

การติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของวัตถุบนระนาบ ด้วยกล้องและเซนเซอร์อินฟราเรด

นिरมล เรืองพยุงค์¹

บทคัดย่อ

การติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุในภาพ และการออกแบบตัวควบคุมให้ทำงานได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งเทคนิคและอัลกอริทึมต่างๆ ได้ถูกนำเสนอขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง ในขณะที่การหาตำแหน่งและเส้นทางการเคลื่อนที่ของวัตถุถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของการติดตามวัตถุ เนื่องจากตำแหน่งวัตถุสามารถนำมาป้อนกลับ เพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนไหวของกล้อง โดยทั่วไปการใช้ภาพจากกล้องเพียงตัวเดียวเพื่อประมาณตำแหน่งของวัตถุ จำเป็นต้องทำการสอบเทียบกล้องเพื่อหาตัวแปรของกล้อง อย่างไรก็ตามแม้ว่าการใช้ภาพจะได้ความแม่นยำเป็นที่ยอมรับ แต่ก็พบว่ามีการเบี่ยงเบนของการประมาณเส้นทางการเคลื่อนที่วัตถุ งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการติดตามวัตถุเคลื่อนที่บนระนาบ โดยใช้ทั้งข้อมูลภาพจากกล้อง และข้อมูล

ระยะทางจากเซนเซอร์อินฟราเรด เพื่อประมาณหาตำแหน่งของวัตถุในภาพและติดตามวัตถุ โดยให้วัตถุอยู่ที่ใจกลางภาพตลอดเวลา ระบบกล้องสององศาอิสระ ได้ถูกสร้างขึ้นจากมอเตอร์กระแสตรงและกล้องเว็บแคม เพื่อทดสอบวิธีการติดตามวัตถุที่นำเสนอ จุดเด่นของวิธีที่นำเสนอคือไม่ต้องทำการสอบเทียบกล้องเพื่อหาตัวแปรของกล้องและการประมาณตำแหน่งของวัตถุใช้ทฤษฎีมุมออยเลอร์ซึ่งไม่ซับซ้อน ลูกบอลสีพลาสติกที่ไม่ดูดซับแสงสะท้อนถูกนำมาใช้ในการทดลอง แม้ว่าเซนเซอร์อินฟราเรดจะมีสัญญาณรบกวน แต่สามารถใช้เวลานานฟิลเตอร์กรองสัญญาณทำให้ได้เส้นทางการเคลื่อนที่ของวัตถุบนระนาบที่มีความแม่นยำ

คำสำคัญ: การติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ การควบคุมมอเตอร์ด้วยภาพ เซนเซอร์อินฟราเรด ฟิลเตอร์คาลมาน การกรองสัญญาณเซนเซอร์

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โทรศัพท์ 02-555-2000 ต่อ 8222 อีเมล: nirramonr@kmutnb.ac.th



Object Trajectory Tracking on a Plane Using Camera and Infrared Sensor

Niramom Ruangpayoongsak¹

Abstract

Object tracking in image and design of controller for fast operation, as well as techniques and algorithms are proposed to response the requirements of real applications. Meanwhile, estimating position and trajectory of object is utilized as a part of object tracking since object position can be fed back for camera motion control. Generally, using vision of a single camera for object pose estimation requires camera calibration in order to find camera parameter. However, even vision provides accepted accuracy; Drift of estimated object trajectory is found. This work presents a new technique for target tracking on a horizontal plane using both visions from a camera and distance information from

an infrared sensor for estimating object pose and tracking by keeping object at the center of frame all the time. The 2 DOF camera system is constructed using DC motors and web camera for testing the proposed method. The distinct of the proposed technique is that there is no need for camera calibration and estimation of object pose is simple using Euler angle theory. A color ball, no light absorbed, is used in the experiment. Even though the infrared data contains noise, the Kalman Filter is applied for signal fusion and accurate object trajectory on a plane is obtained.

Keywords: Target Tracking, Visual Servoing, Infrared Sensor, Kalman Filter, Sensor Fusion

¹ Lecturer, Department of Production Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Tel. 0-2555-2000 Ext. 8222, E-mail: niramomr@kmutnb.ac.th

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการใช้หุ่นยนต์ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย โดยที่ต้องการให้หุ่นยนต์หยิบและวางวัตถุหรือเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด แม้ว่าจะมีการนำเซนเซอร์หลายชนิดมาใช้ร่วมกัน เพื่อให้หุ่นยนต์ทำงานได้อย่างแม่นยำ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดทางด้านค่าใช้จ่าย จึงทำให้การนำภาพมาใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

