

การพัฒนาและวัดประสิทธิภาพระบบติดตามดวงตาต้นทุนต่ำ Development and Evaluation of Low-Cost Eye Tracking Performance

วีรวรรณ จันทะทรัพย์^{1*} และ พยุง มีสัจ²

¹นักศึกษา ²รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีติดตามดวงตาเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ท้าทายที่ช่วยในการพัฒนาและออกแบบรูปแบบการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ที่เป็นธรรมชาติ โดยการควบคุมและใช้งานคอมพิวเตอร์ได้ด้วยสายตาของผู้ใช้ อย่างไรก็ตาม พบว่า อุปกรณ์ติดตามดวงตาที่จำหน่ายในท้องตลาดในปัจจุบันค่อนข้างมีราคาแพง และถือเป็นอุปสรรคสำคัญในการเข้าถึงเทคโนโลยีติดตามดวงตา บทความวิจัยนี้กล่าวถึงขั้นตอนการพัฒนาอุปกรณ์ติดตามดวงตาต้นทุนต่ำที่อยู่ในรูปแบบของแว่นตา โดยทำการติดตามตำแหน่งของสายตาด้วยหลักการของการประมวลผลบนสัญญาณวิดีโอร่วมกับคลื่นความถี่อินฟราเรด เพื่อประมวลผลหาตำแหน่งจุดกึ่งกลางรูม่านตาซึ่งเป็นคุณลักษณะสำคัญของดวงตาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดำเนินการหาตำแหน่งเพ่งมองของสายตาด้วยฟังก์ชันพหุนามดีกรีต่าง ๆ (ฟังก์ชันเชิงเส้น ฟังก์ชันพหุนามดีกรีสอง และฟังก์ชันพหุนามดีกรีสาม) โดยใช้วิธีการถดถอยกำลังสองน้อยสุด โดยดำเนินการสอบเทียบตำแหน่งของสายตากับผู้ทดสอบจำนวน 30 ราย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์ติดตามดวงตาต้นทุนต่ำและอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถติดตามตำแหน่งของสายตาแบบโต้ตอบทันทีทันใดได้ ในขณะที่ผลลัพธ์จากการประมาณค่าตำแหน่งของสายตาด้วยฟังก์ชันพหุนามดีกรีสามมีความแม่นยำกว่าฟังก์ชันอื่น

Abstract

Nowadays, Eye Tracking Technology is one main challenge for developers of new human-computer interface. This technology provides a more natural way of interacting with a computer system by user's eye. Now commercially available systems exist; however, they are not widely used because of expensiveness. This paper describes a tutorial that shows step by step how to build a low-cost eye tracker using eyeglass setup. The glasses are designed to work with video-oculography technique (VOG) in the infrared spectrum. The key features of the eye is a center of the pupil. The gaze point of users are estimated based on order polynomial regression (linear, quadratic and cubic). This research conducted an experiment with 30 participants tested eye-gaze calibration. Consequently, the experimental results showed that eye-gaze can be estimated in real-time, while the cubic function can be accurate eye-gaze position more than the other function.

คำสำคัญ : เทคโนโลยีติดตามดวงตา การเพ่งมองของสายตา อุปกรณ์ติดตามดวงตาต้นทุนต่ำ

Keywords : Eye Tracking Technology; Eye Gaze; Low-Cost Eye Tracking Devices

* ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ ratree.j@rmutp.ac.th โทร. 02 836 3014

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เข้ามามีอิทธิพล กับชีวิตประจำวันของมนุษย์ ผู้ใช้สามารถเข้าถึงและสั่งการให้คอมพิวเตอร์ทำงานได้ด้วยการเรียนรู้วิธีการใช้งานผ่านส่วนที่เรียกว่า ระบบปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ หรือ เอชซีไอ (Human Computer Interface: HCI) ในอดีตเมาส์ (Mouse Pointer) เป็นอุปกรณ์ที่มนุษย์ใช้สั่งการให้คอมพิวเตอร์ทำงาน แต่ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีถูกนำมาใช้เป็นทางเลือกในการสร้างระบบปฏิสัมพันธ์รูปแบบใหม่ ตัวอย่างเช่น ระบบจอภาพสัมผัส (Touch Screen Computer) ระบบสั่งการด้วยเสียง (Voice Command) และระบบควบคุมสั่งการด้วยดวงตา (Eye Control) เป็นต้น

ระบบควบคุมสั่งการคอมพิวเตอร์ด้วยดวงตาเป็นระบบที่นำเทคโนโลยีติดตามดวงตา (Eye Tracking Technology) เข้ามาประยุกต์ใช้กับงานด้านเอชซีไอ โดยหลักการทำงานพื้นฐานของเทคโนโลยีนี้ คือ ตรวจจับการเคลื่อนที่ของดวงตาด้วยอุปกรณ์ตรวจจับดวงตา (Eye Tracking Device) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อิงประมวลผลเพื่อหาตำแหน่งที่สายตาเพ่งมอง (Point of Gaze: POG) และนำผลลัพธ์ตำแหน่ง POG ที่คำนวณได้ไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่าง ๆ แม้ว่าปัจจุบันเทคโนโลยีติดตามดวงตาจะเป็นเทคโนโลยีใหม่ แต่การคิดค้นและพัฒนาามีมากกว่า 100 ปี โดยเทคนิคการติดตามดวงตาเทคนิคแรก คือ การสังเกตโดยตรงของจักขุแพทย์ (Javal, 1905) ต่อมาใช้อุปกรณ์คล้ายถ้วยที่ต้องใส่เข้าไปในดวงตาเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของผลลัพธ์ (Huey, 1900: 283-302) และการใช้หลักการสะท้อนแสงของกระจกตกกับ

