

การจดจำวัตถุจากประสาทสัมผัสทางกายโดยการใช้ภาพถ่ายระยะประชิดความละเอียดต่ำร่วมกับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักและ z-score

Tactile Object recognition using low resolution image from close up image and Principle Component Analysis and z-score

สมชาย เปาะทองคำ และ จักรี ศรีนนท์ฉัตร*

ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางด้านการประมวลผลสัญญาณ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12110

*E-mail : jakkree.s@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การพัฒนาแบบประสาทสัมผัสเทียมของหุ่นยนต์และคอมพิวเตอร์เป็นการพัฒนาเพื่อให้หุ่นยนต์และคอมพิวเตอร์รับรู้และเข้าใจลักษณะทางกายภาพของวัตถุนั้นทำให้คอมพิวเตอร์สามารถจดจำวัตถุได้จากการสัมผัส ซึ่งเป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์สำหรับคอมพิวเตอร์ บทความนี้นำเสนอเทคนิคในการจดจำวัตถุจากระบบประสาททางกาย โดยการประมวลผลภาพที่ได้จากวัตถุนั้นๆที่ได้ในระยะประชิด โดยเป็นภาพที่มีความละเอียดต่ำขนาด 16x16 จุด จำนวน 60 ภาพต่อตัวอย่าง ทำการแยกกลุ่มวัตถุ 6 กลุ่ม ซึ่งมีกลุ่มละ 10 ตัวอย่าง การประมวลผลและการวิเคราะห์ของภาพที่ได้จากการสัมผัสวัตถุที่แตกต่างกันนั้น ในการศึกษาใช้วิธีวิเคราะห์ทางสถิติที่สกัดจากจำนวนภาพที่ได้ ทำการจัดหมวดหมู่ของวัตถุในรูปโดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักและ z-score เพื่อใช้ในการจำแนกวัตถุจากการทดลองพบว่าระบบมีความถูกต้องในการจำแนกเฉลี่ยได้ 85% ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นสูงเมื่อค่าความสว่างในระดับสีเทาของวัตถุนั้นๆมีความแตกต่างกันมาก เช่นรถยนต์ที่มีหลากหลายสีจะมีความถูกต้องเพียง 50% แต่ความสามารถในการจัดกลุ่มจะมีความถูกต้องสูงเมื่อวัตถุนั้นมีค่าความสว่างในระดับสีเทาใกล้เคียงกัน เช่นยางรถยนต์มีความถูกต้องในการจำแนก 100%

คำสำคัญ: Object Recognition Tactile Image Machine Learning Principle Component Analysis z-score

Abstract

The development of an artificial sensory systems for robotic and computers is develop for a computer to recognize and understand the physical nature of the object. As The basis for the development of artificial intelligence system for computers. This paper presents a technique to recognize physical objects from the image tactile system by processing images from the object at close range. This study using a low resolution image size

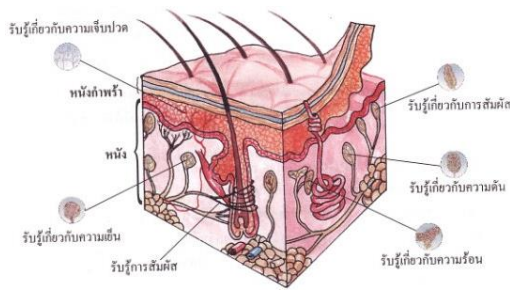
16x16 point for 60 images per sample and for 6 groups with each group of 10 samples. Processing and analysis in this study, statistical features are extracted from a number of acquired tactile images for classification in their respective object image data. Principle Component Analysis (PCA) used for extract and analyzes an image sample. Which resulted in average classification accuracy is 85%. The error will occur when the brightness of the object in the gray level that are very different as car sample is lowest accuracy is 50%.and ability grouping is accurate when the object is the brightness in the gray level are low differenced as tire sample is 100% accuracy.