การใช้ภาพเป็นเซนเซอร์ทำหน้าที่เลียนแบบการมองเห็นของมนุษย์ และสามารถทำการวัดโดยไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุ ทำให้ภาพถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมมอเตอร์ของแขนกลและมือจับ จึงได้มีการนิยามคำว่า Visual Servoing [1] ซึ่งหมายถึงการใช้ภาพเพื่อควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกล ให้สัมพันธ์กับวัตถุเป้าหมายโดยใช้การควบคุมแบบวงจรมืด เช่น ควบคุมแขนกลให้หยิบชิ้นงานบนสายการผลิต เป็นต้น การติดตั้งกล้องสำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยภาพ สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ กล้องอยู่ติดกับปลายแขนกล (Eye in Hand) และกล้องติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งที่ตายตัวนอกแขนกล (Fixed Camera Pose) ซึ่งสำหรับทั้งสองกรณีก่อนเริ่มทำงานจะต้องทำการสอบเทียบกล้องเพื่อหาพารามิเตอร์ของกล้อง เช่น ความยาวโฟกัส ระดับพิกเซล (Pixel Pitch) และจุดสำคัญ (Principal Point)

การติดตามวัตถุเป้าหมาย (Target Tracking) [2] โดยติดตั้งกล้องอยู่ติดกับปลายแขนกล อาจมีตั้งแต่สองไปจนถึงหลายองศาอิสระ หากแขนกลมีเพียงสององศาอิสระสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า หน่วยแพนทิลท์ (Pan Tilt Unit) ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้กับกล้องวงจรมืด ส่วนเทคนิคที่ใช้ในการติดตามวัตถุ นั้น อาจใช้กล้องเพียงตัวเดียว สองตัว หรือมากกว่า เพื่อประมวลผลหาตำแหน่งของวัตถุ จากนั้นนำตำแหน่งที่ได้มาไว้เพื่อควบคุมให้มอเตอร์ เพื่อไปเป้าหมายหรือวัตถุที่กำลังติดตามอยู่ที่ตำแหน่งพิกเซลใจกลางของภาพตลอดเวลา

นอกเหนือจากชนิดและจำนวนกล้องที่ใช้ มอเตอร์ที่ใช้ควบคุมกลไกการเคลื่อนที่ของกล้อง ก็อาจใช้เป็น

มอเตอร์เซอร์โว มอเตอร์สเต็ปปิ้ง มอเตอร์กระแสตรง หรือมอเตอร์กระแสสลับ ร่วมกับการใช้เกียร์ทด ซึ่งทำให้เกิดความหลากหลายในการออกแบบอัลกอริทึมควบคุมการทำงาน และผลลัพธ์การติดตามวัตถุที่ได้

วิธีการที่ใช้ในการประมวลผลภาพ ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดความแตกต่างของเทคนิคในการติดตามวัตถุ เช่น การใช้ภาพขาวดำ หรือภาพสี เพื่อตรวจจับขอบของวัตถุ และทำการประมาณตำแหน่งของวัตถุด้วยภาพ ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน เช่น ได้ตำแหน่งพิกเซล (Pixel) ในภาพ หรือพิกัดตำแหน่ง 2 มิติบนระนาบ (2D Pose) หรือตำแหน่งพิกัด 3 มิติ (3D Pose)

บทความนี้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการติดตามวัตถุบนระนาบ โดยใช้ภาพสีจากกล้องเว็บแคมผนวกกับระยะทางที่วัดได้จากการใช้เซนเซอร์อินฟราเรด โดยทำการประมวลผลภาพ เพื่อหาตำแหน่งของวัตถุภายในภาพ และนำตำแหน่งที่ได้มาไว้เพื่อควบคุมการติดตามเพื่อหาเส้นทางเคลื่อนที่ของวัตถุ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ

Kareem et al. [3] นำเสนอระบบติดตามวัตถุสององศาอิสระที่ควบคุมด้วยพัลส์ชิลด์จิก ซึ่งรับอินพุตเป็นพิกัดพิกเซลและให้เอาต์พุตเป็นรอบทำงาน (Duty Cycle) เพื่อปรับความกว้างของพัลส์ของสัญญาณ (PWM) ซึ่งถูกส่งผ่านการ์ดเสียงของคอมพิวเตอร์ (PC Sound Card) ไปยังวงจรมอเตอร์กระแสตรง วัตถุที่ติดตามเป็นหลอดไฟ และทำการทดลองในที่มืด ทำให้เห็นภาพของแหล่งกำเนิดแสงในภาพได้อย่างชัดเจน ในขณะที่กล้องที่ใช้เป็นกล้องเว็บแคมที่มีความละเอียดภาพ 320×240 พิกเซล ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถประหยัดพลังงานและมีราคาถูก

Browning และ Govindaraju [4] นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการตรวจจับวัตถุภายใต้แสงสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้สีของวัตถุ และมุ่งเน้นความเร็วและความยืดหยุ่นในการประมวลผลเพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามลูกบอลในการแข่งขันหุ่นยนต์ฟุตบอลในสนามกลางแจ้ง โดยใช้เพียง

กล้อง Philips 690 มีอัตราความเร็วภาพ 30 เฮิร์ตซ์ มุมกล้อง 110 องศา ติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์ที่มุมก้ม (Tilt) ประมาณ 50 องศา การตั้งค่าขีดแบ่ง (Threshold) แบบไดนามิก ได้ถูกนำเสนอ ได้แก่ วิธีการฉายภาพเวกเตอร์ (Vector Projection) วิถีระยะทางรูปวงรี (Ellipsoid Distance) และวิธีที่ใช้การตั้งค่าขีดแบ่งแบบตายตัว (Fixed Threshold) ซึ่งพบว่าวิถีระยะทางรูปวงรีมีประสิทธิภาพสูงสุดในสภาพแสงที่เปลี่ยนแปลง

