

การเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติของยานพาหนะบนบกและในน้ำ ด้วยตัวควบคุมแบบ L_1

คุณากร อนุวัตพานิชย์^{1*} และปรัชญา เปรมปราณีรัชต์²
khunakon_a@mail.rmutt.ac.th^{1*}, pradya.p@en.rmutt.ac.th²

^{1*, 2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: March 7, 2018
Revised: May 15, 2018
Accepted: July 6, 2018

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ตรรกะการนำทางติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์รถสี่ล้อและหุ่นยนต์เรือแบบสองหุ่น ด้วยตัวควบคุมแบบ L_1 โดยการคำนวณเส้นทางไปยังเป้าหมายอ้างอิง จะคำนวณค่าคำสั่งความเร่งสู่ศูนย์กลางที่อธิบายด้วยพารามิเตอร์ระยะการขจัด (L_1) และ อัตราส่วนความหน่วง (ζ) เพื่อให้ยานพาหนะสามารถลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงที่กำหนด โดยผลกระทบของสามพารามิเตอร์ คือ 1) L_1 และ 2) ζ และ 3) K_{ps} ของการควบคุมแบบพีไอดีสำหรับการหันเห (K_{ps}) ที่มีต่อประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของยานพาหนะทั้งสองรูปแบบ จะถูกประเมินผลด้วยการพิจารณาจาก 1) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของระยะทางของยานพาหนะที่ห่างจากเส้นทางที่กำหนดในแนวตั้งฉาก (average cross-track error) และ 2) ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดสูงสุดของการพุ่งเกิน (overshoot) จากเส้นทางที่กำหนดโดยผลการทดสอบการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัตินั้นแสดงให้เห็นว่า หุ่นยนต์รถสี่ล้อที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ L_1 นั้นจะมีลักษณะการลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรเป็นแบบความหน่วงเกิน โดยจะไม่ไว (sensitive) ต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ L_1 และ ζ มากนัก เนื่องจากพลศาสตร์ของรถสี่ล้อที่มีความสามารถในการเกาะพื่นได้ดีในระหว่างการเลี้ยวหักมุม ซึ่งจะต่างจากผลการทดสอบของเรือแบบสองหุ่นที่สามารถไถลไปในน้ำเนื่องจากความเฉื่อย ทำให้ผลกระทบของพารามิเตอร์ L_1 , ζ และ K_{ps} มีผลกระทบต่อการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติมาก ซึ่งค่าพารามิเตอร์ L_1 และ K_{ps} ที่น้อย จะทำให้การเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์เรือสามารถเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพดี

คำสำคัญ: การนำทางติดตามเส้นวิถีโคจร ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ตัวควบคุมแบบ L_1 หุ่นยนต์รถสี่ล้อ หุ่นยนต์เรือแบบสองหุ่น ผลกระทบของพารามิเตอร์

Autonomous Trajectory Tracking for Ground and Marine-Surface Vessels Using L_1 Controller

Khunakon Anuwatpanich^{1*} and Pradya Prempraneerach²
khunakon_a@mail.rmutt.ac.th^{1*}, pradya.p@en.rmutt.ac.th²

^{1*,2} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: March 7, 2018
Revised: May 15, 2018
Accepted: July 6, 2018

Abstract

This research paper presents studies of applying autonomous trajectory-tracking logic for 4-wheel car robot and catamaran robot using an L_1 controller. A trajectory computation toward specified target points need to calculate a centripetal-acceleration command, described by distance (L_1) and damping ratio (ζ) parameters, such that vehicle can approach the desired straight-path trajectory. Effect of three parameters: 1) L_1 , 2) ζ and 3) proportional gain (K_{ps}) of a PID control for steering, on efficiency of autonomous trajectory tracking of both vehicles are evaluated from 1) an average error of a perpendicular distance from vehicle toward the specified path or average cross-track error and 2) an average maximum error of overshoot from specified path. Experiments of autonomous trajectory tracking reveal that 4-wheel robot car, governed by the L_1 controller, approaches desired trajectory similar to an overdamped response. Robot car trajectory is not sensitive to L_1 and ζ parameter variations because a 4-wheel car dynamic has good traction capability during a sharp turn. On the contrary, catamaran can slideways in water because of small hydrodynamics drag force. As a result, L_1 , ζ , K_{ps} variations have strong effects on a performance of the autonomous trajectory tracking. Using small L_1 and K_{ps} , catamaran can track specified straight trajectories automatically with good performance

