาดจึงทำให้เกิดกระบวนการในการตรวจสอบขึ้นมาหลังจากผลิตผลิตภัณฑ์หนึ่งเสร็จแล้ว จึงทำให้เกิดแผนกควบคุมคุณภาพ (Quality control) ขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่ในการตรวจผลิตภัณฑ์เพื่อให้ถูกต้องและตรงรูปแบบที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งขั้นตอนหรือรูปแบบในการตรวจสอบนั้นก็จะแตกต่างกันไปตามชนิดของผลิตภัณฑ์ แต่ก็จะมีผลิตภัณฑ์บางประเภทที่จะทำให้เกิดความล่าช้าในการตรวจสอบอันเนื่องมาจาก ผลิตภัณฑ์นั้นมีรายละเอียดมากซึ่งคนจะต้องใช้เวลาในการตรวจสอบ 1 ชิ้นงาน หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการร้อยละความถูกต้องเท่ากับ 100 ก็จะใช้เวลาและทรัพยากรมากขึ้น และการใช้คนตรวจสอบนั้นอาจเกิดความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ และไม่สามารถที่จะจดจำรายละเอียดได้มากนัก จากปัญหาที่ได้กล่าวมา จึงทำให้เกิดการคิดค้นเพื่อใช้ในการตรวจสอบโดยที่ใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการประมวลผลตรวจสอบเนื่องมาจากคอมพิวเตอร์สามารถที่จะจดจำรายละเอียดในปริมาณมากได้ และมีความถูกต้องแม่นยำสูง อีกทั้งยังมีความรวดเร็วกว่าคน โดยใช้รูปภาพที่ได้จากการถ่ายภาพจากกล้องดิจิทัล มาผ่านกระบวนการประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ใช้กระบวนการเวเลตทรานฟอร์ม และการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis ; PCA) มาใช้ในการตรวจสอบ

จากงานวิจัยของ [1] ได้ทำระบบตรวจสอบลายนิ้วมือเพื่อใช้ในการยืนยันและพิสูจน์ตัวบุคคลโดยใช้กระบวนการการแปลงเวเลต (Wavelet transform) ด้วยโปรแกรมแมทแลป (Matlab) โดยใช้ Discrete meyer wavelet เป็นฟังก์ชันในการแปลงโดยทำการแปลง 3 ระดับเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวแทนลายนิ้วมือ นอกจากนั้นการแปลงเวเลตยังสามารถนำไปใช้ในการค้นคืนภาพได้โดยใช้ร่วมกับวิธีฮอโตคอร์รีโลแกรม [2]

ในการสร้างระบบการจดจำใบหน้า [3-4] ใช้วิธีเวเลตสองมิติ (2D wavelet) ที่ย่านความถี่ LL แปลงภาพเพื่อหาเวกเตอร์ลักษณะเด่นบนใบหน้ามนุษย์ และในการสร้างระบบจดจำใบหน้า [5] โดยใช้ทฤษฎี Two dimension principal component analysis (2DPCA) มาใช้แทนทฤษฎีเดิมที่นิยมใช้กันคือ Principal component analysis (PCA) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้วิธี PCA มาแทนใบหน้ามนุษย์เป็นครั้งแรกโดย [6-7] และหลังจากนั้นได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางและเป็นวิธีที่ประสบความสำเร็จวิธีหนึ่งในการรู้จำใบหน้า [8-9] แต่หลังจากนั้น [5] ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง 2DPCA และ PCA แล้วผลปรากฏว่า 2DPCA นั้นมีข้อที่ดีกว่า PCA ซึ่งข้อมูลที่ได้จากวิธี 2DPCA เป็นการพิจารณาข้อมูลในรูปของเวกเตอร์ 2 มิติ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในประมวลผลภาพถ่าย

ในงานวิจัย [10] การทำระบบจดจำใบหน้าโดยใช้ 2DPCA กับเวเลตชนิดต่างๆ โดยทำการทดลองใช้เวเลตจำนวน 49 ชนิดเพื่อหาชนิดของเวเลตที่เหมาะสมที่สุดในการใช้กับระบบจดจำใบหน้า และทำการแปลง

เวฟเล็ตตั้งแต่ระดับที่ 1 ถึง ระดับที่ 8 โดยผลการทดลองที่ได้จากค่าเฉลี่ยของความถูกต้องทั้งหมดจะอยู่ที่ร้อยละ 85 ชนิดของเวฟเล็ตที่ถูกต้องมากที่สุดที่ระดับ 2 และ 3 คือ Symlet ลำดับที่ 7

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมา เป็นการทดลองเพื่อหาชนิดของเวฟเล็ตที่เหมาะสมที่สุดสำหรับภาพที่ได้เตรียมขึ้นเพื่อใช้ทดสอบกับงานวิจัยโดยเฉพาะ โดยปัจจัยอื่นๆ ยังไม่ได้ถูกนำมาพิจารณาเมื่อต้องการนำหลักการนี้ไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรม เช่น ปัจจัยของภาพถ่ายที่เหมาะสมและปัจจัยของไอเกนเวกเตอร์ในทฤษฎี 2DPCA และอื่นๆ ที่มีผลต่อความถูกต้อง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทดสอบหาปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของระเบียบวิธี 2DPCA และ เวฟเล็ตเพื่อใช้ในการตรวจสอบรายละเอียดของภาพถ่ายใบหน้าบุคคลหรือชนิดวัตถุที่ได้ถ่ายขึ้นตามสภาพการใช้งานโดยทั่วไป และพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ตรวจสอบหาปัจจัยที่เหมาะสม ด้วยวิธีเชื่อมโยงเปรียบเทียบความถูกต้องกับฐานข้อมูลเพื่อตรวจสอบการระบุเอกลักษณ์