2.2 งานวิจัยที่ใช้เซนเซอร์อินฟราเรด

โดยทั่วไปเซนเซอร์อินฟราเรด จะส่งพัลส์อินฟราเรด ความถี่ประมาณ 40 กิโลเฮิร์ต [5] ร่วมกับอาร์เรย์ตรวจจับมุมซึ่งแสงสะท้อนกลับเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางไปยังวัตถุ ทำให้สามารถคำนวณระยะทางได้ ความยาวคลื่นที่ใช้โดยปกติ 880 นาโนเมตร เซนเซอร์อินฟราเรดได้รับความนิยมในการนำไปใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ เพื่อตรวจจับสิ่งกีดขวาง หรือเพื่อวัดระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์กับวัตถุ และพัฒนาอัลกอริทึมอัตโนมัติของหุ่นยนต์

Ruangpayoongsak และ Roth [6] พัฒนาอัลกอริทึมของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ ให้วิ่งตามเส้นทางที่กำหนด หากพบสิ่งกีดขวางหุ่นยนต์จะทำการหลบหลีกเพื่อป้องกันการชน โดยใช้เซนเซอร์อินฟราเรดร่วมกับเซนเซอร์อัลตราโซนิก เพื่อตรวจจับระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์และวัตถุที่กีดขวางเส้นทางการเคลื่อนที่ จากนั้นหุ่นยนต์จะทำการวางแผนเส้นทางและเคลื่อนที่อัตโนมัติไปยังเป้าหมายเดิมโดยใช้เส้นทางใหม่

Navarro et al. [7] ใช้เซนเซอร์อินฟราเรดสร้างแผนที่ด้วยโมเดลเส้นตรง เซนเซอร์ทั้งหมด 16 ตัวถูกติดตั้งไว้บนขอบของหุ่นยนต์เคลื่อนที่รูปทรงแปดเหลี่ยม ด้านละ 2 ตัว และหุ่นยนต์ทำการสร้างแผนที่บนทางเดินภายในอาคารที่มีความกว้างประมาณ 2 เมตร และยาวประมาณ 23 เมตร แผนที่ที่ได้จากข้อมูลดิบปรากฏแนวกำแพงและประตูห้องเป็นกลุ่มของจุด เมื่อนำมาประมวลผลโดยใช้วิธีแบ่งส่วนเส้นตรง (Line Segmentation) แล้วทำให้ได้เส้นขอบที่คมชัดมากขึ้น

2.3 งานวิจัยที่ใช้ภาพร่วมกับเซนเซอร์วัดระยะทาง

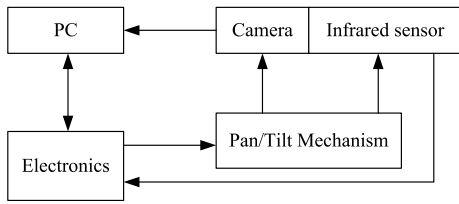
Sugimoto et al. [8] นำเสนอเทคนิคใหม่ ในการหาตำแหน่งสามมิติที่แม่นยำ โดยใช้กล้องร่วมกับคลื่นอัลตราซาวด์ กล้องยี่ห้อพอยท์เกรย์ (Point Gray) ที่มีความละเอียดภาพ 1328×1048 พิกเซล กล้องถูกติดตั้งไว้ใต้ตัวรับสัญญาณอัลตราโซนิก ส่วนตัวรับสัญญาณอัลตราโซนิก และตัวส่งแสงอินฟราเรดที่ใช้เป็นมาร์คเกอร์ โดยที่กล้องหยุดนิ่ง ทำให้ได้ข้อมูลภาพและระยะทางซึ่งนำมาคำนวณหาพิกัดของเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ โดยใช้วิธีการทำให้สอดคล้องของเฟสที่ขยาย (Extended Phase Accordance) เพื่อระบุตำแหน่งเป็นจุดหรือตำแหน่งเป้าหมายที่กำลังเคลื่อนที่ และชดเชยคุณสมบัติของเฟส (Phase Characteristics) ของทรานสดิวเซอร์อัลตราซาวด์ เพื่อให้การวัดระยะทางแม่นยำมากขึ้น เมื่อความเร็วของวัตถุ 1 เมตรต่อวินาที ค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นเพียง 1.66 มิลลิเมตร

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเซนเซอร์อัลตราโซนิกจะให้ความแม่นยำสูง แต่เมื่อเปรียบเทียบราคาทีใกล้เคียงกัน จะมีความว่องไวในการวัดระยะทางน้อยกว่าเซนเซอร์อินฟราเรด