กล้องถ่ายภาพ (Dodge, 1916: 421-427) ปัจจุบันเทคโนโลยีติดตามดวงตาสามารถแบ่งออกเป็น 3 เทคนิคหลัก คือ เทคนิคแรกใช้กระแสไฟฟ้ากระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยเครื่อง Electro-Oculography (EOG) เทคนิคที่สองใช้คอนแทคเลนส์ที่ติดตั้งขดลวดไฟฟ้าซึ่งเรียกว่า Scleral Search Coil (SSC) และเทคนิคการใช้สัญญาณภาพวิดีโอในการติดตามดวงตา (Video Oculography: VOG) (Hansen and Qiang, 2010: 478-500) โดยเทคนิค VOG เป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้กับงานด้านเอชซีไอ เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับดวงตาที่ใช้ในเทคนิคนี้ไม่รบกวนผู้ใช้ อุปกรณ์บางรุ่นติดตั้งไว้ด้านหลังของจอภาพ หรืออาจเป็นอุปกรณ์ที่อยู่ในรูปแบบของแว่นตา (Goggles) ทำให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน อีกทั้งในการทดลองหรือใช้งานไม่จำเป็นต้องอยู่ในห้องปฏิบัติการ หรือมีผู้เชี่ยวชาญเฉพาะควบคุม ดังเช่นสองเทคนิคข้างต้น

ปัจจุบันอุปกรณ์ติดตามดวงตาด้วยเทคนิค VOG ถูกพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ แต่กลับพบว่ามีความราคาค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการดำเนินงานวิจัยอันเกี่ยวข้องกับการติดตามดวงตาอย่างมาก อย่างไรก็ตาม ได้มีนักวิจัยในต่างประเทศส่วนหนึ่งได้เสนอแนวคิดพัฒนาอุปกรณ์ติดตามดวงตาด้านทุนต่ำ (Low-Cost Eye Tracking) ทดแทนอุปกรณ์ติดตามดวงตาราคาแพง เพื่อใช้ในการดำเนินการวิจัยและประยุกต์ใช้กับแอปพลิเคชันต่าง ๆ อาทิเช่น โครงการพัฒนาอุปกรณ์ติดตามดวงตาเพื่อช่วยในการสื่อสารสำหรับผู้ป่วยกล้ามเนื้ออ่อนแรงชื่อ EyeWriter (<http://www.eyewriter.org/>) โครงการ OGAMA ของมหาวิทยาลัย Freie

Universität Berlin (<https://ogama.codeplex.com/>) โครงการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ติดตามดวงตาและซอฟต์แวร์รหัสเปิดจากห้องปฏิบัติการในมหาวิทยาลัยทางด้านไอทีในประเทศเดนมาร์ก ภายใต้ชื่อ ITU GazeTracker และผลงานวิจัย OpenEyes ของ Dongheng และคณะ (2006: 95-100) เป็นต้น

จากตัวอย่างผลงานวิจัยข้างต้น จะเห็นได้ว่างานวิจัยอันเกี่ยวกับเทคโนโลยีติดตามดวงตาได้รับความสนใจและคิดค้นพัฒนากันอย่างกว้างขวางในกลุ่มนักวิจัยในต่างประเทศ อย่างไรก็ตาม พบว่างานวิจัยภายในประเทศไทยยังไม่กว้างขวางมากนัก ซึ่งอาจเกิดจากปัญหาและอุปสรรคด้านต้นทุนของอุปกรณ์ที่มีราคาสูง และยังคงสั่งซื้อนำเข้าจากต่างประเทศอีกด้วย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์ติดตามดวงตาต้นทุนต่ำ โดยใช้วัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ในประเทศ ภายใต้เทคนิคการติดตามดวงตาด้วยสัญญาณภาพวิดีโอ และดำเนินการหาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมประมาณตำแหน่งเพ่งมองของสายตาร่วมกับอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น โดยมีจุดมุ่งหวังเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ติดตามดวงตาต้นทุนต่ำที่ใช้ในการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการติดตามดวงตาสำหรับประยุกต์ใช้งานกับศาสตร์ด้านการสร้างระบบปฏิบัติสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และคอมพิวเตอร์ต่อไป

2. วิธีการทดลอง

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้สามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วนงานหลัก คือ การออกแบบและพัฒนา

อุปกรณ์ติดตามดวงตา โดยทำการศึกษาวิธีการต้นแบบจากโครงงานวิจัยต่าง ๆ ในต่างประเทศเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา จัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ต้องใช้ และพัฒนาอุปกรณ์ขึ้น อีกส่วนหนึ่งคือการออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อใช้ในการตรวจจับภาพบริเวณดวงตา (Eye Detection) อัลกอริทึมติดตามตำแหน่งดวงตา (Eye Tracking) และอัลกอริทึมหาตำแหน่งเพ่งมองของสายตา (Eye-Gaze Estimation) รายละเอียดการดำเนินงานในแต่ละส่วนได้นำเสนอในหัวข้อลำดับถัดไป

2.1 การออกแบบและพัฒนาระบบ

การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณภาพดวงตาต้นทุนต่ำในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้แนวคิดการพัฒนาจากโครงการพัฒนาอุปกรณ์ติดตามดวงตาเพื่อช่วยเหลือผู้ป่วยกล้ามเนื้ออ่อนแรง (ALS) ที่ชื่อว่า EyeWriter (<http://www.eyewriter.org/>) โครงการนี้คิดค้นและพัฒนาาร่วมกันของทีมงานหลายห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย Free Art and Technology (FAT), openFramework, Graffiti Research Lab และ Ebeling Group Communities เนื่องจากมีความเหมาะสมกับการจัดหาวัสดุในการพัฒนาภายในประเทศ ซึ่งอุปกรณ์หลักในการพัฒนา คือ กล้องดิจิทัลเว็บแคม (Digital Webcam) งานวิจัยนี้ใช้กล้องยี่ห้อ Sony PlayStation3 (PS3) มีความละเอียด 640x480 พิกเซล มีอัตราความเร็ว 60 Hz. เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ด้วยพอร์ตยูเอสบี (USB) นอกจากนั้น ยังมีวัสดุอุปกรณ์รายการอื่นในการพัฒนาอุปกรณ์ติดตามดวงตาอีกจำนวน 18 รายการ ดังแสดงในรูปที่ 1

