

การพัฒนาหุ่นยนต์สำรวจแบบกึ่งอัตโนมัติบนโยโยแพลตฟอร์ม

A Semi-automatic Exploratory Robot Development on IOIO Platform

กฤษฎดา ชันกสิกรรม* และยศวัฒน์ พิลาก้อย

สาขาวิชาคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

*Email: KrisdaK@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเสนอการประดิษฐ์และการควบคุมหุ่นยนต์สำรวจกึ่งอัตโนมัติบนโยโยแพลตฟอร์ม ขั้นตอนการประดิษฐ์หุ่นยนต์นั้นดำเนินการบนโยโยแพลตฟอร์มซึ่งประกอบไปด้วยโยโยอาร์เอบี โยโยคิว และมินิทีบีหกหกหนึ่งสอง ในส่วนของขั้นตอนการควบคุมหุ่นยนต์นั้นดำเนินการโดยพัฒนาโมบายล์แอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ กระบวนการดำเนินโครงการวิจัยมีสี่ขั้นตอนประกอบด้วย ขั้นตอนการออกแบบส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของหุ่นยนต์ ขั้นตอนการประดิษฐ์ส่วนเมคคานิกส์ของหุ่นยนต์สำรวจกึ่งอัตโนมัติ ขั้นตอนการพัฒนาโมบายล์แอปพลิเคชันเพื่อควบคุมหุ่นยนต์ และขั้นตอนการทดสอบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของหุ่นยนต์ ในส่วนของขั้นตอนการทดสอบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของหุ่นยนต์นั้นแบ่งเป็นสามขั้นตอนประกอบด้วย การทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงปริมาณซึ่งดำเนินการทดสอบบนอุปกรณ์หลากหลายรูปแบบประกอบด้วย พื้นที่ราบ พื้นที่ต่างระดับ พื้นที่ขรุขระ และพื้นที่ลาดชัน บนสภาพแวดล้อมแบบปิดและแบบเปิด การทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงคุณภาพดำเนินการทดสอบโดยใช้แบบประเมินระดับความรู้สึกรองเท้าของอาสาสมัครผู้เข้าร่วมทดสอบการควบคุมหุ่นยนต์ในหลายปัจจัย และการทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์นั้นดำเนินการทดสอบโดยผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งานทั่วไปผ่านวิธีการทดสอบซอฟต์แวร์แบบกล่องดำ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์สำรวจแบบกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้นบนโยโยแพลตฟอร์มและซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์สำรวจแบบกึ่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นในรูปแบบโมบายล์แอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์นั้นสามารถนำไปใช้งานได้เหมาะสม

คำสำคัญ: หุ่นยนต์สำรวจกึ่งอัตโนมัติ โยโยแพลตฟอร์ม โมบายล์แอปพลิเคชัน

Abstract

This research paper aims to propose the invention and control of a semi-automatic exploratory robot which based-on IOIO (called YOYO) platform. The invention phase is performed on IOIO platform which consisting of IOIO-RAB, IOIO-Q and MiniTB6612. The control phase is carried on the development of mobile application on Android operating systems. The research methodology comprise of four step including the robot electronic part design step, the mechanic part of semi-automatic exploratory robot invention step, the mobile application development for robot controlling step and the testing of robot hardware and software step. Regarding to the testing of robot hardware and software step, it can be divided into three stages. The first stage is robot hardware testing using quantitative approach which the experiments are performed on various objections area including plain, different level, knobbed and steep area. The second stage is robot hardware testing using qualitative approach which the experiments are carried out by using questionnaires to evaluate the contentment of user in various factors. The last testing stage, the testing of robot control software, is performed by using Black Box software testing which evaluated by specialist and users. The experimental results show that our semi-automatic exploratory robot on IOIO platform and the robot control application on Android operating systems can be used properly.

Keyword: Semi-automatic exploratory robot, IOIO platform, Mobile application

บทนำ

หุ่นยนต์ คือเครื่องจักรที่สามารถทำงานแทนมนุษย์โดยถูกออกแบบให้สามารถตั้งลำดับการทำงาน ตลอดจนสามารถเคลื่อนที่ได้หลากหลายรูปแบบตามที่ตั้งลำดับการทำงาน (Soares Joao, Vale Alberto and Ventura Rodrigo, 2015) เดิมทีความรู้ด้านวิทยาการหุ่นยนต์นั้นได้รับความสนใจในเฉพาะห้องปฏิบัติการด้านวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมไฟฟ้า และวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์เท่านั้น จนเมื่อวิทยาการด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศมีความก้าวหน้าในอัตราที่รวดเร็วอย่างคาดไม่ถึงจนอุตสาหกรรมไอทีด้านวิทยาการความรู้ของโลกให้หมุนไปข้างหน้าอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้วิทยาการหลายแขนงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างเป็นรูปธรรมในชีวิตประจำวัน (Lee Min-Fan Ricky, Li Ying-Chi and Chien Ming-Yen, 2015) ความรู้ด้านวิทยาการหุ่นยนต์ก็เป็นหนึ่งแขนงวิชาความรู้ที่ได้รับความนิยมในการศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้งานด้วยเช่นกัน ในปัจจุบันความรู้ด้านวิทยาการหุ่นยนต์มิได้เป็นวิทยาการที่จัดการเรียนการสอนเฉพาะระดับอุดมศึกษาเพียงอย่างเดียวอีกแล้ว สถาบันการศึกษาระดับประถมและมัธยมศึกษาหลายแห่งได้บรรจุรายวิชาด้านวิทยาการหุ่นยนต์ระดับเบื้องต้นไว้ในหลักสูตร ส่งผลให้ความต้องการในการใช้งานหุ่นยนต์เพื่อประกอบหลักสูตรการศึกษาเพิ่มสูงขึ้นเป็นเงาตามตัว หุ่นยนต์ที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ประกอบการศึกษาในชั้นเรียนนั้นเป็นชุดหุ่นยนต์สำเร็จรูปเพื่อการศึกษา โดยส่วนใหญ่แล้วชุดหุ่นยนต์สำเร็จรูป