3. อุปกรณ์การทดลองและวิธีการวิจัย

3.1 ระบบกล้องสำหรับติดตามวัตถุ

ต้นแบบระบบกล้องที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ กลไกควบคุมการเคลื่อนไหวของกล้อง กล้อง และเซนเซอร์อินฟราเรด ดังแสดงในรูปที่ 1 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยมีคุณสมบัติดังนี้ หน่วยประมวลผล Intel 3.30 GHz หน่วยความจำสำรอง 2 GB ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 7 32 บิต วงจรอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 และวงจรขับมอเตอร์ ส่วนกลไกควบคุมการเคลื่อนที่ของกล้อง ได้แก่ มอเตอร์ 2 ตัวสำหรับทิศทางแพน (ซ้ายขวา) และทิลท์ (บนล่าง) เป็นมอเตอร์กระแสตรง 12 โวลต์ 2 แอมแปร์ยี่ห้อ ZHENG รุ่น ZYTD-38SRZ ประกอบเข้ากับชุดเกียร์



รูปที่ 1 องค์ประกอบของระบบกล้อง

ทดความเร็ว 100 รอบต่อวินาที และเอ็นโค้ดเดอร์ 500 พัลส์ต่อวินาที ส่วนกล้องที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นกล้องเว็บแคมยี่ห้อ OKER มีความละเอียดภาพ 640×480 พิกเซล อัตราความเร็วภาพ 60 เฟรมต่อวินาที ส่วนเซนเซอร์อินฟราเรดที่เลือกใช้รุ่น SHARP GP2Y0A02YK [9] ซึ่งสามารถวัดระยะได้ในช่วง 20 ถึง 150 เซนติเมตร ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อกระหว่าง 0 ถึง 5 โวลต์

3.2 การหาตำแหน่งลูกบอลในภาพ

โมเดลสีเอชเอสวี (HSV) เป็นการแทนจุดในโมเดลอาร์จีบี (RGB) ด้วยพิกัดทรงกระบอก ซึ่งแยกแยะข้อมูลความเข้มของสี (Intensity/Value) ออกจากความมืดหรือความสว่างของสี (Hue) และการอิ่มตัว (Saturation) ซึ่งหมายถึงปริมาณของสีที่เชื่อมโยงกับการรับรู้ของมนุษย์ โมเดลสีเอชเอสวีถูกนำมาใช้เพื่อแยกแยะสีของวัตถุหรือลูกบอลออกจากพื้นหลัง ด้วยการตั้งค่าช่วงของสีที่เหมาะสม ภาพใหม่ถูกสร้างขึ้นโดยการแทนส่วนที่เป็นวัตถุและฉากพื้นหลังด้วยสีที่ต่างกัน และจุดศูนย์กลางวัตถุในภาพหาได้จากพื้นที่ที่เป็นสีของวัตถุ

3.3 การควบคุมมอเตอร์แพนและทิลท์

ทิศทางของมอเตอร์ถูกควบคุมด้วยผลลัพธ์จากการประมวลผลภาพ โดยเริ่มต้นจากการหาตำแหน่งลูกบอลในภาพในแนวแกนนอนและแกนตั้ง (P_h, P_v) จากนั้นเปรียบเทียบตำแหน่งกับตำแหน่งพิกเซลใจกลางเฟรม (P_{ch}, P_{cv}) หากจุดศูนย์กลางของลูกบอลไม่ได้อยู่ที่ใจกลางภาพ ผลต่างของพิกเซลจะเป็นค่าความผิดพลาดในแนวแกนนอนและแกนตั้งตามลำดับดังนี้

$$e_h = P_h - P_{ch} \quad (1)$$

$$e_v = P_v - P_{cv} \quad (2)$$

ค่าความผิดพลาดนี้ใช้กำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ที่ขั้วต่อแนวแพนและทิลท์ตามลำดับ สำหรับการควบคุมความเร็วมอเตอร์จะใช้สัญญาณ PWM สัญญาณให้มอเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตลอดระยะเวลาที่ทำการติดตามลูกบอล

3.4 การกรองสัญญาณเซนเซอร์

คาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter) เป็นฟิลเตอร์ที่ใช้การคำนวณแบบรีเคอร์ซีฟ (Recursive) ในการประมาณสเตต (State) ของระบบซึ่งลดค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดกำลังสอง ฟิลเตอร์ชนิดนี้มีประโยชน์อย่างมากในหลายด้าน ช่วยให้สามารถประมาณสเตตในอดีต ปัจจุบัน และแม้กระทั่งในอนาคต และยังสามารถทำงานได้เมื่อไม่รู้โมเดลของระบบที่แม่นยำ

ระบบกล้องที่สร้างขึ้นเป็นระบบในเวลาวิฤต สมการของคาลมานฟิลเตอร์วิฤต (Discrete Kalman Filter) [10] ได้แก่

$$\hat{x}_k^- = A \hat{x}_{k-1} \quad (3)$$

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q \quad (4)$$

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-) \quad (6)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (7)$$

โดยที่ ตัวแปรสเตตประมาณ (Estimated State)

$$\hat{x}_k = [\phi \ \dot{\phi} \ \varphi \ \dot{\varphi} \ d]^T \quad (8)$$

โดยที่ ϕ เป็นมุมแพนและ φ เป็นมุมทิลท์ ส่วน $\dot{\phi}$ และ $\dot{\varphi}$ เป็นความเร็วเชิงมุมของมุมแพนและทิลท์ตามลำดับ และ d เป็นระยะทางที่วัดได้ด้วยเซนเซอร์อินฟราเรด