Keywords: trajectory-tracking navigation, autonomous control system, L_1 controller, four-wheel car robot, catamaran robot, effect of parameter variation

1. บทนำ

ในการปฏิบัติงานด้านสำรวจภาคสนาม ยานพาหนะเคลื่อนที่อัตโนมัติถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดตามวัตถุประสงค์ด้านการสำรวจนั้นๆ ความสามารถในการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางที่วางแผนไว้อย่างถูกต้องแม่นยำนับว่าเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้หุ่นยนต์ปฏิบัติงานนั้นๆ สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย สำหรับเทคนิคการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติตามจุดพิกัดที่กำหนดนั้น มีเทคนิคการควบคุมหลายประเภท อาทิเช่น Dongdong Mu and et al [1]. ได้เสนอวิธีการควบคุมมุมหันเหของยานพาหนะด้วยตัวควบคุมที่มีชื่อว่า “Intelligent Track Guiding Control (ITGC)” ที่มีพื้นฐานบนตัวควบคุมแบบพีชชี ที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพด้วยเทคนิคการระบุเอกลักษณ์วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Squared Estimation Method) , WANG Changshun and et al [2]. ได้เสนอวิธี “Active Disturbance Rejection Control (ADRC)” เพื่อออกแบบการควบคุมยานพาหนะผิวน้ำแบบอัตโนมัติที่ปฏิบัติงานในสภาพแวดล้อมที่มีพลศาสตร์ไม่แน่นอน จากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่า ยานพาหนะสามารถติดตามเส้นทางวิถีโคจรได้อย่างแม่นยำขณะที่มีสิ่งรบกวนจากสิ่งแวดล้อม สำหรับตัวควบคุมแบบ L_1 ถูกนำเสนอขึ้นโดย Sanghyuk Park and et al [3]. ได้ทำการศึกษาและติดตั้งเข้ากับอากาศยานไร้คนขับที่มีความสามารถในการติดตามเส้นทางวิถีโคจรที่กำหนด โดยนำเสนอการติดตามรูปแบบเส้นตรง, โค้ง และ วงกลม ซึ่งในปัจจุบัน ตัวควบคุม L_1 ถูกนำมาพัฒนาเข้ากับระบบควบคุมนำทางอัตโนมัติสำเร็จรูป Ardupilot [4] และถูกนำไปประยุกต์ใช้กับยานพาหนะอัตโนมัติอย่างกว้างขวาง เช่น ในงานวิจัยของ M. H. B. M. Idris and et al [5]. ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์

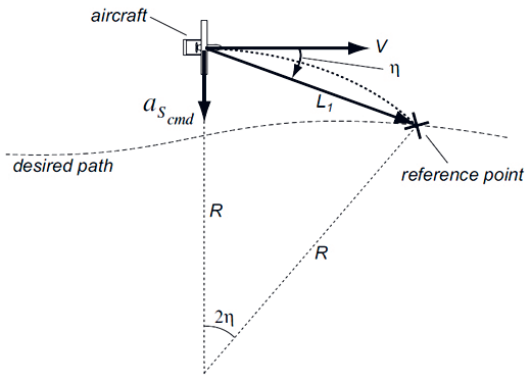
หุ่นยนต์เรือสำรวจความลึกของแหล่งน้ำโดยใช้หน่วยควบคุม Ardupilot และ ในงานวิจัยของ Armando Sinisterra and et al [6]. ได้ประยุกต์ใช้หน่วยควบคุม Ardupilot ติดตั้งบนหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อนที่เรียกว่า Wave Adaptive Modular Vehicle (WAM-V) ที่สามารถทำงานร่วมกับพาหนะอากาศยานไร้คนขับและยานพาหนะใต้น้ำไร้คนขับ หรือแม้กระทั่งการใช้ Ardupilot เพื่อวัตถุประสงค์ทางการทหารเช่นในงานวิจัยของ Syedalqra Hassan et al [7]. ทำการออกแบบยานพาหนะ ภาคพื้นดินขนาดเล็กที่ติดตั้งหน่วยควบคุม Ardupilot โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการสำรวจพื้นที่ลาดตระเวน