Keywords: Object Recognition, Tactile Image, Machine Learning, Principle Component Analysis, z-score

บทนำ

ระบบประสาทสัมผัส [1]

ระบบรับรู้ความรู้สึกทางกาย (SOMATOSENSORY SYSTEM) ดังรูปที่ 1[2] เป็นตัวรับรู้ความรู้สึกจากส่วนนอกของร่างกาย เช่น รับความรู้สึกที่ผิวหนัง หรือรับรู้ความรู้สึกจากอวัยวะภายในร่างกาย โดยที่ตัวรับรู้ความรู้สึก (SENSORY RECEPTOR) จะมีการตอบสนองต่อความรู้สึกอย่างจำเพาะเช่นการสัมผัส แรงกดดัน (PRESSURE) อุณหภูมิ ความเจ็บปวด ความสั่นสะเทือน และความรู้สึกถึงการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อและตำแหน่งข้อต่อ



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของประสาทรับรู้การสัมผัส

การสัมผัส [2]

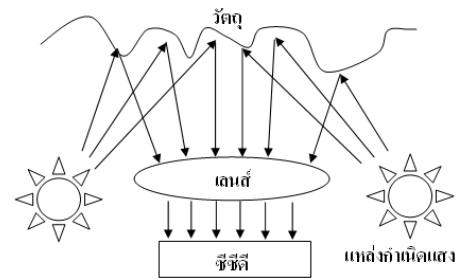
การถูกต้องสัมผัสเป็นความรู้สึกที่เริ่มมาจากการทำงานของเซลล์รับความรู้สึก ซึ่งทั่ว ๆ ไปมีอยู่ในผิวหนังรวมทั้งปุ่มขน (HAIR FOLLICLE) แต่ก็มีอยู่ที่ลิ้น คอ และเยื่อเมือกด้วย มีตัวรับแรงกด (PRESSURE RECEPTOR) ที่ตอบสนองต่อแรงกดแบบต่าง ๆ (แบบหนักแน่น แบบผ่าน ๆ แบบคงที่) สำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์คือผิวหนังอิเล็กทรอนิกส์ที่มีเซ็นเซอร์รับแรงกด

การเก็บภาพพื้นผิวเชิงแสง [3]

ระบบประสาทสัมผัสอิเล็กทรอนิกส์ (TACTILE SENSOR) มีหลายเทคนิค แต่ในบทความนี้ใช้เทคนิคการเก็บภาพพื้นผิวเชิงแสงซึ่งถูกพัฒนามาสำหรับตัวรับรู้ลายนิ้วมือ โดยใช้เทคโนโลยีทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับแสงโดยเก็บภาพในเชิงสองมิติหรือภาพสามมิติ แนวทางในการเก็บภาพลายวัตถุเชิงแสงจะใช้กล้องวิดีโอเป็นตัวรับภาพแล้วใช้แสงส่องไปที่วัตถุการสะท้อนของแสงอันเกิดจากลักษณะพื้นผิวของวัตถุจะมีความแตกต่างกันจนสามารถมองเห็นถึงความแตกต่างของพื้นผิววัตถุที่ต่างชนิดกัน เทคนิคการเก็บภาพลายพื้นผิวของแสงนี้มี 3 วิธีหลักคือ เทคนิคการสะท้อนภายในกลับหมด (FRUSTRATED TOTAL REFLECTION TECHNIQUE) เทคนิคการถ่ายภาพตรงบนแท่น (DIRECT VIEW ON PLATEN TECHNIQUE) และเทคนิคการถ่ายภาพตรงไม่สัมผัส (TOUCHLESS DIRECT VIEW TECHNIQUE) ซึ่งในบทความนี้ได้ใช้เทคนิคการเก็บภาพพื้นผิววัตถุแบบนั้นในการเก็บภาพ

เทคนิคการถ่ายภาพตรงไม่สัมผัส (Touchless Direct View Technique) [4]

เป็นการใช้กล้องที่มีคุณภาพสูงทำการโฟกัสบริเวณพื้นผิวของวัตถุในระยะที่กำหนดและทำการถ่ายภาพโดยตรงของวัตถุ ดังนั้นการควบคุมแสงจึงมีความสำคัญในการเก็บภาพเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุ (Touchless Sensor) ทำให้เกิดข้อดีที่ไม่เกิดปัญหาเรื่องความบิดเบี้ยวแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ แต่มีข้อเสียที่ภาพที่ได้จะเป็นภาพพื้นผิวที่ไม่ได้เป็นภาพแรงที่กระทำต่อเซ็นเซอร์การทำงานแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของเทคนิคการถ่ายภาพตรงไม่สัมผัส