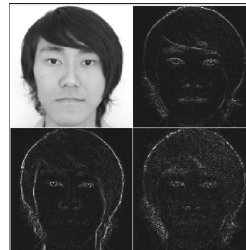
2. วิธีการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยนี้จะเริ่มตั้งแต่การกำหนดปัจจัยที่มีใช้ในการตรวจสอบของวิธี 2DPCA และเวฟเล็ตเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและปรับปรุงภาพถ่าย โดยได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องต่างๆ สำหรับภาพถ่ายใบหน้าบุคคลหรือชนิดวัตถุ วิธีการเตรียมข้อมูลทดสอบ และ วิธีการทดสอบปัจจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

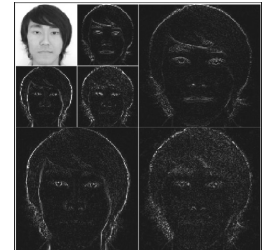
2.1 ปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบ

ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องในการตรวจสอบและรู้จำภาพ ด้วยวิธี 2DPCA และเวฟเล็ต ในงานวิจัย [5], [10-11] ได้มีการทดลองในแต่ละวิธีดังนั้นก็ได้นำมาเป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบเมื่อนำทั้งสองวิธีมาใช้ในการตรวจสอบร่วมกัน ดังนี้

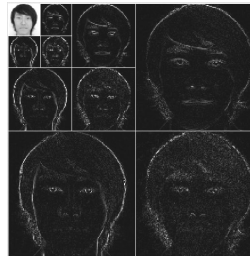
1) ชนิดการแปลงเวฟเล็ตโดยจะใช้เวฟเล็ต 2 ชนิด คือ Symlet7 และ Haar เนื่องจาก symlet7 เป็นเวฟเล็ตที่ได้รับความนิยมและให้ผลที่ดีที่สุดในงานวิจัย [5] และเวฟเล็ต Haar เป็นเวฟเล็ตพื้นฐาน ที่ง่ายต่อการคำนวณ



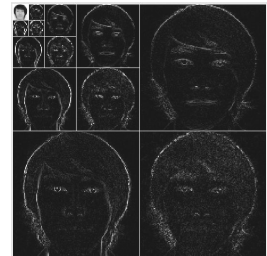
ก) ระดับ 1



ข) ระดับ 2



ค) ระดับ 3



ง) ระดับ 4

รูปที่ 1 ภาพที่ผ่านขบวนการแปลงเวฟเล็ตในระดับต่างๆ

2) ระดับที่ใช้ในการแปลงของเวฟเล็ต โดยจะทดลองที่ระดับ 1, 2, 3 และ 4 เนื่องจาก [10] ระบุว่าผลที่ดีอยู่ที่ระดับที่ 2, 3 นอกจากนั้นภาพใช้ในการทดลองถ้าผ่านกระบวนการแปลงเวฟเล็ตจะมีขนาดที่เล็กลงเรื่อยๆ ตามลำดับการแปลงดังรูปที่ 1

3) จำนวนไอเกนเวกเตอร์ โดยทดลองที่จำนวน 3, 5, 7 และ 9 ซึ่งจำนวนไอเกนเวกเตอร์ที่เลือกมาเป็นจำนวนที่เหมาะสมของวิธี 2DPCA [11] ซึ่งทำการทดลองว่าจำนวนไอเกนเวกเตอร์ในช่วงที่เหมาะสมที่สุด

4) จำนวนของฐานข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง โดยทดลองที่ 3, 6 และ 8 เพื่อดูแนวโน้มผลของจำนวนฐานข้อมูล

5) ขนาดของรูปที่นำมาทดลอง โดยทดลองที่ขนาด 100 x 100, 200 x 200 และ 300 x 300 พิกเซล เนื่องด้วยขนาดภาพเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเวลาในการ

ประมวลผลซึ่งขนาดภาพยิ่งใหญ่มากก็จะทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลมากและมีผลต่อความถูกต้องจึงทำการหาขนาดรูปที่เหมาะสมที่สุด และภาพที่ใช้ประมวลผลจะเป็นภาพที่เป็นระดับสีเทา (Gray scale)

6) ภาพลักษณะใบหน้าที่ใช้ มี 2 ลักษณะคือ ตัดเฉพาะส่วนใบหน้าตั้งแต่คิ้วถึงคาง และภาพที่ตัดทั้งศีรษะคือตั้งแต่ผมจนถึงปลายคาง เพื่อทดสอบผลของรายละเอียดของภาพที่ต่างกัน

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาปัจจัยนั้นจะมี 3 ส่วนคือ

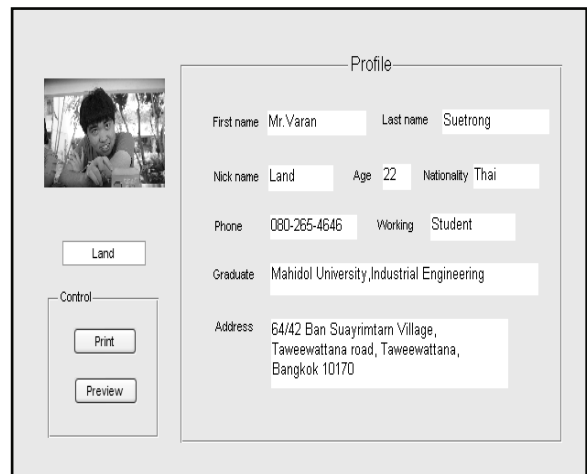
1) โปรแกรม GIMP (GNU image manipulation program) ใช้ในการปรับปรุงรูปภาพ เพื่อปรับเปลี่ยนรายละเอียดของภาพเพื่อใช้ในการทดสอบตามที่ได้กำหนดปัจจัยเพื่อหารายละเอียดของภาพที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการตรวจสอบ และปรับค่าสีเป็นระดับสีเทา (Grey scale) เพราะในการทดสอบนี้จะตรวจสอบความถูกต้องภาพที่มีระดับสีเทาเท่านั้น

2) โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) ซึ่งผู้วิจัยใช้สำหรับเขียนโปรแกรมพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณการประมวลผลภาพเพื่อตรวจสอบความถูกต้องด้วยวิธี 2DPCA และเวฟเล็ต และผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบประมวลผลภาพจะเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลเพื่อระบุใบหน้าบุคคลหรือชนิดของวัตถุที่อยู่ในภาพ

3) กราฟฟิก (Graphic user interface: GUI) เป็นส่วนที่ใช้ในการติดต่อกับผู้ใช้งาน ซึ่งผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมขึ้นเพื่อใช้งานบนโปรแกรมแมทแลป ดังรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 หน้าต่างการป้อนค่าปัจจัยเพื่อจัดเก็บฐานข้อมูลและตรวจสอบปัจจัย



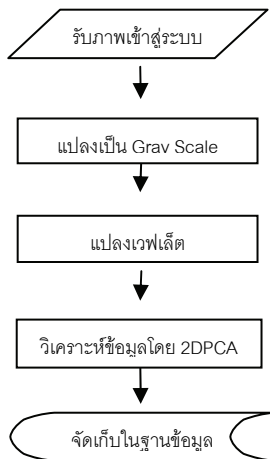
รูปที่ 3 ผลการตรวจสอบระบุตัวบุคคลจากใบหน้า

2.3 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลการทดสอบ

1) ขั้นตอนการปรับปรุงรูปภาพที่ได้จากการถ่ายภาพใบหน้าบุคคลหรือชนิดวัตถุ นำมาปรับปรุงโดยการตัดภาพและลดขนาดของภาพตามปัจจัยที่กำหนดได้กำหนดไว้ โดยใช้โปรแกรม GIMP เพื่อนำไปใช้ในการแปลงภาพและเก็บข้อมูลของภาพเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการตรวจสอบวิเคราะห์ต่อไป

2) ขั้นตอนการแปลงภาพและเก็บข้อมูลภาพเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการตรวจสอบ

- รับภาพจากกระบวนการปรับปรุงรูปภาพ เพื่อเข้าสู่กระบวนการแปลงและวิเคราะห์ภาพเพื่อที่จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแทนรูปภาพในแต่ละภาพเก็บในฐานข้อมูล ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบโดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการแปลงและเก็บข้อมูลภาพเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล

- แปลงภาพเป็นภาพระดับสีเทา (Gray scale) ในแต่ละพิกเซล ด้วยสมการที่ (1) เพื่อลดขนาดของเมตริกซ์จาก 3 เมตริกซ์เหลือ 1 เมตริกซ์ซึ่งค่าระดับสีเทาซึ่งมีค่าตั้งแต่ค่า 0 ถึง 255 เพื่อง่ายต่อการคำนวณ

$$Grey_level = \frac{R + G + B}{3} \quad (1)$$

- แปลงเวฟเลตเพื่อทำการลดขนาดของภาพที่ระดับ 1 ถึง 4 ดังรูปที่ 1 และหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวแทนของภาพ [12-13] ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของภาพๆ นั้นจะเป็นค่าที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ข้อมูลของภาพเพื่อใช้ในการจัดเก็บในฐานข้อมูลและนำไปใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลภาพต่อไป โดยจะใช้คำสั่งในโปรแกรมแมทแลบในการแปลง

เวฟเลต คือ dwt2 (name,'wname') โดยที่ name คือชื่อภาพ และ 'wname' คือ ชนิดของเวฟเลต โดยระดับการแปลงเวฟเลตว่าจะแปลงเป็นจำนวนกี่ครั้ง ก็จะเป็นปัจจัยที่ต้องทดสอบ และค่าย่านการกรองสัญญาณความถี่ของภาพจะใช้ย่านกรองความถี่ต่ำ (Lowpass filter) ทั้งในแนวนอน และในแนวตั้ง ของพิกเซลภาพเพื่อให้พิกเซลภาพที่ไม่ถูกต้องถูกกำจัดออกไป โดยเมตริกซ์ที่ได้จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ในย่านความถี่ LL

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (2)$$

โดยที่ A คือเมตริกซ์จัตุรัสมีขนาด $k \times l$ ซึ่งเป็นเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ตัวแทนของภาพที่ผ่านการแปลงการค่าสีในแต่ละพิกเซลเป็นภาพระดับสีเทาและผ่านการแปลงเวฟเลตเป็นค่าสัมประสิทธิ์แล้ว

$\bar{X}$ คือค่าเมตริกซ์เฉลี่ย

j คือแต่ละหลักของเมตริกซ์ $1 \leq j \leq m$

n คือจำนวนภาพ

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{X})^T (A_i - \bar{X}) \quad (3)$$

C คือ ค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วม

$$j(w) = w^T C w \quad (4)$$

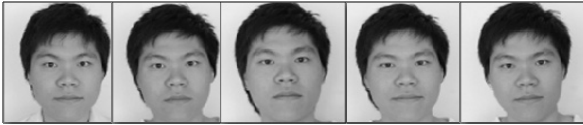
$j(w)$ คือ ค่าไอเกนแวลู (eigenvalue)