ดังนั้นผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญในการนำตรรกะการควบคุมแบบ L_1 และการนำหน่วยควบคุม Ardupilot มาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์รถแบบสี่ล้อและหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อน จึงทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์สำหรับตรรกะของตัวควบคุม L_1 ได้แก่ คาบ (Period หรือ L_1), ค่าความหน่วง (damping ratio หรือ ζ) และอัตราขยายสัดส่วนของระบบควบคุมการหันเห (KP-steering หรือ K_{ps}) สำหรับการควบคุมเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติติดตามเส้นทางวิถีโคจรของยานพาหนะภาคพื้นดินและน้ำ เพื่อนำมาอภิปรายพฤติกรรม การติดตามเส้นต่อไปและเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายผลการทดลองการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางวิถีโคจรของหุ่นยนต์ยานพาหนะภาคพื้นดินและหุ่นยนต์ยานพาหนะภาคพื้นผิวน้ำว่าแตกต่างกันอย่างไร

2. ทฤษฎีตรรกะการนำทางด้วยควบคุมแบบ L_1 [3]

ระบบการนำทางนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับยานพาหนะอัตโนมัติ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตรรกะการนำทางแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยตัวควบคุมป้อนกลับแบบเชิงเส้น ที่มีความสามารถ

ติดตามเส้นวิถีโคจร ในส่วนการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบตรงนั้นจะคล้ายคลึงกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ (PD) และในส่วนการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบโค้งจะการใช้การควบคุมล่วงหน้าช่วยให้สามารถติดตามเส้นวิถีโคจรแบบโค้งได้อย่างราบรื่น วิธีนี้สามารถติดตามเส้นวิถีโคจรโดยเสมือนว่ามีความเร่งสู่ศูนย์กลางจำลอง ($a_{s_{cmd}}$) หรือความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ ดังในสมการที่ (1) เพื่อให้ยานพาหนะรู้เข้าหาเส้นทางวิถีโคจร จะใช้ความเร็ว (V) และมุมหันเห (η) ของยานพาหนะเพื่อช่วยในการคำนวณ ที่แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังแนวคิดของตรรกะการนำทางด้วยตัวควบคุมแบบ L_1 และ ตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง [3]

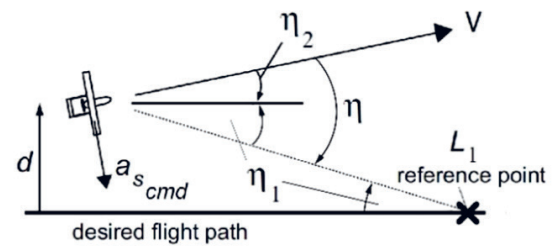
$$a_{s_{cmd}} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \quad (1)$$

เมื่อ $a_{s_{cmd}}$ คือ ความเร่งด้านข้างที่มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของเวกเตอร์ความเร็วของยานพาหนะ (V) , L_1 คือ ระยะการขจัดจากตำแหน่งยานพาหนะไปยังจุดอ้างอิงบนวิถีที่ต้องการ และ η คือ มุมระหว่างเวกเตอร์ความเร็วเทียบกับเส้นทางวิถีโคจรตามแนว L_1

ในการวิเคราะห์การติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรง ที่แสดงคุณลักษณะสำคัญนั้นจะศึกษาจาก 2 ตัวแปร คือ ระยะการขจัดตาม