ดังกล่าวนี้เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาสูงเพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และยังขาดความยืดหยุ่นในการใช้งานโดยมีลักษณะโครงสร้างลำตัวที่กำหนดไว้ตายตัวไม่สามารถปรับเปลี่ยนหรือติดตั้งอุปกรณ์ที่ต้องการเพิ่มเติมในภายหลังได้ รวมถึงซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการโปรแกรมเพื่อควบคุมหุ่นยนต์นั้นก็ต้องเป็นซอฟต์แวร์เฉพาะด้านของชุดหุ่นยนต์สำเร็จรูปนั้นๆ เท่านั้น ซอฟต์แวร์ดังกล่าวนี้ไม่สามารถถูกปรับเปลี่ยนหรือแก้ไขเพื่อการใช้งานเฉพาะทางได้ ซึ่งหากมีการเปลี่ยนไปใช้ชุดหุ่นยนต์สำเร็จรูปอื่น ผู้ใช้งานจำเป็นต้องศึกษาวิธีการโปรแกรมซอฟต์แวร์ชนิดใหม่อยู่เรื่อยไป

จากปัญหาดังกล่าว ผู้ดำเนินโครงการวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์ที่สามารถกำจัดข้อจำกัดของชุดหุ่นยนต์สำเร็จรูปเพื่อใช้ประกอบการศึกษาด้านวิทยาการหุ่นยนต์ในระดับอุดมศึกษา โดยภาพรวมนั้นการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์มีองค์ประกอบที่ต้องพิจารณาสามส่วน ประกอบด้วย ส่วนของเมคานิกส์ ส่วนของอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้สั่งงานเพื่อการควบคุมหุ่นยนต์

ในส่วนเมคานิกส์เปรียบเสมือนกับลำตัวและอวัยวะของหุ่นยนต์ หากเปรียบเทียบกับมนุษย์ส่วนของเมคานิกส์นี้ก็ถือกายหยาบนั่นเอง เมคานิกส์ของหุ่นยนต์จะประกอบขึ้นจากอุปกรณ์และกลไกต่างๆ ตามความสามารถเฉพาะตัวของหุ่นยนต์ ในงานวิจัยฉบับนี้ผู้เขียนเลือกที่จะพัฒนาเมคานิกส์ของหุ่นยนต์สำรวจที่สามารถเคลื่อนที่บนบกเนื่องจากเป็นหุ่นยนต์ประเภทที่ได้รับความนิยมนำมาใช้จัดการเรียนการสอนในระดับอุดมศึกษา อีกทั้งยังมีความทนทาน และมีราคาถูกมากกว่าหุ่นยนต์สำรวจที่เคลื่อนที่ทางน้ำ และหุ่นยนต์สำรวจเคลื่อนที่ทางอากาศอีกด้วย โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ในการประดิษฐ์ส่วนเมคานิกส์ของหุ่นยนต์นั้นผู้วิจัยจะกล่าวถึงในหัวข้อวิธีดำเนินการวิจัย

ในส่วนอิเล็กทรอนิกส์เปรียบเสมือนสมองของหุ่นยนต์ ทำหน้าที่รับคำสั่งและแปรผลของคำสั่งนั้นเป็นการแสดงออกของหุ่นยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของหุ่นยนต์นั้นอยู่ในรูปแบบของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller board) ที่มีหลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้งาน ในส่วนของการเลือกใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าวนี้ได้มีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างหุ่นยนต์สำรวจและหุ่นยนต์กู้ภัยหลายผลงานที่ส่งผลให้ผู้เขียนสามารถสรุปได้ว่าการสร้างหุ่นยนต์บนโยโยแพลตฟอร์มนั้นให้ความคุ้มค่าในแง่มุมมองต้นทุนที่ต้องใช้ความทนทานของหุ่นยนต์ และความยืดหยุ่นในการออกแบบหุ่นยนต์ โดย Stefan Kohlbrecher et al. (2015) ได้พัฒนาทีมหุ่นยนต์สำรวจและกู้ภัยเพื่อเข้าร่วมการแข่งขัน The 2013 DARPA Robotics Challenge Trials ในนามของทีม ViGIR และหุ่นยนต์ที่ทำหน้าที่สำรวจในทีมนี้ถูกพัฒนาขึ้นบนโยโยแพลตฟอร์ม นอกจากนี้ Tyler Gunn and John Anderson (2015) ได้แสดงผลงานวิจัยด้านการพัฒนาทีมหุ่นยนต์สำรวจและกู้ภัยผ่านบทความ "Dynamic heterogeneous team formation for robotic urban search and rescue" นักวิจัยทั้งสองท่านได้สรุปผลการทดลองว่าหุ่นยนต์สำรวจบนโยโยแพลตฟอร์มนั้นมีจุดเด่นที่สามารถลดขนาดให้เล็กลงได้มากจึงสะดวกแก่การควบคุมและเคลื่อนที่ อีกทั้งยังมีระยะเวลาการควบคุมแบบไร้สายที่เพียงพอต่อการปฏิบัติหน้าที่หุ่นยนต์สำรวจอีกด้วย นอกจากงานวิจัยจากสองทีมงานที่นำไปเสนอไปแล้วยังมีผลงานวิจัยอื่นที่สนับสนุนการสร้างหุ่นยนต์บนโยโยแพลตฟอร์มดังนี้ Cully Antoine et al. (2015) ได้พัฒนาหุ่นยนต์บนโยโยแพลตฟอร์มที่มีความสามารถในการเคลื่อนไหวได้เหมือนสัตว์ Hiroyaka Komura, Hiroya Yamada and Shigeo Hirose (2015) ได้พัฒนาหุ่นยนต์บนโยโยแพลตฟอร์มที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้เหมือนสัตว์เลื้อยคลานประเภทงู Yang Pan et al. (2016) พัฒนาหุ่นยนต์