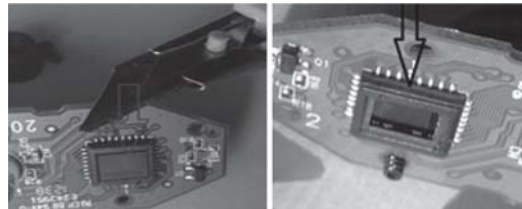


รูปที่ 1 รายละเอียดรายการวัสดุอุปกรณ์สำหรับพัฒนาอุปกรณ์ติดตามดวงตาดันทุนต่ำ

การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณภาพดวงตาดันทุนต่ำ โดยการดัดแปลงกล้องดิจิทัลเว็บแคมให้ทำงานร่วมกับคลื่นสัญญาณอินฟราเรด มีรายละเอียดและขั้นตอนที่ผู้วิจัยได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา (Janthanasub and Meesad, 2015) กล่าวคือ กล้องดิจิทัลเว็บแคมจะถูกนำมาถอดโครง (Body) ของกล้องออกให้เหลือแต่แผ่นวงจร (Print Circuit Board: PCB) เพื่อนำฟิลเตอร์ที่ติดมากับกล้องออก แล้วนำแผ่นฟิล์มเนกาทีฟ (Negative Film) มาใส่แทน รายละเอียดดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ขั้นตอนการถอดแผงวงจรตัวกล้อง



รูปที่ 3 ขั้นตอนการดัดแปลงฟิลเตอร์ของกล้อง

ติดตั้งอุปกรณ์แปลงสัญญาณคลื่นแสงอินฟราเรดเพื่อช่วยในการตรวจจับภาพดวงตาให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น จากนั้นนำกล้องดิจิทัลเว็บแคมที่ดัดแปลงเรียบร้อยแล้วติดตั้งเข้ากับกรอบของแว่นตา ทดสอบการทำงานอีกครั้ง จะได้ภาพดวงตาจากโหมดคลื่นสัญญาณภาพอินฟราเรดดังแสดงในรูปที่ 4



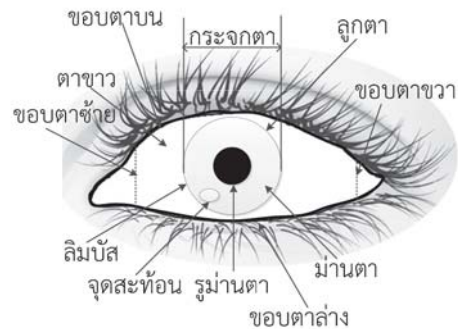
รูปที่ 4 ผลลัพธ์ภาพดวงตาที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับภาพดวงตาดันทุนต่ำที่ประดิษฐ์

2.2 การออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึม

เป็นการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับติดตามตำแหน่งของสายตา (Eye- Gaze Tracking) ซึ่งในการวิจัยในครั้งนี้ใช้เทคนิค VOG โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณภาพดวงตาต้นทุนต่ำที่ได้พัฒนาขึ้น สำหรับชุดซอฟต์แวร์ในการพัฒนาในครั้งนี้ใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio 2013 เขียนรหัสคำสั่งด้วยภาษา C++ ทำงานร่วมกับไลบรารีเปิด OpenGL, OpenCV และ GNU Scientific Library (GSL) สำหรับงานด้านการประมวลผลภาพ และใช้สำหรับการคำนวณทางด้านคณิตศาสตร์โดยทำการติดตั้ง OpenFrameworks เพื่อให้การเรียกใช้งานสะดวกมากยิ่งขึ้น (<http://www.openframeworks.cc>) สำหรับรายละเอียดการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาอัลกอริทึมมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

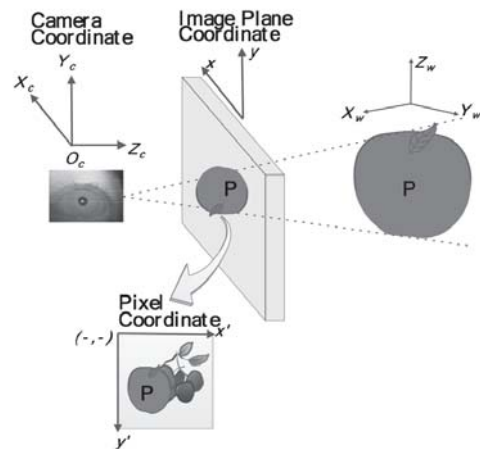
2.2.1 ดวงตาและการมองเห็น

ลูกตา (Eyes Ball) เป็นอวัยวะสำคัญสำหรับการมองเห็น ลูกตาส่งตรงกลางของกรอบตา (Eye Frame) มีลักษณะเป็นทรงกลม (Circular) ผิวชั้นด้านนอกสุดคือกระจกตา (Cornea) มีลักษณะใสคล้ายกระจกสามารถสะท้อนแสงได้ ชั้นถัดมาเป็นม่านตา (Iris) ซึ่งมีลวดลายและสีสรรที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเชื้อชาติ ภายในม่านตาจะมีวงกลมเล็กๆ อยู่กลางของม่านตา และมีสิ่งที่เข้มกว่าบริเวณอื่นเรียกว่า รูม่านตา (Pupil) โครงสร้างทางกายวิภาคของดวงตามนุษย์แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 โครงสร้างทางกายวิภาคของดวงตามนุษย์

การมองเห็นของดวงตาสามารถเข้าใจได้ด้วยหลักการฉายภาพ (Perspective) และหน้าที่กลไกการทำงานของกล้อง (Bradski and Kaebler, 2008) โดยแบบจำลองของกล้อง (Camera Model) แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองการมองเห็นด้วยโมเดลกล้อง

ระบบพิกัดจากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงพิกัดของจุด $\mathbf{P}$ บนวัตถุที่อยู่ในระบบพิกัดที่ต่างกัน คือ พิกัด (X_w, Y_w, Z_w) เป็นระบบพิกัดโลกจริง 3 มิติ (3D World Coordinate System) ที่มีจุดกำเนิด (O_w) พิกัด (X_c, Y_c, Z_c) เป็นระบบพิกัดของกล้อง 3 มิติ (3D Camera Coordinate) มีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดกึ่งกลางของเลนส์ คือ (O_c) และทิศทางของแกน Z_c อยู่ในแนวเดียวกับการมองของกล้องหรือดวงตา สำหรับพิกัด (x_m, y_m) เป็นระบบพิกัดภาพ (Image Plane Coordinate System) ที่ขนานกับแกน X_c และ Y_c ของระบบพิกัดกล้อง โดยมี f เป็นระยะห่างระหว่างระนาบของภาพกับจุดกึ่งกลางเลนส์ ซึ่งเรียกว่า ระยะโฟกัสของเลนส์กล้อง และพิกัดสุดท้าย คือ (x_u, y_u) เป็นค่าพิกัดในระบบพิกัดภาพ (Pixel Coordinate System) ของจุด $\mathbf{P}$ ซึ่งระบบพิกัดเหล่านี้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกันได้ด้วยการแปลง โดยใช้สมการของกล้องรูเข็ม (Pinhole Camera Equation) นิยามดังสมการ (1)

$$x_u = f \frac{X_c}{Z_c}, y_u = f \frac{Y_c}{Z_c}, \quad (1)$$

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับการติดตามตำแหน่งของสายตาจากสัญญาณภาพวิดีโอ สิ่งจำเป็นอีกประการหนึ่ง คือ การแปลงพิกัดเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformation) เนื่องจากต้องมีการย้าย และการหมุนภาพ สำหรับหลักการแปลงพิกัดภาพด้วยการแปลงเชิงเรขาคณิตนั้น ฟังก์ชันการแปลงพิกัดอยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ซึ่งมีรูปแบบที่ต่างกัน (Bradski Kaebler, 2008)