ระบบประสาทสัมผัสแบบอิเล็กทรอนิกส์และการวิเคราะห์สัญญาณ

ในปี 2013 Shreyasi Datta [5] และคณะได้นำเสนองานที่ใช้รูปที่ได้จากการสัมผัสวัตถุแล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการจำแนกข้อมูลโดยเทคนิค k-nearest neighbor (kNN), Naïve Bayes classifier และ Linear Discriminant Analysis (LDA) and Ensemble) in one-versus-one (OVO) ในบทความนี้ทางผู้วิจัยจึงได้ทดลองนำเสนอเทคนิคใหม่ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ในลักษณะเดียวกันซึ่งได้ทำการทดลองการวิเคราะห์ข้อมูลสอบเทคนิคร่วมกันคือการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักและ z-score

วิธีการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำมาวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก[6] หรือ Principle Component Analysis (PCA) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดมิติของเวกเตอร์ลักษณะ โดยการฉาย (Project) เวกเตอร์ไปบนแกนใหม่ที่เราเรียกว่าแกนองค์ประกอบหลัก (Principle Component) ซึ่งแกนเหล่านี้มีความสำคัญแตกต่างกันลงไปตามความแปรปรวน (Variance) บนแต่ละแกน ในการวิเคราะห์แบ่งขั้นตอนได้ดังนี้ การจัดรูปแบบข้อมูลที่ได้จากภาพประสาทสัมผัสแต่ละจุดเป็น Column และข้อมูลที่ได้ในแต่ละวัตถุจัดเก็บข้อมูลจัดเป็น Rows ซึ่งจะได้ข้อมูลทั้งหมดอยู่ในรูปเมทริกซ์

$$X = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_1^{(2)} & \dots & x_1^{(n)} \\ x_2^{(1)} & x_2^{(2)} & \dots & x_2^{(60)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m^{(1)} & x_m^{(2)} & \dots & x_m^{(n)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i^{(k)} \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n x_i^{(k)} x_j^{(k)} \quad (3)$$

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ลบด้วยค่าเฉลี่ยของทุก Column เมื่อจัดรูปแบบข้อมูลแล้วคำนวณหา Covariance เมทริกซ์ด้วยสมการที่ 4 และนำเมทริกซ์ที่ได้ค่า eigenvector และ eigenvalue ด้วยสมการที่ 5

$$S(X) = \frac{1}{n-1} XX^T \quad (4)$$

$$XX^T = \frac{1}{n-1 \sum_{k=1}^n (x^{(k)} - \bar{x})(x^{(k)} - \bar{x})^T} \quad (5)$$

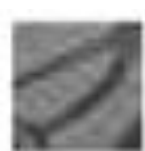
ผลลัพธ์จาก PCA จะได้ค่า eigenvalue และ eigenvectors ซึ่งข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ขั้นตอนสุดท้ายคือการแปลงเพื่อแสดงเป็นภาพฉายโดยจะเลือกแกนจาก eigenvectors ที่มีการกระจายสูงสุดและมีค่าอธิบายความสัมพันธ์ได้มากกว่าหรือเท่ากับ 80% ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นแกน Projection 1(PC1), Projection 2 (PC2) และ Projection 3 (PC3) ทั้งสามแกนสามารถแสดงเป็นภาพฉายได้ในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับชุดข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์ และเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยวิเคราะห์จำแนกข้อมูลของพื้นผิววัตถุได้