гүййเค่ล่่อนที่หกดบนโยบายแพลทฟอร์ม เพ่อใช้แกระรอยในการติดตามมนุษย์ที่กำลังหลงทาง Ashish Macwan et al. (2016) ได้พัฒนาหุ่นยนต์สำรวจนโยบายแพลทฟอร์มเพ่อการสำรวจและгүййในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงอันตรายสูง เป็นต้น นโยบายแพลทฟอร์มนั้นเป็นแพลทฟอร์มที่มีความยืดหยุ่นสูง มีบอร์ทดควบคุมที่สามารถนำมาเชื่อมต่อในรูปแบบของอุปกรณ์ต่อพ่วงได้หลากหลายชนิด รายละเอียดของบอร์ทดควบคุมในการประดิษฐ์ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของหุ่นยนต์นั้นผู้วิจัยจะกล่าวถึงในหัวข้อวิธีดำเนินการวิจัย

ในส่วนสุดท้ายซึ่งเป็นส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้ส่งงานเพ่อการควบคุมหุ่นยนต์นั้น ในปัจจุบันกลุ่มนักวิจัยผู้พัฒนาหุ่นยนต์มีแนวโน้มที่จะเลือกพัฒนาซอฟต์แวร์เพ่อการควบคุมหุ่นยนต์ในรูปแบบของโมบายล์แอปพลิเคชัน เนื่องจากการใช้งานอุปกรณ์แบบโมบายล์ซึ่งประกอบด้วยสมาร์ทโฟนและแทปเล็ตนั้นมื่อตราการใช้งานซึ่งเติบโตอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีซอฟต์แวร์ที่สนับสนุนการพัฒนาโมบายล์แอปพลิเคชันที่มีความสามารถสูงและมีจำนวนการใช้งานให้เลือกได้อย่างหลากหลายประเภท ในงานวิจัยของ Arie Sheinker et al. (2016) และ Ahmadzadeh Hossein, Masehian Ellips and Asadpour Masoud (2016) ได้เลือกใช้การพัฒนาซอฟต์แวร์เพ่อควบคุมหุ่นยนต์ในรูปแบบของโมบายล์แอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android operating systems) ผ่านเครื่องมือที่ชื่อว่าแอนดรอยด์เอสดีเค (Android SDK) ซึ่งซอฟต์แวร์ในรูปแบบโมบายล์แอปพลิเคชันดังกล่าวให้ผลลัพธ์ในการควบคุมที่แม่นยำมีประสิทธิภาพ ในสภาพแวดล้อมการควบคุมแบบไร้สาย อีกทั้งสถาปัตยกรรมของสมาร์ทโฟนและแทปเล็ตนั้นยังเอื้ออำนวยต่อการควบคุมหุ่นยนต์สำรวจอีกด้วย รายละเอียดของการสร้างซอฟต์แวร์เพ่อควบคุมหุ่นยนต์แบบไร้สายนั้นผู้วิจัยจะกล่าวถึงในหัวข้อวิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย

ในส่วนของขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัยนั้นผู้เขียนได้แบ่งการดำเนินงานออกเป็นสี่ขั้นตอนประกอบด้วย ขั้นตอนการออกแบบส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของหุ่นยนต์ ขั้นตอนการประดิษฐ์ส่วนเมคานิกส์ของหุ่นยนต์สำรวจกิ่งอัตโนมัติ ขั้นตอนการพัฒนาโมบายล์แอปพลิเคชันเพ่อควบคุมหุ่นยนต์ และขั้นตอนการทดสอบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของหุ่นยนต์ โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

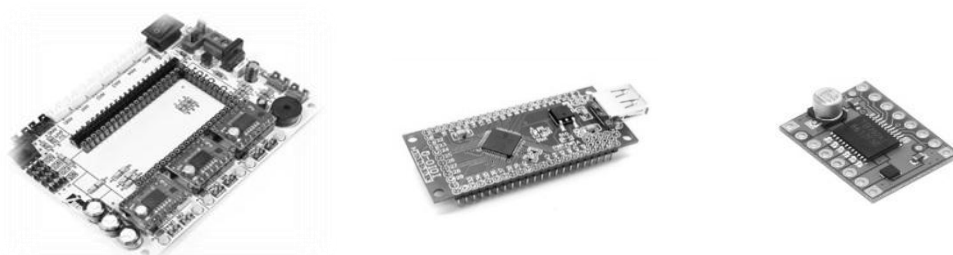
1. การออกแบบส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของหุ่นยนต์

ในขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบในส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ดำเนินโครงการวิจัยทำการศึกษาสถาปัตยกรรมของบอร์ทดควบคุมโยโยอาร์เอบี (IOIO-RAB) โยโยคิว (IOIO-Q) และมินิทีบีหกหกหนึ่งสอง (MiniTB6612) โดยบอร์ทดควบคุมแต่ละตัวมีรายละเอียดดังนี้

บอร์ทดควบคุมโยโยอาเอบี (รูปที่ 1) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทไอเน็กซ์ (i-Nex) มีลักษณะเป็นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกออกแบบให้ทำหน้าที่เป็นบอร์ทดควบคุมหลัก (Main controlling board) โดยสามารถทำงานร่วมกับบอร์ทดควบคุมบนแพลทฟอร์มโยโยได้หลายรุ่น ลักษณะเด่นของบอร์ทดควบคุมโยโยอาเอบีคือมีจุดเชื่อมต่อต่อตรวจจับประเภทแอนะล็อก (Analog sensor) จำนวน 8 จุด จุดต่อเชื่อมกับเซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) จำนวน 4 จุด จุดเชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจำนวน 6 จุด (โดยผ่านการขยายของบอร์ทดควบคุมมินิทีบีหกหกหนึ่งสอง) โดยรองรับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง +3.3 โวลต์

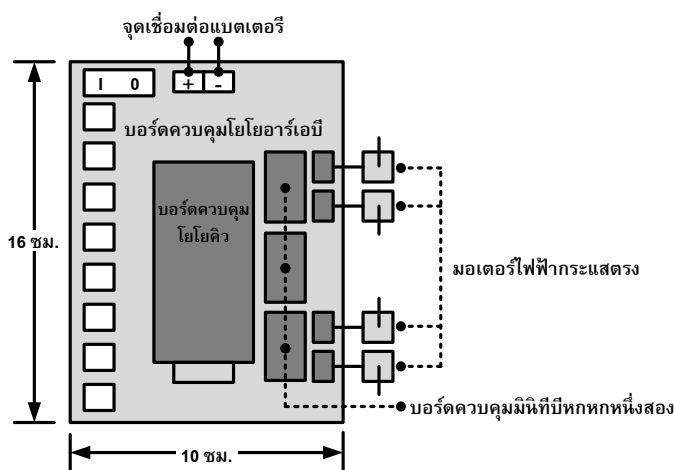
บอร์ดควบคุมโยโย่คิว (รูปที่ 1) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัทไอเน็กซ์ (i-Nex) เช่นเดียวกับบอร์ดควบคุมโยโย่อาร์เอบี มีความสามารถในการสื่อสารกับฮาร์ดแวร์ที่ติดตั้งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ ดังนั้นการจะควบคุมหุ่นยนต์ผ่านแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์นั้นจำเป็นต้องต่อเชื่อมบอร์ดควบคุมโยโย่คิวเข้ากับบอร์ดควบคุมโยโย่อาร์เอบีเพื่อขยายขีดความสามารถด้านการสื่อสารกับอุปกรณ์ที่ใช้งานระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เสียก่อน บอร์ดควบคุมโยโย่คิวนั้นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์พีไอซีหมายเลขสองสี่เอฟเจหนึ่งสองแปด (PIC24FJ182 Microcontroller) ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าวนี้มีความสามารถในการเชื่อมต่อกับระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ผ่านสัญญาณบลูทูธ

บอร์ดควบคุมมินิทีบีหกหกหนึ่งสอง (รูปที่ 1) คือแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทำหน้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็ก ซึ่งส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ทำงานได้คือ ไอซีหมายเลขทีบีหกหกหนึ่งสองเอฟเอ็นจีของบริษัทโตชิบา บอร์ดควบคุมนี้ผลิตโดยบริษัทโพลูลู (Pololu)



รูปที่ 1 บอร์ดควบคุมโยโย่อาร์เอบี โยโย่คิว และมินิทีบีหกหกหนึ่งสอง ตามลำดับ

เมื่อได้ทราบถึงสถาปัตยกรรมและขอบเขตความสามารถของบอร์ดควบคุมดังกล่าวแล้ว ผู้ดำเนินโครงการวิจัยจึงได้ออกแบบส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของหุ่นยนต์ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของหุ่นยนต์

2. การประดิษฐ์ส่วนเมคคานิกส์ของหุ่นยนต์สำรวจกิ่งอัตโนมัติ

หลังจากที่ออกแบบส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของหุ่นยนต์เรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนนี้คือการรวบรวมและประยุกต์ใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปนำมาประดิษฐ์เป็นส่วนเมคคานิกส์ของหุ่นยนต์ ชิ้นส่วนดังกล่าวเป็นชิ้นส่วนพื้นฐานประกอบด้วย แผ่นอลูมิเนียมเจาะรูสำเร็จรูป มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง รางถ่าน AAA ขนาด 6 ก้อน ชิ้นส่วนตัวต่อพลาสติกสำเร็จรูป และ ล้อยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร โดยมีขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ตัดแผ่นอลูมิเนียมเอนกประสงค์ให้มีขนาดยาว 16 เซนติเมตร และกว้าง 10 เซนติเมตร ลำดับถัดไปติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจำนวน 4 ตัว ที่บริเวณมุมทั้ง 4 ของแผ่นอลูมิเนียมเอนกประสงค์ จากนั้นติดตั้งล้อยางเข้ากับแกนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 3