w คือ ค่าเป็นเมตริกซ์ไอเกนเวกเตอร์ (eigenvector) ตั้งฉากขนาดหนึ่งหน่วย

$$Y_i = A_i w_{optimal} \quad (5)$$

Y_i คือ เวกเตอร์คุณลักษณะซึ่งใช้เป็นตัวแทนในการเปรียบเทียบ

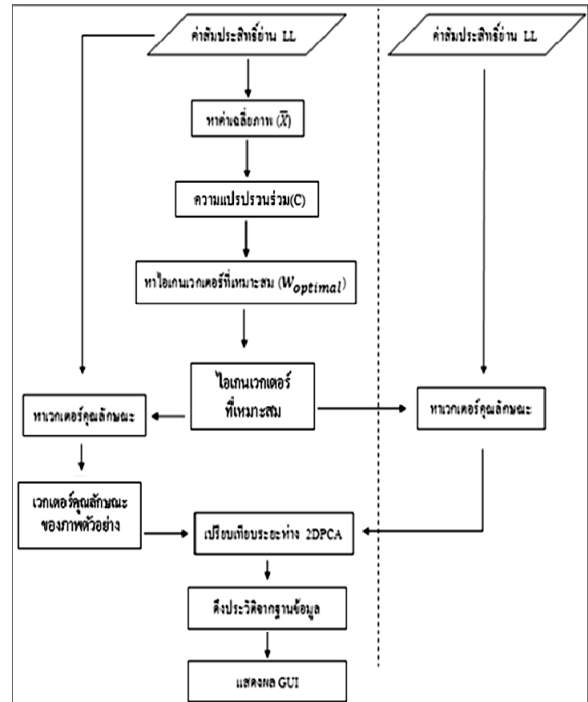
$w_{optimal}$ คือ ค่าเมตริกซ์ไอเกนเวกเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ค่าไอเกนแวลูมีค่ามากที่สุดโดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย



รูปที่ 5 ลักษณะใบหน้าที่ย้ายในท่าทางต่างๆ

- การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ 2DPCA [4] เป็นการวิเคราะห์ตรวจสอบข้อมูลภาพเพื่อระบุใบหน้าบุคคลหรือชนิดวัตถุ จำเป็นที่จะต้องหาค่าของข้อมูลภาพที่เป็นมาตรฐานเพื่อเอาไว้อ้างอิงสำหรับระบุบุคคลหรือชนิดวัตถุเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับภาพที่จะนำเข้ามาตรวจสอบเพื่อระบุบุคคลหรือชนิดวัตถุ ดังนั้นจึงต้องหาค่าที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการอ้างอิง โดยการนำภาพใบหน้าของแต่ละบุคคลที่ถ่ายในลักษณะท่าทางต่างๆ ดังรูปที่ 5 ซึ่งภาพแต่ละภาพจะผ่านกระบวนการตามที่กล่าวมาแล้วจนได้เมตริกซ์ A ที่ได้จากแปลงเวฟเล็ตซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ตัวแทนของภาพแต่ละภาพที่จะใช้เป็นฐานข้อมูล จากนั้นนำเมตริกซ์ A ของแต่ละภาพมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย $\bar{X}$ ของภาพทั้งหมดจากสมการที่(2) และคำนวณหาความแปรปรวนร่วม (C) จากสมการที่(3) โดยการนำเมตริกซ์ A ของภาพแต่ละภาพมาลบกับเมตริกซ์ค่าเฉลี่ย $\bar{X}$ แล้วคูณกับค่าเมตริกซ์ทรานโพสของการลบนี้ แล้วนำมาบวกกันหารด้วยจำนวนภาพทั้งหมดซึ่งในเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วม (C) นี่จะเป็นการระบุว่าเมตริกซ์ที่อยู่ในแต่ละคอลัมน์นี้เป็นเมตริกซ์ w ขนาด $k \times 1$ ซึ่งรวมกันอยู่เป็นเมตริกซ์ C โดยขั้นตอนต่อไปจะต้องทำการหาค่าไอเกนเวกเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าไอเกนแวลูมีค่ามากที่สุด ซึ่งจะทำการแทนค่าของค่า w ที่ได้จาก C ในแต่ละคอลัมน์ ลงในสมการที่(4) จะได้ค่า $j(w)$ ซึ่งจะได้ตัวเลขที่แตกต่างกัน จากนั้นนำแต่ละเมตริกซ์ w ขนาด $k \times 1$ มาเรียงลำดับในแต่ละคอลัมน์ใหม่จากค่าที่ได้จากการคำนวณค่าไอเกนแวลู $j(w)$ ที่ได้จากไอเกนแวลูมากไปน้อย จะเป็นการเรียงต่อกันของเมตริกซ์ w ซึ่งจะได้เมตริกซ์จัตุรัส $w_{optimal}$ ซึ่ง

เป็นค่าไอเกนเวกเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งเป็นตัวแทนของบุคคล หรือชนิดของวัตถุนั้นตามที่ได้แสดงกระบวนไว้ในรูปที่ 5



รูปที่ 6 กระบวนการเปรียบเทียบภาพวัตถุทั้งรูปภาพที่จะนำไปเป็นฐานข้อมูลและรูปที่นำเข้ามาเพื่อเปรียบเทียบ

- จัดเก็บในฐานข้อมูล จะต้องคำนวณหาเมตริกซ์อ้างอิงเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบตรวจสอบภาพเพื่อระบุใบหน้าบุคคลหรือชนิดวัตถุโดยจะใช้สมการที่ (5) หาค่าเวกเตอร์คุณลักษณะ (Y_i) ของภาพแต่ละภาพที่จะใช้เก็บเป็นฐานข้อมูลของบุคคลบุคคลหนึ่ง โดยเมตริกซ์ไอเกนเวกเตอร์ $w_{optimal}$ สามารถเลือกกว่าจะใช้จำนวนไอเกนเวกเตอร์ที่เหมาะสมก็คอลัมน์ ซึ่งจำนวนที่คอลัมน์นี้เป็นค่าปัจจัยที่จะต้องทดสอบว่าจะใช้จำนวนเท่าใดจึงจะเหมาะสม โดยในการเก็บฐานข้อมูลของแต่ละบุคคลจะมี 2 ส่วน คือ ไอเกนเวกเตอร์ที่เหมาะสมและเวกเตอร์คุณลักษณะ