ในงานวิจัยนี้แบ่งตัวอย่างออกเป็นวัตถุ 6 ชนิดชนิดละ 10 ตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วย ยางรถยนต์ เก้าอี้ รถยนต์ พระพุทธรูป บ้าน และรถจักรยาน โดยเริ่มต้นจากการเก็บภาพในระดับสีเทา (Gray Scale Image) ของพื้นผิวระยะใกล้ตามเทคนิคการถ่ายภาพพื้นผิวสัมผัสแบบรับภาพตรงไม่สัมผัส ซึ่งเปรียบเสมือนข้อมูลที่ได้จากระบบประสาทสัมผัสสัมผัสกับพื้นผิววัตถุของวัตถุนั้นตามหลักการทำงานของ โดยเก็บตัวอย่างภาพพื้นผิวของตัวอย่างแต่ละชนิดที่ความละเอียด 16x16 จุดในตำแหน่งแนวตัวอย่างจากด้านบนลงมาด้านล่างวัตถุขึ้นละ 30 ตัวอย่างและตัวอย่างด้านซ้ายไปด้านขวาอีกจำนวนวัตถุขึ้นละ 30 ตัวอย่างเพื่อใช้เป็นตัวอย่างสำหรับเทรนจำนวนวัตถุชนิดละ 5 ตัวอย่างและเป็นตัวอย่างสำหรับทดสอบอีกวัตถุชนิดละ 10 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ใช้ดังรูปที่ 3 และตัวอย่างภาพจากการสัมผัสตัวอย่างดังรูปที่ 4 ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

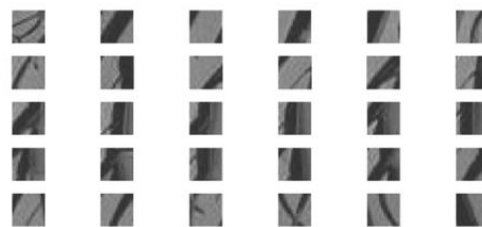


รูปที่ 3 ล้อรถยนต์ซึ่งเป็นวัตถุตัวอย่าง



รูปที่ 4 รูปพื้นผิววัตถุขนาด 16x16 จุด ที่ได้จากผิวสัมผัสของวัตถุ

จากนั้นเมื่อได้ภาพในแนวแกน x จำนวน 30 ภาพและในแนวแกน y จำนวน 30 ภาพดังรูปที่ 5 ก็ทำการนำภาพดังกล่าวมาจัดเรียงเป็นเมทริกซ์ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์โดยในแต่ละแถวจะเป็นเมทริกซ์ข้อมูลที่ได้ทั้ง 60 ข้อมูลของวัตถุแต่ละชิ้น



รูปที่ 5 รูปพื้นผิววัตถุจำนวนที่ได้ 30 รูป

จากนั้นทำการรวมค่าความเข้มเฉลี่ยของข้อมูลภาพแต่ละภาพตามสมการที่ 6

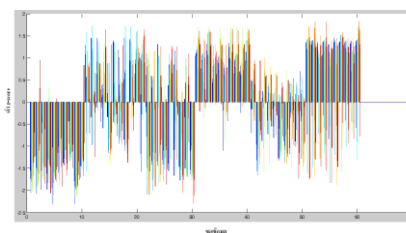
$$x_m^n = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j) \quad (6)$$

แล้วทำการจัดเรียงข้อมูลทั้งหมดซึ่งจะได้เมทริกซ์ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์โดยในแต่ละแถวจะเป็นเมทริกซ์ข้อมูลที่ได้ทั้ง 60 ข้อมูลของวัตถุแต่ละชิ้นทั้งหมด

ดังสมการที่ 1 จากนั้นทำการหา z-score ของข้อมูล ตามสมการที่ (7) ซึ่งจะนำไปเป็นค่าเปรียบเทียบในการวิเคราะห์แยกกลุ่มข้อมูล

$$z = \frac{(x - \mu)}{\sigma} \quad (7)$$

จะได้เวกเตอร์ข้อมูลดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นการจัดกลุ่มของข้อมูลอย่างชัดเจน



รูปที่ 6 เวกเตอร์ข้อมูลจาก z-score

จากค่าเวกเตอร์ข้อมูลที่ได้จาก z-score นั้นในชุดข้อมูลเทรนใน 5 ชุดแรกของแต่ละชุดตัวอย่างเพื่อนำมาทำเป็นแม่แบบในการเปรียบเทียบโดยให้ทำการหาค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ตามสมการที่(8) แล้วนำมาเป็นข้อมูลหลักสำหรับหาค่าความแตกต่างของข้อมูลตัวที่ต้องการทดสอบ จากนั้นทำการหาค่าความแตกต่างของข้อมูลที่ต้องการทดสอบกับข้อมูลแม่แบบ หากการทดสอบแล้วพบว่าข้อมูลที่ต้องการทดสอบมีความแตกต่างน้อยสุดกับชุดข้อมูลแม่แบบชุดใด ก็ให้