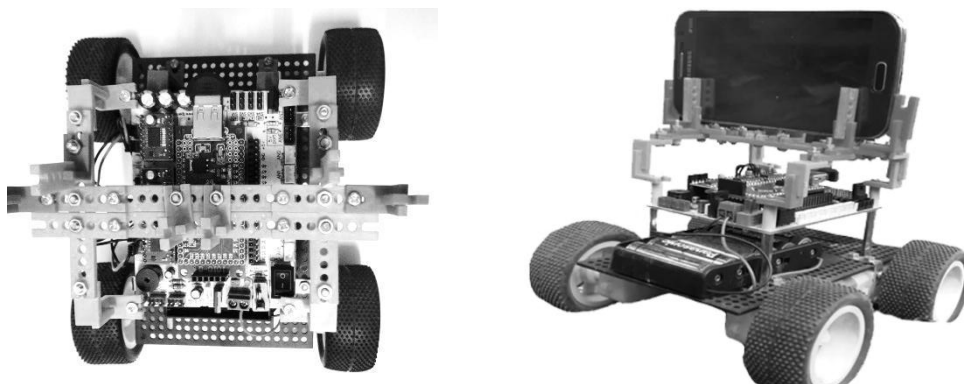
รูปที่ 3 การประดิษฐ์ส่วนเมคคานิกส์ของหุ่นยนต์สำรวจกิ่งอัตโนมัติขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 2 นำรางถ่านมาติดตั้งกับอลูมิเนียมเอนกประสงค์ ถัดไปนำบอร์ดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมินิที่บีหกหกหนึ่งสองและบอร์ดควบคุมโยโย่คิว มาติดตั้งเข้ากับบอร์ดควบคุมโยโย่อาเอบี จากนั้นนำลูทริยูเอสบีมาติดตั้งกับบอร์ดควบคุมโยโย่คิว ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การประดิษฐ์ส่วนเมคคานิกส์ของหุ่นยนต์สำรวจกิ่งอัตโนมัติขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบฐานติดตั้งสมาร์ทโฟนเพื่อใช้งานกล้องถ่ายวิดีโอ โดยวัดระยะให้มีขนาดพอดีกับสมาร์ทโฟนรุ่นที่เลือกใช้ จากนั้นประดิษฐ์ฐานติดตั้งจากชิ้นส่วนตัวต่อสำเร็จรูปให้มีขนาดตามที่ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การประดิษฐ์ส่วนเมคคานิกส์ของหุ่นยนต์สำรวจกิ่งอัตโนมัติขั้นตอนที่ 3

หลังจากที่ประดิษฐ์ส่วนเมคคานิกส์ของหุ่นยนต์สำรวจเรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปเป็นการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อควบคุมหุ่นยนต์ดังกล่าว โดยผู้เขียนเลือกที่จะพัฒนาซอฟต์แวร์ในรูปแบบของแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เพื่อใช้สมาร์ทโฟนในการควบคุมบังคับหุ่นยนต์ ซึ่งรายละเอียดจะถูกกล่าวถึงในขั้นตอนถัดไป

3. การพัฒนาโมบายล์แอปพลิเคชันเพื่อควบคุมหุ่นยนต์

ในขั้นตอนนี้ผู้ดำเนินโครงการวิจัยเลือกใช้ โฟลว์ชาร์ท (Flow chart) และยูสเคสไดอะแกรม (Used case diagram) ในการออกแบบซอฟต์แวร์ เมื่อผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบโฟลว์ชาร์ทและยูสเคสไดอะแกรมดังกล่าวแล้ว จึงดำเนินการพัฒนาซอฟต์แวร์ให้มีลำดับการทำงานสอดคล้องกับโฟลว์ชาร์ท และความสามารถในการทำงานที่สอดคล้องกับยูสเคสไดอะแกรม ผู้ดำเนินโครงการวิจัยเลือกพัฒนาซอฟต์แวร์บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์โดยใช้แอนดรอยด์เอสดีเค (Android SDK) เป็นเครื่องมือในการเขียนโปรแกรม โดยซอฟต์แวร์เพื่อควบคุมหุ่นยนต์ในรูปแบบแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ที่สร้างขึ้นนั้นแสดงดังรูปที่ 6



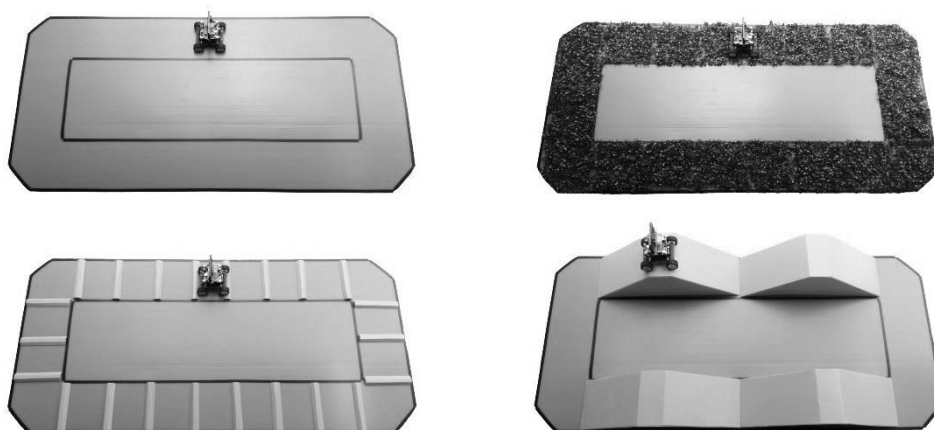
รูปที่ 6 ซอฟต์แวร์เพื่อควบคุมหุ่นยนต์ของโครงการวิจัย