$$d_v(Y_i, Y_t) = \sqrt{|(Y_i - Y_t)^T (Y_i - Y_t)|} \quad (6)$$

d_v คือ ค่าวัดระยะความคล้าย

Y_i คือ เวกเตอร์คุณลักษณะของภาพที่อยู่ในฐานข้อมูล

Y_r คือ เวกเตอร์คุณลักษณะของภาพที่นำเข้ามาเปรียบเทียบเพื่อระบุบุคคลหรือชนิดวัตถุ

- การเปรียบเทียบภาพที่จะตรวจสอบระบุบุคคลกับฐานข้อมูลดังรูปที่ 6 โดยภาพที่เข้ามาตรวจจะผ่านกระบวนการแปลงเวฟเลตย่านความถี่ LL แล้วนำมาหาเวกเตอร์คุณลักษณะตามสมการที่ (5) จากนั้นเปรียบเทียบภาพโดยใช้สมการที่ (6) เพื่อใช้วัดระยะความคล้ายกันของข้อมูลระหว่างเวกเตอร์คุณลักษณะของภาพที่นำเข้ามาตรวจสอบเพื่อระบุบุคคลกับเวกเตอร์คุณลักษณะของภาพแต่ละภาพในฐานข้อมูล ถ้าคู่ที่มีระยะห่างน้อยที่สุดถือว่ามีความคล้ายมากที่สุด ซึ่งโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นก็จะแสดงผลว่าเป็นภาพของบุคคลใดในฐานข้อมูลภาพนั้นดังรูปที่ 3 เป็นผลของการเปรียบเทียบภาพที่นำเข้ามาตรวจสอบกับฐานข้อมูล

2.4 วิธีการทดสอบปัจจัย

แอปพลิเคชันพร้อมกับหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้ที่ได้พัฒนาขึ้นนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการหาปัจจัยที่ดีที่สุดที่จะนำมาใช้กับระบบตรวจสอบเพื่อระบุบุคคลจากใบหน้าและระบุนิวัตต์ โดยใช้ตัวอย่างใบหน้าบุคคล 10 คน และจำนวนวัตต์ 10 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบ แต่เพื่อความหลากหลายของตัวอย่างข้อมูลภาพที่มากขึ้นในการประมวลผล ในการระบุบุคคลจะใช้ข้อมูลในฐานข้อมูลทั้งหมดของทุกคนทั้งหมดมีจำนวน 80 ภาพ และภาพชนิดวัตถุอีก 80 ภาพ ทั้งหมด 160 ภาพ โดยการทดสอบหาปัจจัยที่เหมาะสมตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 จะใช้การตรวจสอบระบุใบหน้าของบุคคลเพื่อทดสอบหาปัจจัย เพราะมีรายละเอียดที่มีความซับซ้อนกว่าวัตถุ ด้วยท่าทางลักษณะใบหน้าเปลี่ยนแปลงได้หลากหลาย ส่วนเงื่อนไข

ของแสงในเวลาการถ่ายภาพจะควบคุมให้แสงมีค่าใกล้เคียงกันทุกภาพทั้งภาพที่จัดทำฐานข้อมูลและภาพที่นำเข้ามาตรวจสอบ และทุกภาพทรงผมจะต้องไม่เปลี่ยนแปลง โดยเมื่อได้ปัจจัยที่เหมาะสมแล้ว จะทำการตรวจสอบการระบุชนิดวัตถุต่อไป

ปัจจัยในการทดลองมี 6 ปัจจัย คือ ชนิดเวฟเลต (W) ระดับการแปลงเวฟเลต (LV) จำนวนโอเกนเวกเตอร์ที่เหมาะสม (EV) จำนวนฐานข้อมูล (DB) ขนาดของรูป (P) และรายละเอียดของลักษณะภาพ (D) จะทำการทดลองโดยกำหนดให้ค่าปัจจัย 5 ปัจจัย คงที่ แล้วเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยที่ 1 จากนั้นจดบันทึกผลการทดลองว่าสามารถตรวจสอบภาพเพื่อระบุบุคคลความถูกต้องเป็นร้อยละเท่าใดของความถูกต้อง จากการนำภาพบุคคลใดบุคคลหนึ่งใน 10 คน เข้ามาตรวจสอบโดยภาพจะไม่ซ้ำกับภาพที่อยู่ในฐานข้อมูล

โดยวิธีการทดลองจะนำภาพที่ต้องการนำเข้ามาตรวจสอบเพื่อระบุบุคคลซึ่งภาพนี้จะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงภาพมาแล้ว จากนั้นจึงนำเข้าสู่โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อทดสอบ ซึ่งโปรแกรมจะทำงานตามที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นขั้นตอนตามรูปที่ 6 เพื่อใช้ในการทดสอบความถูกต้องในการระบุบุคคล ทำการทดลองจนครบ 10 คน จากนั้นคิดเป็นร้อยละความถูกต้อง ในแต่ละชุดของปัจจัยที่ใช้ทดสอบ จากนั้นเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัย 1 จนครบทุกตัว แล้วเปลี่ยนค่าปัจจัยที่ 2 วนกลับไปเริ่มเปลี่ยนค่าปัจจัยที่ 1 อีกครั้งจนครบ แล้วกลับมาเปลี่ยนปัจจัยที่ 2 แล้ววนกลับไปเริ่มเปลี่ยนปัจจัยที่ 1 อีก เมื่อวนปัจจัยที่ 1 ครบ ปัจจัยที่ 2 ครบก็ปรับค่าปัจจัย 3 แล้ววนปัจจัยที่ 1, 2 อีก จนครบปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัย ดังนั้น จำนวนครั้งของการทดลองเพื่อตรวจสอบการระบุใบหน้าบุคคลเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด คือ $((4EV \times 3DB) \times 4LV) \times 3P \times 2W \times 2D = 576$ ครั้ง การทดลองสำหรับทดสอบปัจจัยทั้งหมด