การหมุน (Rotation) เป็นการหมุนรอบแกนต่าง ๆ ทั้งสามแกน ซึ่งได้แก่ x, y หรือ z โดยการ

อ้างอิงการมองในลักษณะมองออกจากจุดกำเนิดไปตามแนวแกนต่าง ๆ ซึ่งทิศทางการหมุนจะหมุนตามเข็มนาฬิกา สำหรับทิศทางของการเคลื่อนที่ของลูกตามนุษย์นั้นจะเคลื่อนที่ในแนวแกน x อยู่ระหว่างขอบตาข้างซ้าย-ขวา และแนวแกน y เป็นระยะทางระหว่างขอบตาบน-ล่าง และการหมุนของลูกตาจะหมุนรอบแกน x และแกน y ซึ่งทำให้เกิดมุม θ และมุม ϕ สามารถคำนวณได้ด้วยหลักการตรีโกณมิติ สำหรับสมการการหมุนของลูกตานิยามให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ที่แตกต่างกันดังสมการที่ (2)-(4) ตามลำดับ

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

การเคลื่อนย้ายตำแหน่ง (Translation) โดยกำหนดให้ T_x, T_y, T_z คือ ระยะทางของการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ นิยามดังสมการที่ (5)

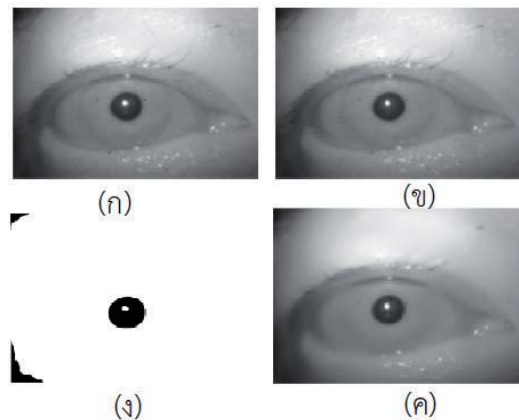
$$[x', y', z', h] = [x, y, z, 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2.2 การกำหนดจุดอ้างอิงตำแหน่งดวงตา

เป็นกระบวนการหาคุณลักษณะของดวงตาจากภาพที่นำเข้ามาจากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณภาพดวงตาที่ได้พัฒนาขึ้น คุณลักษณะเฉพาะของดวงตาที่ใช้สำหรับตรวจหาบริเวณของดวงตาประกอบด้วย ม่านตา (Iris) รูม่านตา (Pupil) มุมของตา (Corners) ระยะห่างของตา (Between the Eyes) และองค์ประกอบโดยรวม (Entire Eye) สำหรับวิธีการที่นำมาใช้สกัดคุณลักษณะดังกล่าวข้างต้น วิธีการที่นิยมใช้ คือ การหาจากคุณลักษณะของรูปทรง (Shape Base Method) โดยรูปทรงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของดวงตา อาทิเช่น ทรงกลม (Circular Shape) รูปทรงทรงรี (Ellipse Shape) หรือใช้ทั้งสองรูปทรงร่วมกัน (Complex Shape) (Hansen and Qiang, 2010: 478-500)

ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ใช้คุณลักษณะเฉพาะของรูม่านตาโดยกำหนดให้พิกัดตำแหน่งจุดกึ่งกลาง รูม่านตา (Pupil Center Point: PCP) เป็นตำแหน่งอ้างอิงของดวงตาในภาพ วิธีการเริ่มต้นจากนำภาพดวงตาด้านฉบับมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยการแปลงภาพดวงตาด้านฉบับซึ่งเป็นภาพโหมดภาพสี (RGB Color Image) เป็นภาพโหมดสีเทา (Gray Scale Image) จากนั้นกำจัดสัญญาณรบกวนที่เป็นจุดเล็ก ๆ (Salt and Pepper Noise) ด้วยตัวกรองเกาส์เซียน (Gaussian Filter) ขนาด 3x3 จะทำให้ได้ภาพดวงตามีความราบเรียบขึ้น จากนั้นแปลงภาพเป็นภาพขาวดำ (Binary Image) ด้วยตัวแบ่งค่ากั้นสี (Thresholding) ภาพผลลัพธ์จากขั้นตอนนี้จะทำให้ข้อมูลภาพบริเวณรูม่านตากับบริเวณอื่นแยกออกจากกัน และภาพ

ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการประมวลผลภาพจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์หาคุณลักษณะเฉพาะของดวงตา และกำหนดจุดพิกัดอ้างอิงของดวงตาที่จะนำไปใช้ในการประมาณตำแหน่งของสายตาท่อไป ตัวอย่างภาพผลลัพธ์จากกระบวนการปรับปรุงภาพในแต่ละขั้นตอนแสดงดัง รูปที่ 7 (ก) ถึง (ง) ตามลำดับ



รูปที่ 7 ตัวอย่างภาพผลลัพธ์การปรับปรุงภาพดวงตา

- (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) ภาพโหมดขาวเทา
(ค) ภาพผ่านตัวกรอง และ
(ง) ภาพโหมดขาวดำ

การวิเคราะห์หาคุณลักษณะของดวงตาสำหรับงานวิจัยนี้มีวิธีขั้นตอน คือ จัดข้อมูลส่วนที่ไม่ใช่ รูม่านตาด้วยกระบวนการวิเคราะห์หีบลิบบ (Blob Analysis) ซึ่งเป็นกระบวนการหาหีบลิบบตำแหน่งของกลุ่มจุดสีโดยใช้อัลกอริทึม Flood Fill แบบ 8 ทิศทาง (Tao, Nong-liang and Mao-Yong, 2008: 322-325) ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์หีบลิบบ คือ ขอบเขตของข้อมูลภาพในแต่ละส่วน จากนั้นดำเนินการหารูม่านตาด้วยเทคนิคการหาความคล้ายรูปทรงกลม (Hough Circle Transform: CHT) (Gao, et al., 2009: 751-754) สมการวงกลมของเทคนิค CHT นิยาม