เมื่อพัฒนาสามส่วนประกอบหลักของหุ่นยนต์สำรวจกึ่งอัตโนมัติเป็นซึ่งประกอบด้วย ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ของหุ่นยนต์ ส่วนเมคคานิกส์ของหุ่นยนต์ และส่วนซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปจะกล่าวถึงการทดสอบหุ่นยนต์สำรวจและซอฟต์แวร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4. การทดสอบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของหุ่นยนต์

ในขั้นตอนสุดท้ายนี้ เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของหุ่นยนต์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์ ผู้ดำเนินโครงการวิจัยเลือกใช้วิธีทดสอบที่ได้รับความนิยมในการทดสอบหุ่นยนต์หลากหลายรูปแบบโดย ศึกษาจากการทดสอบหุ่นยนต์แบบไฮบริดของ Miguel Duarte, Sancho Moura Oliveira, Anders Lyhne Christensen (2015) การทดสอบหุ่นยนต์หลายตัวที่ทำงานประสานกันของ Lingzhi Luo, Nilanjan Chakraborty, Katia Sycara (2015) การทดสอบหุ่นยนต์ค้นหาและกู้ภัยของ Alberto Quattrini Li et al. (2015) โดยการทดสอบแบ่งเป็นสามส่วนประกอบด้วยการทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงปริมาณ การทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงคุณภาพ และการทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

การทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงปริมาณ การทดสอบประสิทธิภาพในส่วนนี้ดำเนินการโดยจัดทำสภาพแวดล้อมแบบปิดเป็นสนามทดสอบการเคลื่อนที่จำลองขนาดยาว 4 เมตร 80 เซนติเมตร และกว้าง 2 เมตร 40 เซนติเมตร โดยลักษณะพื้นผิวของสนามแบ่งเป็นสี่รูปแบบ ประกอบด้วย พื้นทีราบ พื้นทีขรุขระ พื้นทีต่างระดับ และพื้นที่ลาดชัน ดังแสดงในรูปที่ 7 ในการทดสอบนั้น ดำเนินการโดย อาสาสมัครนักศึกษาจำนวน 50 คน ทำการบังคับควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนในสนามทดสอบเป็นจำนวน 100 รอบ ซึ่งคิดเป็นระยะทางทั้งสิ้น 1440 เมตร และนำเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ของนักศึกษาแต่ละคนมาคิดคำนวณเป็นค่าเฉลี่ย จากนั้นทดสอบการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมแบบเปิดบนพื้นผิวดินและคอนกรีต (รูปที่ 8) ที่มีระยะทางและลักษณะพื้นผิวของสนามเช่นเดียวกันสนามทดสอบซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมแบบปิด ด้วยอาสาสมัครนักศึกษาจำนวนเท่ากัน



รูปที่ 7 สนามทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สภาพแวดล้อมแบบปิด



รูปที่ 8 สนามทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สภาพแวดล้อมแบบเปิด

การทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงคุณภาพ การทดสอบประสิทธิภาพในส่วนนี้ดำเนินการโดยใช้แบบประเมินระดับความรู้สึกของอาสาสมัครนักศึกษาจำนวน 50 คน ที่เข้าร่วมเป็นผู้ทดสอบในการควบคุมหุ่นยนต์ในหลายปัจจัยดังนี้ ความแม่นยำในการควบคุมหุ่นยนต์ การตอบสนองต่อการควบคุมของหุ่นยนต์ ระยะเวลาในการเชื่อมต่อสัญญาณกับหุ่นยนต์ ความทนทานของหุ่นยนต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และระยะทางที่หุ่นยนต์ตอบสนองต่อการควบคุม

การทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์ ในงานวิจัยฉบับนี้ ใช้การทดสอบซอฟต์แวร์แบบกล่องดำ (Black box testing) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ กลุ่มผู้ดำเนินการทดสอบประกอบด้วย ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 คน และผู้ใช้งานทั่วไปจำนวน 50 คน หัวข้อการทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์นั้นประกอบด้วย 5 หัวข้อ ดังนี้ การทดสอบเชิงความต้องการของฟังก์ชัน การทดสอบเชิงฟังก์ชัน การทดสอบเชิงการใช้งาน การทดสอบเชิงประสิทธิภาพ และการทดสอบเชิงความมั่นคง

การทดสอบเชิงความต้องการของฟังก์ชัน (Functional requirement test) คือการทดสอบความครบถ้วนของฟังก์ชันของซอฟต์แวร์โดยผู้ใช้งานจะทำการประเมินว่า ฟังก์ชันต่าง ๆ ของซอฟต์แวร์นั้นครบถ้วนและตรงกับความต้องการของตนหรือไม่

การทดสอบเชิงฟังก์ชัน (Functional test) คือการทดสอบความถูกต้องของทุกฟังก์ชันของซอฟต์แวร์ โดยผู้ใช้งานแต่ละคนจะทำการเตรียมกรณีทดสอบ (Test case) ของตนเอง จากนั้นนำกรณีทดสอบที่แตกต่างกันดังกล่าวมาทดสอบกับทุกฟังก์ชันของซอฟต์แวร์ และสุดท้ายจะเป็นการประเมินผลความถูกต้องของทุกฟังก์ชันจากการทดลองใช้กรณีทดสอบของผู้ใช้งานแต่ละคน