ตัดสินใจเป็นสมาชิกของข้อมูลกลุ่มนั้นซึ่งเป็นการจัดกลุ่มข้อมูล ดังสมการที่ 9

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_j^k \quad \text{เมื่อ } j=1,2,\dots,m \quad (8)$$

$$\Delta x_j = |\bar{x}_j - x_j| \quad (9)$$

เมื่อ $\bar{x}_j$ คือค่าเฉลี่ยของตัวแม่แบบ

และ x_j คือค่าของตัวอย่างทดสอบที่คอลัมน์ j

ซึ่งจะได้ เมทริกซ์ของ Δx_j ของตัวอย่างที่ทดสอบ

$$\Delta X_j = \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(1)} & \Delta x_1^{(2)} & \dots & \Delta x_1^{(n)} \\ \Delta x_2^{(1)} & \Delta x_2^{(2)} & \dots & \Delta x_2^{(60)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta x_m^{(1)} & \Delta x_m^{(2)} & \dots & \Delta x_m^{(n)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

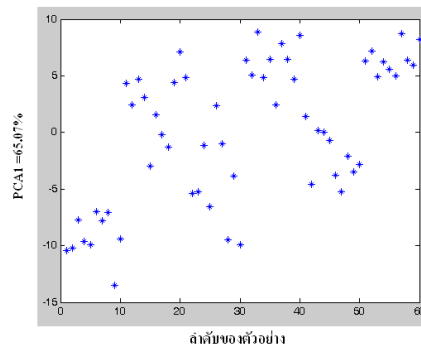
จากนั้นทำการหาผลรวมของแต่ละแถวจะได้ค่าความแตกต่างรวมจากตัวแม่แบบนั้น

$$\Delta \bar{x}_{ji} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i^{(k)} \quad (11)$$

ทำการทดสอบข้อมูลกับข้อมูลแม่แบบทุกชุดแล้วนำผลรวมของแต่ละแถวมาจัดเมทริกซ์เปรียบเทียบเพื่อหาข้อมูลน้อยสุดในแต่ละแถวแล้วพิจารณาว่าข้อมูลตัวน้อยสุดอยู่ในคอลัมน์ใด หากอยู่ในคอลัมน์ใดก็ให้เป็นสมาชิกของกลุ่มแม่แบบตัวนั้นและได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของข้อมูลซึ่งผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักจะได้เวกเตอร์ข้อมูลจากนั้นในชุดข้อมูลเทรนทั้ง 5 ชุดให้ทำการหาค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ตามสมการที่ (11) แล้วนำมาเป็นข้อมูลหลักสำหรับหาค่าความแตกต่างของข้อมูลตัวที่ต้องการทดสอบ จากนั้นทำการหาค่าความแตกต่างหากตัวอย่างใดมีค่าเวกเตอร์องค์ประกอบหลักแตกต่างจากค่าเวกเตอร์องค์ประกอบหลักของข้อมูลของตัวเทรนน้อยสุดก็ให้ตัดสินใจเป็นสมาชิกของข้อมูลกลุ่มนั้นซึ่งเป็นการจัดกลุ่มข้อมูล

ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากกลุ่มข้อมูลทั้งหมด เมื่อแสดงผลเวกเตอร์องค์ประกอบหลักจะได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการฉายองค์ประกอบหลักของข้อมูลทั้งหมด

และผลจากวิธีการจัดกลุ่มข้อมูลโดยการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างน้อยสุดของสมาชิกในเมทริกซ์ผลรวมของภาพเปรียบเทียบกับแม่แบบข้อมูลโดยใช้การหาค่าความแตกต่างจากค่า z-score ได้ผลตามตารางที่ 1 วัตถุ พบว่าระบบมีความถูกต้องในการจำแนกเฉลี่ยได้ 85% ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นสูงเมื่อค่าความสว่างในระดับสีเทาของวัตถุชนิดนั้นๆ มีความแตกต่างกันมากเช่นรถยนต์ที่มีหลากหลายสีจะมีความถูกต้องเพียง 50% แต่ความสามารถในการจัดกลุ่มจะมีความถูกต้องสูงเมื่อวัตถุนั้นมีค่าความสว่างในระดับสีเทาใกล้เคียงกันเช่นยางรถยนต์มีความถูกต้องในการจำแนก 100% ผลการจัดกลุ่มข้อมูลตามตารางที่ 1 และค่าความถูกต้อง