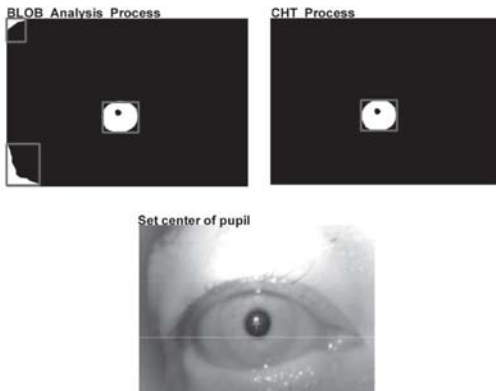
ตั้งสมการที่ (6) และภาพผลลัพธ์แสดงดังรูปที่ 8

$$r^2 = (x - C_x)^2 + (y - C_y)^2 \quad (6)$$

เมื่อ C_x คือ จุดศูนย์กลางของวงกลมในแกน

C_y คือ จุดศูนย์กลางของวงกลมในแกน

r คือ รัศมีของวงกลม



รูปที่ 8 ภาพผลลัพธ์กระบวนการตรวจจับรูม่านตา

จากสมการหาความคล้ายวงกลมของเทคนิค CHT สามารถคำนวณหาพิกัดตำแหน่งจุดกึ่งกลางของรูม่านตาขณะเคลื่อนที่ได้จากการแปลงพิกัดโดยคำนวณให้อยู่ในรูปแบบของระบบพิกัด คือ $P(x', y', z')$ ด้วยฟังก์ชันแปลงพิกัดเชิงเรขาคณิตตามหลักการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับการประมาณตำแหน่งพิกัดอ้างอิงของดวงตาขณะที่ลูกตาเคลื่อนที่นั้น ใช้หลักการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธี ellipse fitting และใช้เทคนิคในการติดตามตำแหน่งอ้างอิงดวงตาด้วยอัลกอริทึม CAMSHIFT (Bradski and Kaebler, 2008)

2.2.3 การประมาณตำแหน่งเพ่งมอง

โดยทั่วไปหลักการประมาณค่าตำแหน่งเพ่งมองของสายตา หรือ POG พิจารณาจากฟังก์ชัน

เพ่งมอง (Gaze Function) แทนด้วยสัญลักษณ์ Φ ในการประมาณค่าตำแหน่งเพ่งมองใด ๆ นิยามตั้งสมการที่ 7

$$P = \Phi_c(X) \quad (7)$$

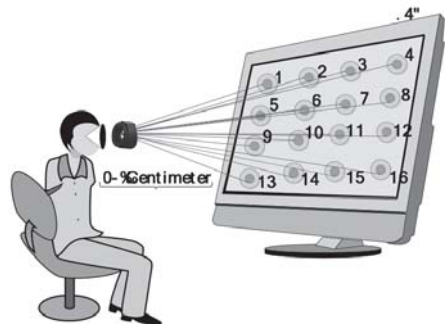
โดยที่ P คือ พิกัด POG ในระนาบ $\mathbb{R}^2$

X คือ พิกัดดวงตาในภาพอยู่ในระนาบ $\mathbb{R}^2$

Φ คือ ฟังก์ชันเพ่งมองของสายตา

c คือ ตัวแปรที่ได้จากการสอบเทียบพิกัด

โดยขั้นตอนการหาค่าฟังก์ชัน Φ ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้เริ่มต้นจาก ดำเนินการสอบเทียบตำแหน่งของสายตา (Calibration Process) กับหมุดอ้างอิงบนหน้าต่างวินโดวในจอภาพ (Screen Control Point: SCP) เพื่อใช้เป็นข้อมูลพิกัดเริ่มต้นในการสร้างฟังก์ชัน Φ ในงานวิจัยนี้กำหนดจุด SCP ขนาด 50x50 จุดภาพ จำนวน 16 จุดบนกริดขนาด 4x4 จัดเรียงบนหน้าต่างวินโดวขนาด 1280x1024 จุดภาพ สอบเทียบสายตากับผู้ทดสอบจำนวน 30 ราย วิธีการโดยให้ผู้ทดสอบมองไปยังจุด SCP ในขณะเดียวกันระบบจะดำเนินการบันทึกภาพดวงตาขณะมองไปยังจุด SCP แต่ละจุดจนครบ แบบจำลองการสอบเทียบตำแหน่งสายตาแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แบบจำลองการสอบเทียบตำแหน่งสายตา

ดำเนินการหาฟังก์ชัน Φ ด้วยการพิจารณาความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลพิกัดหมุดอ้างอิงบนหน้าตาเว็บในจอภาพกับพิกัดดวงตาอ้างอิงในภาพที่ได้จากกระบวนการสอบเทียบตำแหน่งสายตาข้างต้น จากนั้นนำฟังก์ชันที่ได้ไปประมาณค่าตำแหน่ง POG ในตำแหน่งใด ๆ บนจอภาพ สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ใช้วิธีการประมาณค่าฟังก์ชันเฟรมองที่เหมาะสมด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square) โดยดำเนินการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าตำแหน่ง POG จากสมการคณิตศาสตร์ 3 รูปแบบคือ สมการเชิงเส้น (Linear Model) สมการพหุนามดีกรีสอง (Quadratic Model) และสมการพหุนามดีกรีสาม (Cubic Model) (Hennessey, Nouredin and Lawrence, 2008: 289-298) นิยามดังสมการที่ (8) ถึง (10) ตามลำดับสมการเชิงเส้น:

$$\begin{aligned}\hat{x} &= a_0 + a_1x + a_2y, \\ \hat{y} &= b_0 + b_1x + b_2y\end{aligned}\quad (8)$$

สมการพหุนามดีกรีสอง:

$$\begin{aligned}\hat{x} &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 \\ &\quad + a_4xy + a_5y^2, \\ \hat{y} &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 \\ &\quad + b_4xy + b_5y^2\end{aligned}\quad (9)$$