การทดสอบเชิงการใช้งาน (Usability test) คือการทดสอบความสะดวกสบาย และความพึงพอใจ ในขณะที่นำซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์ไปใช้งานจริง การทดสอบในส่วนนี้จะเน้นไปที่ความรู้สึกรวมที่ได้รับในขณะที่ใช้งานซอฟต์แวร์ แต่การทดสอบดังกล่าวยังไม่คำนึงถึงประสิทธิภาพการทำงานของซอฟต์แวร์

การทดสอบเชิงประสิทธิภาพ (Performance test) คือการทดสอบประสิทธิภาพเชิงการใช้งานจริงของซอฟต์แวร์ ซึ่งผู้ใช้งานแต่ละคนจะมีความคาดหวังต่อประสิทธิภาพซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์ไม่เหมือนกัน เช่น ผู้ใช้งานบางคนคาดหวังให้ซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์มีการตอบสนองต่อการควบคุมบังคับบังคับที่รวดเร็ว ในขณะที่ผู้ใช้งานบางคนคาดหวังให้ซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์มีรูปแบบที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน เป็นต้น

การทดสอบเชิงความมั่นคง (Security test) คือการทดสอบว่า กลไกการป้องกันที่สร้างมาจากระบบสามารถป้องกันระบบจากผู้บุกรุกได้จริง โดยผู้ใช้งานต้องสวมบทบาทของผู้ที่ต้องการเจาะระบบ ซึ่งจะใช้วิธีการอย่างไรก็ได้โดยไม่มีกฎเกณฑ์ที่ตายตัว โดยผู้ทดสอบอาจจะทำการโจมตีซอฟต์แวร์จากภายนอกหรืออาจจะโจมตีซอฟต์แวร์ด้วยซอฟต์แวร์สำเร็จรูปที่ออกแบบมาเพื่อเจาะระบบโดยเฉพาะ เป็นต้น

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยของโครงการนี้แบ่งออกเป็นสามส่วนประกอบด้วยผลการทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงปริมาณ ผลการทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงคุณภาพ และผลการทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงปริมาณ

ผลการทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงปริมาณในการเคลื่อนที่บนสภาพแวดล้อมแบบปิดและสภาพแวดล้อมแบบเปิดดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงปริมาณ

ลักษณะพื้นผิว ของสนามทดสอบ	สนามทดสอบระยะทาง 1440 เมตร							
	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่บนสนาม				เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่บนสนาม			
	Max	Min	$\bar{x}$	SD	Max	Min	$\bar{x}$	SD
พื้นราบ	27.61	24.85	25.50	0.82	37.62	29.17	31.23	0.17
พื้นขรุขระ	39.84	30.70	36.65	2.95	42.73	38.38	40.14	0.28
พื้นต่างระดับ	48.23	45.63	46.13	0.60	49.89	47.40	48.87	0.35
พื้นลาดชัน	51.27	46.96	50.70	1.24	52.64	50.06	51.50	0.21
ค่าเฉลี่ย			39.75	1.40			42.94	0.25

จากตารางที่ 1 สามารถสรุปได้ว่า ผลการทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงปริมาณอยู่ในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ยของการทดสอบในสภาพแวดล้อมแบบปิด ($\bar{x}$) = 39.75 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบในสภาพแวดล้อมแบบปิด (SD) = 1.40 ค่าเฉลี่ยของการทดสอบในสภาพแวดล้อมแบบเปิด ($\bar{x}$) = 42.94 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบในสภาพแวดล้อมแบบเปิด (SD) = 0.25

2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงคุณภาพ

ผลการทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงคุณภาพในการเคลื่อนที่บนสภาพแวดล้อมแบบปิดและสภาพแวดล้อมแบบเปิดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงคุณภาพ

ปัจจัยที่ต้องการทดสอบ	จำนวนอาสาสมัครที่ลงคะแนน (คน)					$\bar{x}$	SD
	1	2	3	4	5		
ความแม่นยำในการควบคุมหุ่นยนต์	0	0	3	36	11	4.16	0.50
การตอบสนองต่อการควบคุมของหุ่นยนต์	0	0	3	29	18	4.3	0.58
ระยะเวลาในการเชื่อมต่อสัญญาณกับหุ่นยนต์	0	0	2	45	3	4.02	0.31
ความทนทานของหุ่นยนต์	0	0	2	43	5	4.06	0.37
ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	0	0	1	40	9	4.16	0.42
ระยะทางที่หุ่นยนต์ตอบสนองต่อการควบคุม	0	0	8	27	15	4.14	0.67
ค่าเฉลี่ย						4.14	0.48

จากตารางที่ 2 สามารถสรุปได้ว่า ผลการทดสอบประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงคุณภาพอยู่ในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.14 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) = 0.48

3. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์ แยกตามหัวข้อที่ต้องการทดสอบจำนวน 5 หัวข้อ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์

ปัจจัยที่ต้องการทดสอบ	ผู้เชี่ยวชาญ		ผู้ใช้งานทั่วไป	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
การทดสอบเชิงความต้องการของฟังก์ชัน	4.17	0.554	4.51	0.659
การทดสอบเชิงฟังก์ชัน	4.15	0.610	4.28	0.718
การทดสอบเชิงการใช้งาน	4.23	0.610	4.45	0.645
การทดสอบเชิงประสิทธิภาพ	4.03	0.416	4.31	0.531
การทดสอบเชิงความมั่นคง	4.23	0.624	4.33	0.665
ค่าเฉลี่ย	4.16	0.563	4.37	0.644