เมตริกซ์การเปลี่ยนสเทต (State Transition Matrix)

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

เมื่อ T เป็นระยะเวลาของการเปลี่ยนสเทต และเมตริกซ์การสังเกต (Observation Matrix) ได้แก่

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

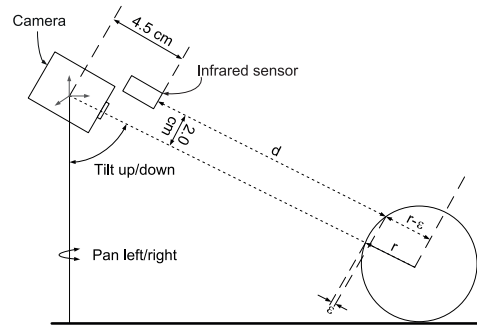
3.5 การหาพิกัดตำแหน่งลูกบอล

รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งของกล้องและพิกัดกล้อง ตำแหน่งของเซนเซอร์อินฟราเรดซึ่งติดตั้งไว้เหนือกล้อง 2 เซนติเมตร และตำแหน่งของลูกบอลซึ่งอยู่ห่างจากเซนเซอร์อินฟราเรดเป็นระยะทาง d

ตำแหน่งของลูกบอล จะอ้างอิงจากตำแหน่งของกล้อง โดยใช้มุมออยเลอร์ (Euler Angle) [11] เมื่อ R_{10} เป็นเมตริกซ์หมุนระหว่างเฟรมของกล้อง ไปในทิศทางของมุมแพน

$$R_{10} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ส่วน R_{21} เป็นเมตริกซ์หมุนจากเฟรมของมุมแพนไปในทิศทางของมุมทิลท์



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกล้อง เซนเซอร์อินฟราเรดและวัตถุ

$$R_{21} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

พิกัดจุดศูนย์กลางของลูกบอล P_0 บนเฟรมกล้องคำนวณได้จากพิกัดของลูกบอล บนเฟรมของเซนเซอร์อินฟราเรด (P)

$$P_0 = R_{21} * R_{10} * P \quad (13)$$

$$P = [x \ 0 \ 0]^T \quad (14)$$

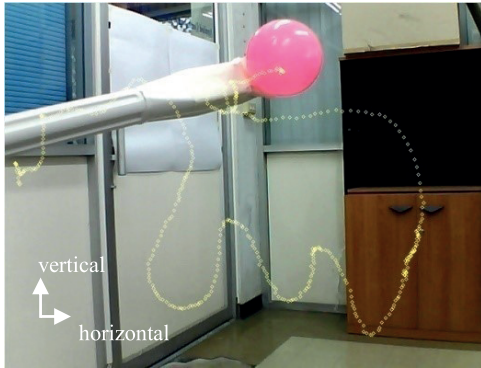
$$x = 4.5 + d + r - \epsilon \quad (15)$$

จากสมการข้างบนจะได้ว่าตำแหน่งของลูกบอลบนระนาบเป็นดังนี้

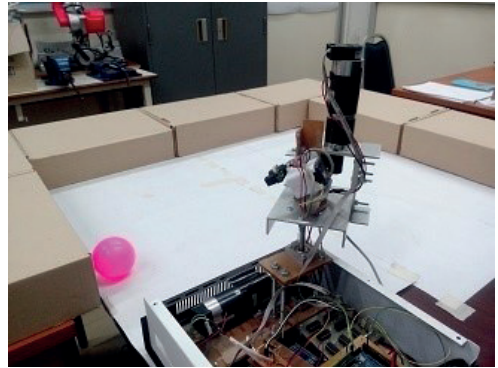
$$x_0 = x(\cos \varphi \cos \phi + \sin \varphi \sin \phi) \quad (16)$$

$$y_0 = -x(\sin \varphi \cos \phi + \cos \varphi \sin \phi) \quad (17)$$

โดยที่ r เป็นขนาดรัศมีของลูกบอล ในขณะที่ระยะห่าง ϵ แปรผันตาม r และ d ซึ่งในที่นี้สามารถมองข้าม ϵ ได้เนื่องจากระยะทาง d ยาวกว่า r มาก



รูปที่ 3 เส้นทางเคลื่อนที่ของลูกบอลภายในเฟรม กรณีที่กล้องหยุดนิ่ง



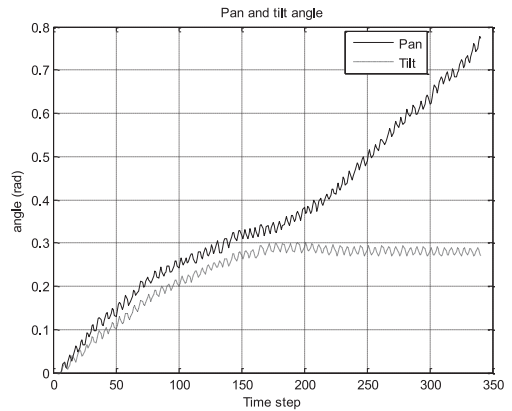
รูปที่ 4 ระบบกล้องและสนามทดลองติดตามลูกบอล