สมการพหุนามดีกรีสาม:

$$\begin{aligned}\hat{x} &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 \\ &\quad + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^3 \\ &\quad + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3, \\ \hat{y} &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 \\ &\quad + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^3 \\ &\quad + b_7x^2y + b_8xy^2 + b_9y^3\end{aligned}\quad (10)$$

จากสมการข้างต้น $\hat{x}, \hat{y}$ คือ ค่าพิกัดโดยประมาณของ POG บนจอภาพในระนาบ $\mathbb{R}^2$ ตามแนวแกน x และตามแนวแกน y ตามลำดับ x, y คือ พิกัดของจุดอ้างอิงของภาพดวงตาในแนวระนาบเดียวกัน สำหรับ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_9$ และ $b_0, b_1, b_2, \dots, b_9$ เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จากนั้นวัดประสิทธิภาพของการประมาณค่า POG ของฟังก์ชัน Φ ที่ได้ด้วยค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) นิยามดังสมการที่ (11)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (11)$$

เมื่อ y_i คือ ค่าพิกัดที่ได้จากการสอบเทียบสายตา
 $\hat{y}_i$ คือ ค่าพิกัดที่ได้จากการประมาณค่า
 n คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้ประมาณค่าทั้งหมด

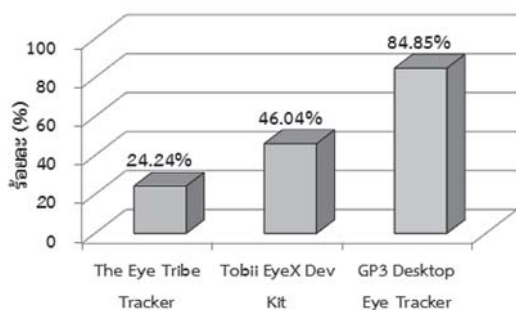
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การศึกษา ทดลอง และดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ แบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการพัฒนาฮาร์ดแวร์อุปกรณ์ตรวจจับภาพดวงตาต้นทุนต่ำ และส่วนการทดสอบประสิทธิภาพการติดตามตำแหน่งของสายตา ซึ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1 ผลการทดลองการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับภาพดวงตาต้นทุนต่ำ

ผลการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับภาพดวงตาต้นทุนต่ำ พบว่า อุปกรณ์ตรวจจับภาพดวงตาที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับภาพดวงตาได้ และได้ภาพดวงตาที่มีความเหมาะสมสำหรับการประมวลผลเพื่อติดตามตำแหน่งของสายตา ซึ่งใน

การพัฒนาในครั้งนี้ใช้วัสดุภายในประเทศ รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 2,500 บาท หรือประมาณ 75 ดอลลาร์ (USD) และในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการเปรียบเทียบด้านราคาของอุปกรณ์ตรวจจับภาพดวงตาที่ได้พัฒนาขึ้นกับอุปกรณ์ตรวจจับภาพดวงตาในกลุ่มต้นทุนต่ำ (Lower-Cost) ที่จำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์ในต่างประเทศจำนวน 3 ยี่ห้อ คือ The Eye Tribe Tracker, Tobii EyeX Dev Kit และ GP3 Desktop Eye Tracker (GazePoint's GP3) อีกด้วย ซึ่งปัจจุบันราคาของอุปกรณ์ติดตามดวงตาที่จำหน่ายในต่างประเทศถูกจัดแบ่งตามความสามารถและประสิทธิภาพของการประมาณค่าตำแหน่ง POG โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักคือ อุปกรณ์ต้นทุนต่ำ อุปกรณ์ต้นทุนปานกลาง และกลุ่มอุปกรณ์ต้นทุนสูง โดยรายละเอียดผลการเปรียบเทียบร้อยละของต้นทุนที่ลดลงระหว่าง D.I.Y Eye Tracking ที่ผู้วิจัยประดิษฐ์ขึ้นกับอุปกรณ์กลุ่มต้นทุนต่ำ 3 ยี่ห้อ แสดงดังรูปที่ 10



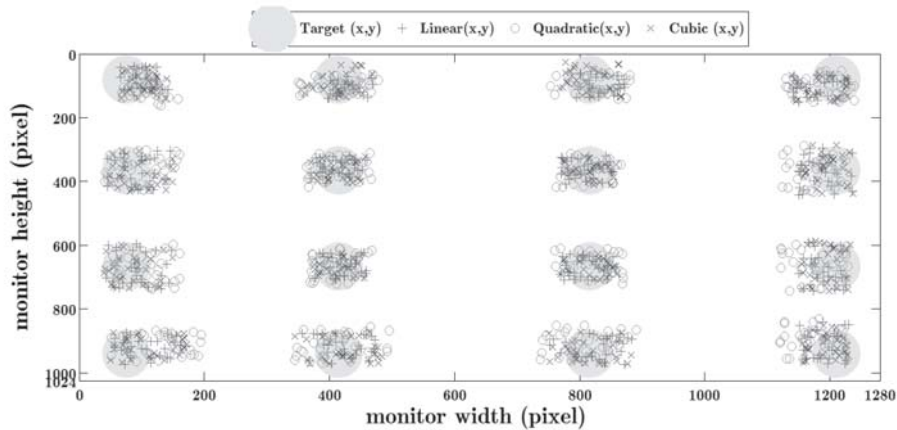
รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบร้อยละของต้นทุนที่ลดลง

จากผลการเปรียบเทียบด้านราคาในรูปที่ 10 พบว่า อุปกรณ์ตรวจจับภาพดวงตาที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีราคาต่ำกว่า ยังผลต่อการลดต้นทุน