จากตารางที่ 3 สามารถสรุปได้ว่า ผลการทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์ในมุมมองของผู้เชี่ยวชาญอยู่ในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.16 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) = 0.563 และผลการทดสอบประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์ในมุมมองของผู้ใช้งานทั่วไป อยู่ในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.37 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) = 0.644

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การดำเนินโครงการวิจัยนี้ แสดงวิธีการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์สำรวจกิ่งอัตโนมัติซึ่งเคลื่อนที่บนภาคพื้นดินบนแพลตฟอร์มของบอร์ดควบคุมโยโย โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนในระดับอุดมศึกษา บอร์ดควบคุมโยโยนั้นได้รับความนิยมใช้ในการศึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์และการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมฮาร์ดแวร์สำหรับผู้มีความรู้ในระดับเบื้องต้น การทดสอบประสิทธิภาพในส่วนฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์สำรวจนั้นดำเนินการทดสอบในสองส่วน ประกอบด้วย การทดสอบประสิทธิภาพเชิงปริมาณและประสิทธิภาพเชิงคุณภาพ ในส่วนของการทดสอบซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์นั้นดำเนินการภายใต้หลักการทดสอบซอฟต์แวร์แบบกล่องดำของวิศวกรรมซอฟต์แวร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์สำรวจแบบกิ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้นบนแพลตฟอร์มโยโยนั้น มีประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงปริมาณอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ยของการทดสอบในสภาพแวดล้อมแบบปิด ($\bar{x}$) = 39.75

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบในสภาพแวดล้อมแบบปิด (SD) = 1.40 ค่าเฉลี่ยของการทดสอบในสภาพแวดล้อมแบบเปิด ($\bar{x}$) = 42.94 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบในสภาพแวดล้อมแบบเปิด (SD) = 0.25) มีประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์เชิงคุณภาพอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย = 4.14 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 0.48) และประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์อยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ยของการทดสอบโดยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ = 4.16 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบโดยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ = 0.563 ค่าเฉลี่ยของการทดสอบโดยกลุ่มผู้ใช้งานทั่วไป = 4.37 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบโดยกลุ่มผู้ใช้งานทั่วไป = 0.644)

ในส่วนของการนำผลงานวิจัยไปพัฒนาต่อยอดเป็นโครงการวิจัยในอนาคตนั้น ผู้ดำเนินโครงการวิจัยมีข้อเสนอแนะว่าควรนำอรรถควบคุมโยไปพัฒนาเป็นหุ่นยนต์สำรวจที่สามารถเคลื่อนที่ในน้ำหรือเคลื่อนที่ทางอากาศ ซึ่งต้องใช้งบประมาณสูงกว่าหุ่นยนต์สำรวจเคลื่อนที่บนภาคพื้นดิน

เอกสารอ้างอิง

Ahmadzadeh, H., Masehian, E. & Asadpour, M. (2016). Modular Robotic Systems: Characteristics and Applications. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 317-357.

Chirikjian, GS. (2015). Conformational Modeling of Continuum Structures in Robotics and Structural Biology: A Review. *Advanced Robotics*, 817-829.

Cully, A., Clune, J., Tarapore, D. & Mouret, JB. (2015). Robots that can adapt like animals. *NATURE*, 503-U476.

Duarte, M., Oliveira, SM. & Christensen, AL. (2015). Evolution of Hybrid Robotic Controllers for Complex Tasks. *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*, 463-484.

Gunn, T. & Anderson, J. (2015). Dynamic heterogeneous team formation for robotic urban search and rescue. *JOURNAL OF COMPUTER AND SYSTEM SCIENCES*, 553-567

Kohlbrecher, S., Romy, A., Stumpf, A., Gupta, A., Von Stryk, O., Bacim, F., Bowman, DA., Goins, A., Balasubramanian, R. & Conner, DC. (2015). Humman-robot Teaming for Rescue Missions: Team ViGIR's Approach to the 2013 DARPA Robotics Challenge Trials. *JOURNAL OF FIELD ROBOTICS*, 352-377.

Komura, H., Yamada, H. & Hirose, S. (2015). Development of snake-like robot ACM-R8 with large and mono-tread wheel. *Advanced Robotics*, 1081-1094.

Lee, MFR., Li, YC. & Chien, MY. (2015). Real-time face tracking and recognition using the mobile robots. *Advanced Robotics*, 187-208.

Li, AQ., Cipolleschi, R., Giusto, M. & Amigoni, F. (2016). A semantically-informed multirobot system for exploration of relevant areas in search and rescue settings. *Autonomous Robots*, 581-597.

Luo, LZ., Chakraborty, N. & Sycara, K. (2015). Distributed Algorithms for Multirobot Task Assignment With Task Deadline Constraints. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING*, 876-888.

Macwan, A., Vilela, J., Nejat, G. & Benhabib, B. (2016). Multi-Robot deployment for wilderness search and rescue. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ROBOTICS & AUTOMATION*, 45-51.

Pan, Y., Gao, F., Qi, CK. & Chai, X. (2016). Human-Tracking Strategies for a Six-legged Rescue Robot Based on Distance and View. *CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING*, 219-230.

Sheinker, A., Ginzburg, B., Salomonski, N., Frumkis, L., Kaplan, BZ. & Moldwin, MB. (2016). A method for indoor navigation based on magnetic beacons using smartphones and tablets. *Measurement*, 197-209.

Soares, j., Vale, A. & Ventura, R. (2015). A multi-purpose Rescue Vehicle and a human-robot interface architecture for remote assistance in ITER. *FUSION ENGINEERING AND DESIGN*, 1656-1659.