4. ผลการทดลอง

ในการประมวลผลภาพได้ใช้โปรแกรมโค้ดบล็อก (Code Blocks) ร่วมกับไลบรารีโอเพ่นซีวี (OpenCV) และวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB วัตถุที่ใช้เป็นลูกบอลพลาสติกสีชมพูซึ่งไม่ดูดซับแสงสะท้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร การทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกเป็นการทดสอบการประมวลผลภาพเมื่อกำลังหยุดนิ่ง ซึ่งยังไม่มีการส่งคำสั่งให้มอเตอร์ทำงาน และในส่วนที่สองเป็นการทดสอบการติดตามลูกบอล โดยป้อนตำแหน่งลูกบอลที่ได้จากการประมวลผลภาพกลับมาควบคุมระบบกล้อง

4.1 ผลการติดตามวัตถุในกรณีที่กล้องหยุดนิ่ง

ในขณะที่กล้องหยุดนิ่ง แต่วัตถุกำลังเคลื่อนที่ภายในเฟรม จากภาพถ่ายที่ต่อเนื่องกันจะสามารถหาตำแหน่งของวัตถุในภาพแต่ละภาพ และเมื่อนำตำแหน่งของแต่ละภาพมาเรียงต่อกัน จะได้เส้นทางเคลื่อนที่ของวัตถุดังแสดงในรูปที่ 3 จุดสีเหลืองในภาพแสดงเส้นทางเคลื่อนที่ของลูกบอล จุดที่ต่อกันและห่างออกจากกัน แสดงให้เห็นว่าลูกบอลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่คงที่ ส่วนบริเวณที่เป็นสีเหลืองที่บ่งชี้แสดงว่าลูกบอลเคลื่อนที่ช้าหรือหยุดนิ่ง ตำแหน่งของลูกบอลในภาพเหล่านี้ถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมระบบกล้องต่อไป

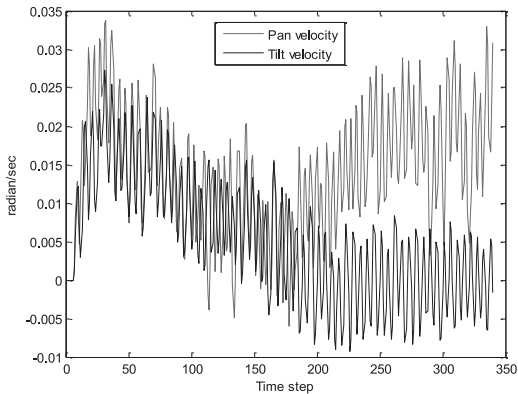


รูปที่ 5 มุมของจุดข้อต่อแพนและทิลท์

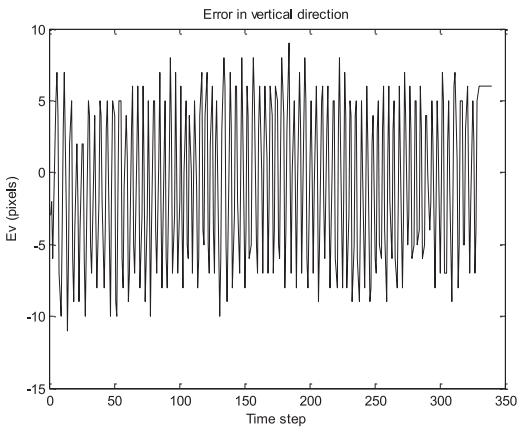
4.2 ผลการติดตามวัตถุในกรณีที่กล้องเคลื่อนไหว

เมื่อทำการเคลื่อนย้ายลูกบอล ตามเส้นทางรูปตัวอักษรแอล (L) ขนาดกว้าง 45 และยาว 90 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 4 ด้วยความเร็วประมาณ 1 เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อทำการวัดมุมของข้อต่อ (Joint) ด้วยเอนโค้ดเดอร์ที่มีความถี่ 6.25 เฮอร์ตซ์ ข้อต่อแพนและทิลท์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมและความเร็วเชิงมุมที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

ในรูปที่ 5 มุมแพนเริ่มต้นที่ศูนย์เรเดียนไปจนถึงประมาณ 0.78 เรเดียน ในขณะที่มุมทิลท์หมุนไปจนถึงประมาณ 0.28 เรเดียน กราฟที่ได้แสดงการขยับของมอเตอร์ไปมา ส่วนในรูปที่ 6 ความเร็วเชิงมุมของทั้งสองแกนมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความเร็วของลูกบอล