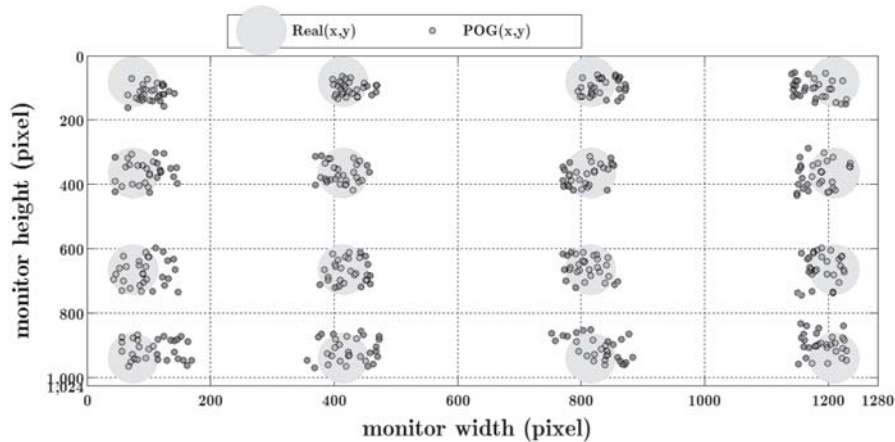
การนำเข้าผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศได้ โดยสามารถลดต้นทุนจากนำเข้าอุปกรณ์ The EyeTribe Tracker เท่ากับ ร้อยละ 24.24 อุปกรณ์ Tobii EyeX Dev Kit ร้อยละ 46.04 และอุปกรณ์ GP3 Eye Tracker Desktop (GazePoint's GP3) ร้อยละ 84.85

3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของการติดตามตำแหน่งเพ่งมองของสายตา

ในขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพของการติดตามตำแหน่งเพ่งมองของสายตาในงานวิจัยนี้ใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 ราย สอบเทียบตำแหน่งสายตาทั้งหมดอ้างอิงจำนวน 16 จุดบนหน้าตาจาวินโดว์ขนาด 1280x1024 จุดภาพ จากนั้นสร้างฟังก์ชันเพ่งมองจากสมการเชิงเส้น สมการพหุนามดีกรีสอง และสมการพหุนามดีกรีสาม ประมาณค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด ดำเนินการวัดประสิทธิภาพการประมาณค่า POG ด้วยค่า RMSE และค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระยะห่าง ผลการคำนวณพบว่า ค่า POG ที่ได้จากการประมาณด้วยฟังก์ชันเพ่งมองของสมการพหุนามดีกรีสาม และสมการเชิงเส้นมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ในขณะที่การประมาณค่า POG จากสมการพหุนามดีกรีสองประมาณพิกัดตำแหน่งของสายตาคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก ผลลัพธ์แสดงดังกราฟการกระจายของข้อมูลพิกัดแสดงดังรูปที่ 11 และรูปที่ 12 ตามลำดับ สำหรับผลการคำนวณค่า RMSE และค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระยะห่างแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบการกระจายข้อมูลพิกัด POG ของฟังก์ชันประมาณค่าทั้งสาม



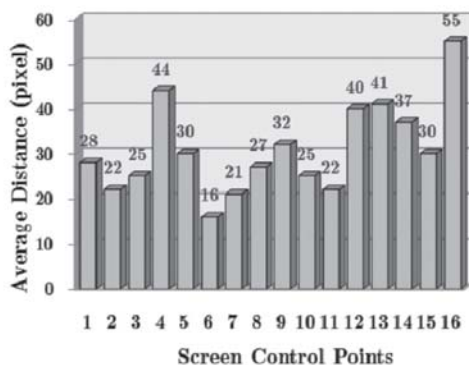
รูปที่ 12 กราฟการกระจายข้อมูลพิกัด POG ของฟังก์ชันประมาณค่าแบบพหุนามดีสาม

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพฟังก์ชันฟังก์ชัน

ชนิดฟังก์ชัน	<i>RMSE</i>		$\ y - y_{ll}\ $
linear	X	18.14	23
	Y	17.20	
quadratic	X	18.01	45
	Y	41.72	
cubic	X	17.51	20
	Y	15.57	

จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าฟังก์ชันของสายตา (POG) ของสมการคณิตศาสตร์ทั้ง 3 รูปแบบดังแสดงในตารางที่ 1 ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ผลลัพธ์จากการประมาณค่าด้วยสมการพหุนามดีกรีสามให้ประสิทธิภาพความแม่นยำในการชี้ตำแหน่งบนหมุดอ้างอิงทั้ง 16 จุดได้ดีที่สุดที่ค่าคลาดเคลื่อนของระยะห่าง 20 จุด และจากผลการทดลองรูปที่ 12 แสดงข้อมูลพิกัดตำแหน่งของสายตาที่ได้จากการประมาณค่าด้วย

ฟังก์ชันพหุนามดีกรีสาม โดยพิกัดตำแหน่งของจุดอ้างอิงของสายตามัลติเพล็กซ์ **PCP** (x,y) สามารถระบุตำแหน่งบนพิกัดหมุดอ้างอิง **Peal** (x,y) ในแต่ละจุดแสดงด้วยสัญลักษณ์จุดวงกลมสีส้ม ในขณะที่จุดวงกลมสีน้ำเงินแสดงถึงพิกัดตำแหน่งสายตาคงที่ไม่สามารถระบุตำแหน่งบนพิกัดของหมุดอ้างอิงได้ และจากการพิจารณาข้อมูลพิกัดตำแหน่งสายตาเหล่านี้ พบว่า พื้นที่บริเวณกลางหน้าตา วินโดว์ หรือ กลางจอภาพนั้นผู้ทดสอบสามารถมองไปยังตำแหน่งหมุดอ้างอิงที่กำหนดไว้ได้ดีกว่า พื้นที่บริเวณขอบด้านข้างของจอภาพจะเห็นได้ว่าตำแหน่งสอบเทียบสายตาของผู้ทดสอบในบริเวณดังกล่าวค่อนข้างมีค่าคลาดเคลื่อนสูง และเมื่อพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนของระยะห่างเฉลี่ยระหว่างจุดพิกัดสอบเทียบกับพิกัดจริงของหมุดบนจอภาพพบว่าหมุดอ้างอิงที่แถวล่างสุดมีค่าคลาดเคลื่อนสูงกว่าตำแหน่งหมุดอ้างอิงอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหมุดอ้างอิงที่ 16 ซึ่งเป็นหมุดอ้างอิงสุดท้ายมีค่าคลาดเคลื่อนของระยะห่างเฉลี่ยที่ 55 จุดภาพ และหมุดอ้างอิงที่ 2, 3, 6, 7, 10, และ 11 ซึ่งเป็นหมุดอ้างอิงที่อยู่บริเวณกลางหน้าจอมีค่าคลาดเคลื่อนของระยะห่างเฉลี่ยที่ต่ำกว่า รายละเอียดดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระยะห่างของการสอบเทียบสายตาในละจุดอ้างอิง