ตารางที่ 1 ผลการจัดกลุ่มข้อมูลและความถูกต้อง

ชุด	A	B	C	D	E	F	ความถูกต้อง
1	10	0	0	0	0	0	100%
2	0	8	0	1	1	0	80%
3	3	0	5	1	1	0	50%
4	0	1	0	9	0	0	90%
5	1	0	0	0	9	0	90%
6	0	0	0	0	0	10	100%
เฉลี่ย							85%

สรุปผล

เทคนิคในการจดจำวัตถุจากระบบประสาททางกายโดยใช้เทคนิครับภาพตรงไม่สัมผัสเป็นระบบประสาทสัมผัสอิเล็กทรอนิกส์ทำงานร่วมกับการประมวลผลภาพที่ได้จากวัตถุนั้นๆที่ได้ในระยะระยะชัดทดสอบกับภาพวัตถุตัวอย่างจำนวน 60 วัตถุซึ่งเป็นกลุ่มวัตถุ 6 กลุ่ม มีกลุ่มละ 10 ตัวอย่าง การประมวลผลและการวิเคราะห์ของภาพที่ได้จากการสัมผัสวัตถุที่แตกต่างกันนั้น ในการศึกษาใช้วิธีวิเคราะห์ทางสถิติที่สกัดจากจำนวนภาพที่ได้ ทำการจัดหมวดหมู่ของวัตถุในรูปโดย

ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักและ z-score เพื่อใช้ในการจำแนกวัตถุ พบว่าระบบมีความถูกต้องในการจำแนกเฉลี่ยได้ 85% ต่ำสุด 50% สำหรับตัวอย่างที่เป็นรถยนต์ และสูงสุด 100% สำหรับตัวอย่างที่เป็นยางรถยนต์และรถจักรยาน เทคนิคนี้เป็นพื้นฐานที่สามารถนำไปใช้กับการเรียนรู้ระบบประสาทสัมผัสทางกายสำหรับคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ระบบรับรู้สัมผัส.กายระบบรับรู้สัมผัสทาง.[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://th.wikipedia.org/wiki/ระบบรับรู้สัมผัส> (15 เมษายน 2558).
- [2] ประสาท สัมผัส. ประสาทสัมผัส. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://th.wikipedia.org/wiki/ระบบรับรู้สัมผัส> (15 เมษายน 2558).
- [3] อวัยวะรับรู้สัมผัส.ผิวหนังกับการรับรู้สัมผัส.[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:<http://www.thaigoodview.com/node/43966?page=0,1> (15 เมษายน 2558).
- [4] ลายนนิ้วมือและการเก็บภาพ วุฒิพงศ์ อารีกุล, 2557. การประมวลลายนิ้วมือดิจิทัลอยู่โอ :กรุงเทพฯ.
- [5] S. Datta, Object Shape and Size Recognitio From Tactile Images, In IEEE International Conference on Control Communication and Computing (ICCC) 2013.
- [6] สมชาย เปาะทองคำ, 2552. การแยกแยะชนิดและควบคุมคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้จมูกอิเล็กทรอนิกส์ระบบเปิดวิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [7] ชีร์เกียรติ์ เกิดเจริญ, Electronic nose (Online), Available: <http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/i-sense/nose/e-nose.html> 2005.
- [8] J. David, et, "Review Chemical Sensors for Electronic Nose Systems,"Microchimica Acta Springer published online (Electronic), Vol. 149, No.1-2, 2004, pp.1-17.
- [9] P. Wang "Development of Electronic Nose for Diagnosis of Lung Cancer at Early Stage," Proceedings of the 5th International Conference on Information Technology and Application in Biomedicine, 2nd, May 2008, Shenzhen China, pp. 588-591.