ในการทดลองภาพวัตถุจะนำปัจจัยที่ได้ทำการทดลองแล้วได้ผลการทดลองที่ดีที่สุดจากการทดลองภาพใบหน้าบุคคล และจะทำการเพิ่มปัจจัยในการทดลองกับภาพถ่ายวัตถุ โดยจะทำการทดลองปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1) ปัจจัยพื้นหลังของภาพโดยจะทำการลดปัจจัยที่เกิดจากเงาพื้นหลังออกโดยจะทำการลบพื้นหลังของภาพออกให้เหลือเฉพาะภาพวัตถุ และใส่สีพื้นหลังโดยจะทดลองสีของพื้นหลังด้วยกัน 2 สีคือ พื้นหลังสีขาว และสีดำ

2) ปัจจัยจำนวนไอเกนเวกเตอร์ ทดลองที่จำนวน 3, 5, 7 และ 9 ทดสอบอีกครั้งเพื่อหาว่าจำนวนไอเกนเวกเตอร์เท่าใดมีความเหมาะสม

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ตารางที่ 1 ชนิดของเวฟเล็ตกับผลความถูกต้อง

ชนิดเวฟเล็ต	ลักษณะภาพ	ความถูกต้อง (ร้อยละ)
Harr wavelet	ภาพทั้งศีรษะ	83.55
	ภาพแค่ใบหน้า	51.47
Symlet7 wavelet	ภาพทั้งศีรษะ	71.90
	ภาพแค่ใบหน้า	56.99

ตารางที่ 2 เวฟเล็ตชนิด Haar ลักษณะภาพที่ตัดเอาทั้งศีรษะ

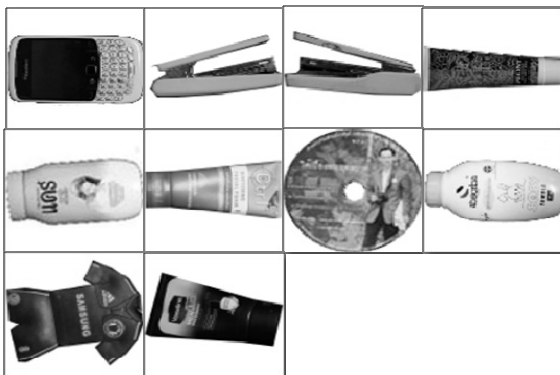
SIZE	LV	DB	W				xbar
			3	5	7	9	
100	1	3	65	75	80	80	75.00
		6	95	90	95	100	95.00
		8	100	100	95	100	98.75
	2	3	65	80	80	75	75.00
		6	70	70	90	90	80.00
		8	90	100	100	100	97.50
	3	3	60	75	90	85	77.50
		6	75	75	95	85	82.50
		8	80	100	100	100	95.00
	4	3	50	70	75		65.00
		6	80	85	65		76.67
		8	85	85	70		80.00
200	1	3	70	65	85	75	73.75
		6	80	90	85	90	86.25
		8	95	95	85	90	91.25
	2	3	60	80	85	85	77.50
		6	90	90	85	80	86.25
		8	90	100	100	100	97.50
	3	3	55	75	80	70	70.00
		6	75	70	85	85	78.75
		8	85	100	100	100	96.25
	4	3	55	65	80		70.00
		6	80	75	95	90	83.00
		8	80	95	100	100	93.75
300	1	3	75	70	80	85	75.00
		6	75	80	80	75	77.50
		8	100	85	90	80	88.75
	2	3	70	70	70	80	72.50
		6	90	90	90	95	91.25
		8	90	100	100	100	97.50
	3	3	70	70	80	80	72.50
		6	90	85	85	80	83.00
		8	95	95	100	95	96.25
	4	3	55	85	70	70	70.00
		6	80	80	80	90	82.50
		8	90	90	100	100	95.00

ตารางที่ 1 เป็นการทดสอบชนิดของเวฟเล็ต ซึ่งเวฟเล็ต Haar กับลักษณะภาพที่มีรายละเอียดของบุคคล ตัดทั้งศีรษะจะมีร้อยละความถูกต้องสูงที่สุด เนื่องมาจากความละเอียดของภาพที่ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นความละเอียดของภาพที่ไม่มาก และเมื่อผ่านแปลงเวฟเล็ตจำนวนพิกเซลก็จะลดลง ทำให้เมื่อใช้ภาพเฉพาะใบหน้าแล้วจะทำให้รายละเอียดในการระบุบุคคลไม่เพียงพอจึงทำให้ได้ค่าความถูกต้องที่ต่ำกว่าภาพถ่ายทั้งศีรษะ ซึ่งมีรายละเอียดที่มากกว่า ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยอื่นที่จะใช้ภาพเฉพาะใบหน้าเท่านั้นเพื่อตัดปัญหาเรื่องทรงผมที่เปลี่ยนไป และใช้ขนาดความละเอียดของภาพที่เพิ่มขึ้นเพื่อเก็บรายละเอียดบนใบหน้า แต่ก็พบค่าความผิดพลาดในการตรวจสอบยังคงมีอยู่ ตารางที่ 2 เป็นผลการทดลองที่ใช้ชนิดของเวฟเล็ต Haar ลักษณะภาพที่ตัดทั้งศีรษะ ทดสอบความละเอียดภาพที่ 100 x 100, 200 x 200 และ 300 x 300 พิกเซล ระดับการแปลงเวฟเล็ตทดสอบตั้งแต่ 1 ถึง 4 จำนวนฐานข้อมูลของทั้ง 10 คน จำนวนภาพที่อยู่ในฐานข้อมูลคนละ 3, 6 และ 8 ภาพ และจำนวนไอเกนเวกเตอร์ 3, 5, 7 และ 9 ในคอลัมน์สุดท้ายคือร้อยละความถูกต้องเฉลี่ยของทุกไอเกนเวกเตอร์ และจะเห็นว่าความถูกต้องของจำนวนฐานข้อมูลเท่ากับ 8 ในทุกๆ ปัจจัยจะมีค่าสูงกว่าฐานข้อมูล 3 และ 6