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับภาพดวงตาต้นทุนต่ำ โดยพัฒนาจากวัสดุและอุปกรณ์ภายในประเทศ ซึ่งวัสดุอุปกรณ์หลัก คือ กล้องดิจิทัลเว็บแคมที่ถูกนำมาดัดแปลงให้มีความสามารถตรวจจับภาพด้วยคลื่นความถี่อินฟราเรด จากนั้นติดตั้งเข้ากับกรอบของแว่นตา โดยมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาเพื่อลดต้นทุนการนำเข้าอุปกรณ์ตรวจจับภาพดวงตาราคาแพงจากต่างประเทศ และนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ในงานวิจัยติดตามตำแหน่งของสายตากับงานด้านระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ ผลจากการพัฒนาพบว่าอุปกรณ์ตรวจจับภาพดวงตาสามารถทำงานได้ดีและช่วยลดต้นทุนการนำเข้าอุปกรณ์ราคาแพงจากต่างประเทศได้ อย่างไรก็ตาม การศึกษาวิจัยเปรียบเทียบด้านประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงและควรดำเนินการศึกษาวิจัยต่อไป

ในส่วนของประสิทธิภาพการติดตามตำแหน่งของสายตา ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยประดิษฐ์ฟังก์ชันประมาณค่าตำแหน่งเพ่งมองของสายตาจากสมการ 3 รูปแบบ คือ สมการเชิงเส้น สมการพหุนามดีกรีสอง และสมการพหุนามดีกรีสาม และใช้วิธีการกำลังสองน้อยสุดหาฟังก์ชันที่เหมาะสม ผลการทดสอบประสิทธิภาพ พบว่าฟังก์ชันเพ่งมองแบบเชิงเส้นและแบบพหุนามดีกรีสามมีประสิทธิภาพในการประมาณพิกัดเพ่งมองที่ใกล้เคียงกัน แต่สำหรับฟังก์ชันเพ่งมองแบบสมการพหุนามดีกรีสองมีค่าคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง ซึ่งการวัดประสิทธิภาพของฟังก์ชันเพ่งมองพิจารณาจากค่า RMSE และค่าคลาดเคลื่อนระยะห่างเฉลี่ย โดยหน่วยที่ใช้วัดเป็นขนาดเท่ากับ 1 จุดภาพ ซึ่งมี

ขนาดที่เล็กมาก สำหรับในทางปฏิบัติแล้ววัตถุเป้าหมายใด ๆ บน แอปพลิเคชันต่าง ๆ จะมีขนาดที่ใหญ่กว่า ดังนั้น ขนาดของวัตถุเป้าหมายจึงมีผลต่อประสิทธิภาพของการติดตามตำแหน่งของสายตาเพื่อใช้สำหรับการคอมพิวเตอร์ด้วยเช่นกัน

เมื่อพิจารณาค่าระยะทางเฉลี่ยระหว่างระบบพิกัดทั้งสองของฟังก์ชันเพ่งมองแบบพหุนามดีกรีสาม และแบบสมการเชิงเส้น มีค่าเป็น 20 จุดภาพ และ 23 จุดภาพ ตามลำดับ และเมื่อนำมาพิจารณากับขนาดของวัตถุเป้าหมายขนาด 50x50 จุดภาพ ก็พบว่าพิกัดของสายตาที่ได้จากการประมาณค่ายังอยู่ภายในขอบเขตบริเวณของวัตถุเป้าหมาย นอกจากนี้ยังพบว่าตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางของจอภาพเป็นบริเวณที่ฟังก์ชันเพ่งมองประมาณค่าพิกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งนับได้ว่าตำแหน่งบนจอภาพก็มีผลต่อประสิทธิภาพของการประมาณด้วย

อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการสอบเทียบตำแหน่งสายตาของผู้ทดสอบค่อนข้างใช้เวลามาก เนื่องจากต้องให้เวลาอธิบายวิธีการ รวมทั้งให้ผู้ทดสอบทดลองใช้งานอุปกรณ์ และข้อควรระวัง ในขณะที่สอบเทียบตำแหน่งสายตา คือ ผู้ทดสอบต้องไม่เคลื่อนไหวศีรษะขณะทดสอบ เพราะจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการประมาณตำแหน่งของสายตาอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่สนับสนุนงบประมาณในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณภาพดวงตาต้นทุนต่ำ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Dongheng, L., Babcockm, J. and Parkhurmt, D. 2006. openEyes: a low-cost head-mounted eye-tracking solution. In **IEEE Proceedings of the 2006 symposium on Eye tracking research & applications**. 95-100.
- Dodge, R. (1916). Visual moter functions. **Psychological Bulletin**. 13: 421-427.
- Bradski, G. and Kaebler, A. 2008. **Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV Library**. Cambridge: O'Relly.
- Gao, J., et al. 2009. Application of hough transform in eye tracking and targeting. In **9th International IEEE Conference on Electronic Measurement & Instruments, (ICEMI'09)**. 751-754.
- Hansen, D.W. and Qiang, Ji. 2010. In the Eye of the Beholder: A Survey of Models for Eyes and Gaze. In **IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence**. 32(3): 478-500.
- Hennessey, C., Nouredin, B. and Lawrence, P. 2008. Fixation precision in high-speed noncontact eye-gaze. In **IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics**. 38(2): 289-298.
- Huey, E.B. 1900. On the psychology and physiology of reading. **American Journal of Psychology**. 11: 283-302.

- Janthanasub, V. and Meesad, P. 2015. Evaluation of a Low-cost Eye Tracking System for Computer Input. In **King Mongkut's University of Technology North Bangkok International Journal of Applied Science and Technology (KMUTNB: IJAST)**. 8(3).
- Javal, L.E. 1905. **Physiologie de la lecture et de l'écriture**. Paris: Alcan.
- Ogama. [online]. [cited 2014 January 14]. Available from URL: <http://www.ogama.codeplex.com/openFrameworks>. [online]. [cited 2014 June 12]. Available from URL: <http://www.openframeworks/>
- Tao, J., Nong-liang, S. and Mao-Yong, C. 2008. Moving object detection based on blob analysis. In **IEEE Interconference on Automation and Logistics (ICAL2008)**. 322-325.
- ITU GazeTracker. [online]. [cited 2014 June 12]. Available from URL: <http://www.itu.dk/>
- The Eyewriter project. [online]. [cited 2014 March 15]. Available from URL: <http://www.eyewriter.org/>