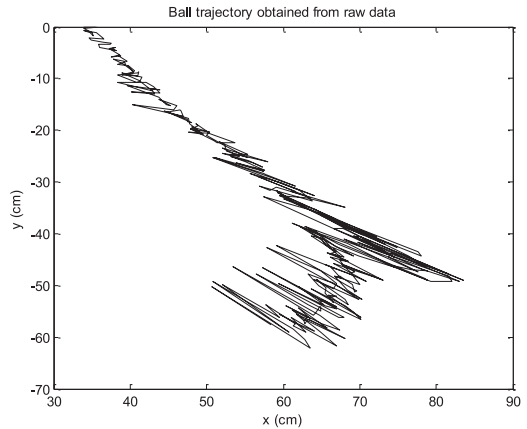


รูปที่ 6 ความเร็วเชิงมุมของจุดข้อต่อแพนและทิลท์

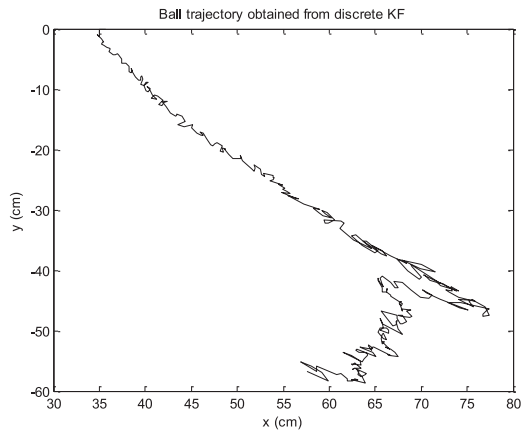


รูปที่ 7 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งลูกบอล จากพิกเซล
 ใจกลางภาพในแนวแกนตั้ง เมื่อวัตถุอยู่ห่างจาก
 กล้องในช่วง 28-78 เซนติเมตร

ที่ถูกรับด้วยมือไม้คงที่ ในช่วงเริ่มต้นจนถึงประมาณ
 ช่วงเวลา (Time Step) ที่ 175 ความเร็วในทั้งสองแกน
 ไกล่เคียงกัน หลังจากนั้นความเร็วในแนวแกนทิลท์ต่ำลง
 อยู่ระหว่าง -0.008 กับ 0.006 เรเดียนวินาที ซึ่งสอดคล้องกับ
 กราฟของมุมทิลท์ในรูปที่ 5 ในขณะที่เดียวกันกับที่มุมทิลท์
 ก่อนข้างคงที่อยู่ที่ 0.28 เรเดียน ค่าความผิดพลาดในแนวตั้ง
 แสดงจากสมการที่ (2) แสดงในรูปที่ 7 อยู่ในช่วงประมาณ
 8 พิกเซล ส่วนค่าความผิดพลาดในแนวนอน มีลักษณะ
 เดียวกันอยู่ในช่วงประมาณ 12 พิกเซล โดยค่าความ
 ผิดพลาดจะไม่แปรผันตามระยะทาง กล่าวคือที่ตำแหน่ง

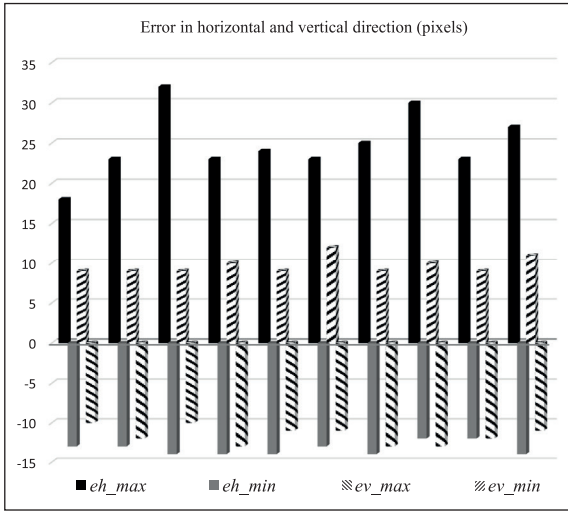


รูปที่ 8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของลูกบอลจากข้อมูลดิบ



รูปที่ 9 เส้นทางการเคลื่อนที่ของลูกบอลจากข้อมูลที่
 กรองสัญญาณแล้วได้เส้นทางการเคลื่อนที่ชัดเจน

ระยะทางเท่ากันอาจเกิดค่าความผิดพลาดแตกต่างกันได้
 และแม้ระยะทางจะไกลหรือใกล้ก็ตาม ค่าความผิดพลาด
 จะยังคงอยู่ในช่วงพิกเซลดังกล่าว นอกจากนี้ รูปที่ 5-7
 ยังแสดงผลกระทบจากระยะเวลาการป้อนกลับที่เกิดการ
 หน่วง (Delay) ซึ่งทำให้เกิดการแกว่งของจุดข้อต่อ โดยมี
 ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาหน่วงเฉลี่ยประมาณ 0.156 วินาที
 รูปที่ 8 และ 9 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของ
 ลูกบอลบนระนาบมีรูปร่างเป็นตัวอักษรแอล เมื่อคำนวณ
 จากข้อมูลดิบและข้อมูลที่กรองสัญญาณแล้วตามลำดับ
 เส้นทางการที่ได้จากข้อมูลดิบ มีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก



รูปที่ 10 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งลูกบอลจากพิกเซลใจกลางภาพ จากการทดลอง 10 ครั้ง

ทำให้เห็นเส้นทางการเคลื่อนที่ไม่ชัด หลังจากทำการกรองสัญญาณด้วยฟิลเตอร์คาลมาน ทำให้ได้เส้นทางการเคลื่อนที่ที่มีความชัดเจน โดยค่าของ Q และ R เท่ากับ 0.022 และ 0.417 ตามลำดับ