ตารางที่ 3 ความถูกต้องชนิดเวฟเล็ต Haar กับฐานข้อมูล 8

Wavelet	Database	size	level	W				ค่าเฉลี่ยความถูกต้อง
				3	5	7	9	
Haar Wavelet	8	100	1	100	100	95	100	98.75
			2	90	100	100	100	97.5
			3	80	100	100	100	95
			4	85	85	70	-	80
		200	1	95	95	85	90	91.25
			2	90	100	100	100	97.5
			3	85	100	100	100	96.25
			4	80	95	100	100	93.75
		300	1	100	85	90	80	88.75
			2	90	100	100	100	97.5
			3	95	95	100	95	96.25
			4	90	90	100	100	95

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละความถูกต้องของการใช้ปัจจัยชนิดเวฟเล็ต Haar ใช้ฐานข้อมูล 8 ภาพ ลักษณะของภาพที่ใช้คือ ภาพที่ตัดเอาทั้งสี่ระยะ ขนาดรูป 100x100 พิกเซล แปลงที่ระดับ 1 จะมีร้อยละความถูกต้อง 98.75 โดยเฉลี่ยของทุกจำนวนไอเกนเวกเตอร์ 3,5,7 และ 9 เป็นน่านสังเกตว่าเมื่อการแปลงเวฟเล็ตมีระดับมากขึ้นซึ่งจะทำให้จำนวนพิกเซลของที่นำมาคำนวณลดลง จึงทำให้ค่าความถูกต้องลดลง และเมื่อความละเอียดของภาพมากขึ้นเช่น 300x300 พิกเซล ความถูกต้องยิ่งลดลงเนื่องจากเมื่อความละเอียดของภาพมากขึ้นแต่จำนวนไอเกนเวกเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าเวกเตอร์คุณลักษณะของภาพนั้นจากสมการ (5) ซึ่งได้มาจากการคูณกันของเมตริกซ์ของ A_i กับ $w_{optimal}$ โดยที่ในกรณีนี้จำนวนไอเกนเวกเตอร์ หรือจำนวนคอลัมน์ของ $w_{optimal}$ มีไม่มากพอจึงไม่สามารถแทนคุณลักษณะของภาพนั้นได้ครบถ้วน ซึ่งกล่าวได้ว่าขนาดความละเอียดของภาพมีความสัมพันธ์กับจำนวนของไอเกนเวกเตอร์ ดังนั้นปัจจัยที่ได้จากการตรวจสอบการระบุใบหน้าบุคคล จะนำมาใช้ในการตรวจสอบการระบุชนิดวัตถุซึ่งมีรายละเอียดของภาพน้อยกว่าใบหน้าบุคคล เพื่อหาผลของปัจจัยของจำนวนไอเกนเวกเตอร์



รูปที่ 7 วัตถุที่ใช้ในทดสอบ 10 ชนิด

ตารางที่ 4 ร้อยละความถูกต้องของจำนวนไอเกนเวกเตอร์กับสี่พื้นหลังของภาพวัตถุ

ไอเกนเวกเตอร์	ความถูกต้อง (ร้อยละ)	
	สีดำ	สีขาว
3	85	25
5	100	25
7	75	20
9	45	15

รูปที่ 5 วัตถุ 10 ชนิด ที่นำมาทดสอบได้ผลดังตารางที่ 4 จะได้ร้อยละความถูกต้องสูงที่สุดเท่ากับ 100 โดยมีปัจจัยที่ดีที่สุดที่ได้ทำการเลือกใช้คือแปลงเวฟเล็ตชนิด Haar จำนวนของฐานข้อมูลเท่ากับ 8 ลักษณะของภาพที่ใช้คือ ภาพที่ใช้พื้นหลังสีดำ ขนาดรูป 100 x 100 พิกเซล แปลงที่ระดับ 1 และจำนวนไอเกนเวกเตอร์เท่ากับ 5 เหมาะสมสำหรับตรวจสอบภาพเพื่อระบุชนิดวัตถุ ถ้าเฉลี่ยทุกไอเกนเวกเตอร์ได้ค่าถูกต้องร้อยละ 76.25 ซึ่งมีค่าต่ำกว่า ค่าเฉลี่ยของการใช้ปัจจัยทุกจำนวนของไอเกนเวกเตอร์ของการตรวจสอบระบุใบหน้าบุคคล ร้อยละ 98.75 เนื่องจากรายละเอียดของภาพชนิดวัตถุมีไม่มากเท่ากับภาพใบหน้าบุคคลดังนั้นการใช้จำนวนไอเกนเวกเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับคำนวณหาเวกเตอร์คุณลักษณะที่ใช้เป็นตัวแทนภาพจากสมการ (5) จำนวนของไอเกนเวกเตอร์ที่เหมาะสมจะเป็นค่าเฉพาะที่สามารถนำไปคำนวณแล้วให้เวกเตอร์คุณลักษณะที่ดีที่สุด เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบุชนิดวัตถุได้ค่าความถูกต้องสูง ไม่เหมือนกับระบุบุคคล จำนวนของไอเกนเวกเตอร์ที่ให้ค่าความถูกต้องมีทั้งหมด 3 ตัวคือ 3, 5 และ 9 ดังตารางที่ 3 ดังนั้นจึงทำให้การระบุชนิดของวัตถุดังตารางที่ 4 จำนวนไอเกนเวกเตอร์มีผลต่อค่าความถูกต้องที่แตกต่างกันมาก

ในกรณีใช้พื้นหลังของภาพชนิดวัตถุเป็นสีดำมีผลต่อความถูกต้องในการระบุชนิดวัตถุมาก เนื่องมาจากภาพทุกภาพจะต้องผ่านการปรับค่าสีเป็นค่าระดับสีเทาซึ่งมีค่าสีตั้งแต่ค่า 0 ถึง 255 โดยที่ภาพจะแทนด้วยเมตริกซ์ซึ่งเป็นค่าในแต่ละพิกเซลของภาพเช่นพิกเซลที่มีสีดำจะมีค่า 0 สีขาวมีค่า 255 และสีอื่นจะถูกนำมาเฉลี่ยตามสมการ(1) ก็จะได้ค่าระหว่าง 1-254 ดังนั้นถ้าใช้พื้นหลังสีดำ พิกเซลที่พื้นหลังจะมีค่าศูนย์ทั้งหมด ในส่วนของพิกเซลที่มีค่าก็จะเป็นรายละเอียดของวัตถุ เมตริกซ์ของภาพจะนำมาคำนวณแปลงเวฟเล็ต หาค่าเฉลี่ย ตามรูป 5 แต่ถ้าเป็นพื้นหลังสีขาวพิกเซลจะมีค่า 255 และรายละเอียดของวัตถุจะมีค่าต่ำกว่า 255 เมื่อนำเมตริกซ์ภาพมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต ค่าเฉลี่ยภาพตามกระบวนการตามรูปที่ 6 จึงทำให้ไม่สามารถแยกแยะได้อย่างชัดเจน ส่งผลทำให้ค่าที่ได้จึงมีความไม่ถูกต้องสูง

4. สรุป

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าระบบตรวจสอบและรู้จำภาพใบหน้าและชนิดวัตถุ ด้วยปัจจัยจำนวนไอเกนเวกเตอร์หรือจำนวนคอลัมน์ของ $w_{optimal}$ คือ 3, 5, 7 และ 9 จะได้ปัจจัยที่เหมาะสมคือขนาดความละเอียดภาพ 100 x 100 พิกเซล แปลงเวฟเล็ตชนิด Haar ที่ระดับที่ 1 จำนวนฐานข้อมูลเท่ากับ 8 ภาพ โดยที่จำนวนไอเกนเวกเตอร์มีความสัมพันธ์กับขนาดความละเอียดของภาพและรายละเอียดของภาพ ซึ่งถ้าภาพมีรายละเอียดมากก็จะทำให้ค่าความถูกต้องในการระบุบุคคลมีค่าสูงถึงร้อยละ 98.75 สำหรับทุกจำนวนไอเกนเวกเตอร์ 3, 5, 7 และ 9 แต่ถ้ารายละเอียดของภาพไม่มากพอก็จะทำให้ค่าความถูกต้องในการระบุชนิดวัตถุมีค่าสูงร้อยละ 100 เฉพาะจำนวนไอเกนเวกเตอร์เท่ากับ 5 ด้วยปัจจัยเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานตรวจสอบเปรียบเทียบเพื่อระบุชนิดของวัตถุต่างๆ ได้ ด้วยการใช้อัลกอริธึมที่มีความละเอียด 10,000 พิกเซล ก็สามารถนำไปใช้ใน

งานตรวจสอบได้ โดยที่เมื่อต้องการใช้ภาพที่มีขนาดความละเอียดของภาพเพิ่มขึ้นหรือมีรายละเอียดของภาพแตกต่างกันสามารถใช้โปรแกรมที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นนี้สำหรับการคำนวณหาจำนวนไอเกนเวกเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับภาพที่มีรายละเอียดต่างๆ เพื่อหาค่าความถูกต้องสูงสุด

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hayesawhaw W. Fingerprint extraction using wavelet-transform. [MSc Thesis]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology North Bangkok; 2006. (In Thai).
- [2] Skulsujirapa P. Development of digital image retrieval technique using autocorrelogram and wavelet transform. [MEng Thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2004. (In Thai).
- [3] Bing L, Yun Z, Yun-Hong P. Face recognition based on wavelet transform and svm. international conference on information acquisition. Hong Kong, China. 2005: 373-377.
- [4] Yuzuko U, Yoshio I, Masahiko Y. Performance evaluation of face recognition in the wavelet domain. International conference on intelligent robots and systems. Beijing, China. 2006
- [5] Jian Y, David Z, Alejandro F Jing-Yu Y. Two-Dimensional PCA: A new approach to appearance-based face representation and recognition. Journal IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2004; 26(1): 131-137

- [6] Sirovich L, Kirby M. Low-dimensional procedure for characterization of human faces. *J. Optical Soc. Am.* 1987; 4: 519-524.
- [7] Kirby M, Sirovich L. Application of the KL procedure for the characterization of human faces. *IEEE Trans. Pattern analysis and machine intelligence.* 1990; 12: 103-108.
- [8] Grudin M A. On internal representations in face recognition systems. *pattern recognition.* 2000 ; 33: 1167-1177.
- [9] Cottrell G W, Fleming M K. Face recognition using unsupervised feature extraction. *Proc. Int'l Neural Network Conf.* 1990: 322-325.
- [10] Kishor S, Kinage S G. Bhirud. Face Recognition based on Two-Dimensional PCA on wavelet subband. *international journal of recent trends in engineering.* 2009; 2(2): 51-54.
- [11] Srikaew A. Computational Intelligence. [database of the internet]. [cited 2010 Aug 30]. Available from: http://eesut.com/home/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=8:p&Itemid=146
- [12] Math Works Documentation Center. [cited 2010 Aug 15]. Available from : http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/wavelet/ch01_i14.html
- [13] Math Works Documentation Center. [cited 2010 Aug 20]. Available from : http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/wavelet/ch06_ad9.html