รูปที่ 10 แสดงค่าความผิดพลาดสูงสุดและต่ำสุดในแนวแกนตั้ง ($e_{h,max}/e_{h,min}$) พร้อมทั้งค่าความผิดพลาดสูงสุดและต่ำสุดในแนวแกนนอน ($e_{v,max}/e_{v,min}$) เมื่อทำการทดลองติดตามวัตถุซ้ำ 10 ครั้ง และเมื่อหาค่าทางสถิติจากการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าระบบติดตามวัตถุที่สร้างขึ้น มีค่าความผิดพลาดและความแปรปรวนในแนวแกนนอนสูงกว่าในแนวแกนตั้ง ซึ่งยังไม่ทราบสาเหตุแน่ชัด

ตารางที่ 1 ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และ ค่าเฉลี่ย และค่าความเบี่ยงเบนของค่าความผิดพลาด

Data Stat.	$e_{h,max}$ (pixels)	$e_{h,min}$ (pixels)	$e_{v,max}$ (pixels)	$e_{v,min}$ (pixels)
Max	32	-12	12	-10
Min	18	-14	9	-13
Avg	24.8	-13.3	9.7	-11.6
Std	3.99	0.82	1.06	1.17

5. อภิปรายผลและสรุป

บทความนี้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการติดตามวัตถุเคลื่อนที่บนระนาบด้วยภาพและระยะทาง โดยได้สร้างระบบกล้องขึ้น เพื่อทำการทดลองทดสอบการติดตามวัตถุทรงกลมบนระนาบ และใช้ลูกบอลสีเป็นวัตถุ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบกล้องสามารถติดตามการเคลื่อนที่โดยรักษาตำแหน่งของวัตถุให้อยู่ใจกลางภาพได้สำเร็จ ในขณะที่การกรองข้อมูลระยะทางด้วยฟิลเตอร์คาลมานสามารถช่วยลดสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ได้เส้นทางการเคลื่อนที่ที่ชัดเจน ซึ่งแม้ว่าวิธีนี้สามารถติดตามวัตถุได้ภายในระยะการวัดระยะทางของเซนเซอร์อินฟราเรด [9] อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับวัตถุที่เคลื่อนที่ที่มีความเร็วต่ำบนระนาบได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อติดตามวัตถุที่มีรูปร่างต่างๆ ได้โดยอาจพัฒนาในส่วนของหาราค่าตำแหน่งวัตถุในภาพเพิ่มเติม เทคนิคการติดตามวัตถุที่นำเสนอ ต้องการการควบคุมที่มีความรวดเร็วสูง เพราะจำเป็นที่จะต้องรักษาตำแหน่งของวัตถุให้อยู่ใจกลางภาพตลอดเวลา ในทางกลับกันระบบได้รับผลกระทบจากระยะเวลาการป้อนกลับที่เกิดการหน่วง งานที่จะดำเนินการต่อไป ได้แก่ การเพิ่มขีดความสามารถของตัวควบคุม ให้สามารถชดเชยเวลาหน่วง และติดตามวัตถุที่มีรูปร่างต่างๆ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สัญญาเลขที่ KMUTNB-NEW-56-02 นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเครื่องมือกล ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต ที่ให้ความเอื้อเฟื้อเครื่องมือต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, "A Tutorial on Visual Servo Control," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*,



- vol. 12, no. 5, pp. 651-670, October 1996.
- [2] F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual Servo Control Part II: Advanced Approaches," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pp. 109-118, March 2007.
- [3] S. A. A. Kareem, M. Rizah, and A. Rini, "Fuzzy Control Algorithm for Educational Light Tracking System," in *The 2nd International Congress on Engineering Education*, December 8-9, 2010, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 22-27.
- [4] B. Browing and D. Govindaraju, *Fast, Robust Techniques for Colored Object Detection in Variable Lighting Conditions*, United State Army, 2003.
- [5] T. Braeunl, *Embedded Robotics*, Springer-Verlag, 2008, p. 56.
- [6] N. Ruangpayoongsak and H. Roth, "Path Following in unknown environment for A Car-Like Mobile Robot," in *International Conference on Infomatics in Control, Automation, and Robotics*, Barcelona, Spain, September 14-17, 2005, pp. 455-458.
- [7] D. Navarro, G. Benet, and F. Blanes, "Line-Based Incremental Map Building Using Infrared Sensor Ring," in *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 15-18 September 2008, pp. 833-838.
- [8] M. Sugimoto, N. Kanie, S. Nakamura, and H. Hashizume, "An Accurate 3D Localization Technique using a Single Camera and Ultrasound," in *International Convergence on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 13-15th November 2012.
- [9] SHARP. (2013, Nov 14). [Online]. Available: http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a02_e.pdf
- [10] G. Welch and G. Bishop, *An Introduction to the Kalman Filter*, UNC-Chapel Hill, TR 95-041, April 5, 2004.
- [11] Weisstein, Eric W. (2013, Nov. 6). [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/EulerAngles.html>