แนวเส้นตรง L_1 ระหว่างยานพาหนะกับจุดอ้างอิง (Reference point) บนเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการ (Design flight path) และมุม η ระหว่างเวกเตอร์ความเร็ว (V) และแนวเส้นตรง L_1 ซึ่งจะสามารถใช้การวิเคราะห์ด้วยระบบเชิงเส้นอันดับสองดังในรูปที่ 2 โดยกำหนดให้ตัวแปรในระบบเชิงเส้นอันดับสองเป็น d ที่นิยามเป็นค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ Cross-track error) และสมมติว่ามุม η มีขนาดเล็กๆ ซึ่ง

$$\sin \eta \approx \eta = \eta_1 + \eta_2 \quad (2)$$



รูปที่ 2 แบบจำลองการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรง [3]

จากรูปที่ 2 สำหรับสามเหลี่ยมด้านล่างจะได้ $\eta_1 \approx d/L_1$ และสามเหลี่ยมด้านบนจะได้ $\eta_2 \approx \dot{d}/V$ เมื่อแทน η_1 และ η_2 ลงในสมการที่ (2) และ แทน $\sin \eta$ กลับเข้าไปในสมการที่ (1) จะได้สมการตรรกะการนำทางในรูปแบบระบบเชิงเส้นอันดับสอง ดังนี้

$$a_{s_{cmd}} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \approx 2 \frac{V}{L_1} \left(\dot{d} + \frac{V}{L_1} d \right) \quad (3)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 3 กับตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ (PD Controller) โดยกำหนดให้ $(2V^2/L_1^2)$ คือ เทอมที่เสมือนตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional หรือ P) $(2V/L_1)$ คือ เทอมของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative หรือ D)

ในการหาระยะห่างระหว่างยานพาหนะและเส้นทางวิถีโคจรตามแนว L_1 สามารถคำนวณได้โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยแบบจำลองของระบบที่เป็นแบบเชิงเส้นที่ประกอบด้วยตัวควบคุมแบบเชิงเส้นและระบบควบคุมจากสมการที่ (3) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณและวิเคราะห์เสถียรภาพจะสมมติว่า ไม่มีคิพพลศาสตร์ของยานพาหนะ และสันนิษฐานว่ามุม η_2 มีขนาดเล็ก ๆ และแทนค่าสั่งของความเร่งสู่ศูนย์กลางเป็น $a_{s_{cmd}} \approx -\ddot{d}$ ในสมการที่ (3) จะได้ว่า

$$\ddot{d} + 2\zeta\omega_n\dot{d} + \omega_n^2 d = 0 \quad (4)$$

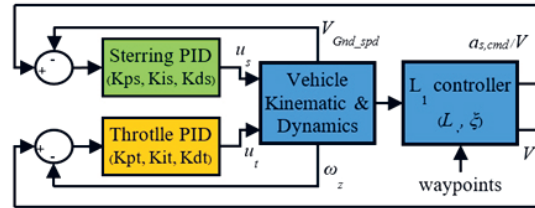
โดยค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบ (ζ) คือ $\zeta = 1/\sqrt{2}$ หรือค่าอัตราส่วนความหน่วงวิกฤติและค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ (ω_n) คือ $\omega_n = \sqrt{2V/L_1}$ จากสมการที่ (4) สำหรับกรณีเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงที่เป็นระบบแบบเชิงอันดับสองที่มีอัตราส่วนความหน่วงวิกฤตินั้น ความถี่ธรรมชาติจะถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของความเร็วของยานพาหนะที่ต้องการ (V) และระยะการขจัดระหว่างยานพาหนะและเส้นทางวิถีโคจรสำหรับการเลือกจุดอ้างอิง (L_1)

ในการควบคุมการบังคับเลี้ยวของหัวเรือ นั้นจะพิจารณาจากมุมหันเหของเวกเตอร์ความเร็วยานพาหนะที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($\Delta\psi$) เนื่องจากค่าคำสั่งของความเร่งด้านข้าง ($a_{s_{cmd}}$) ที่คำนวณได้จาก

$$\Delta\psi = \frac{a_s}{V} \Delta t \quad (5)$$

เมื่อ Δt คือ ผลต่างของเวลาในลูการควบคุม ฉะนั้นจะสามารถพิจารณา $\Delta\psi$ ได้เสมือนกับค่าความผิดพลาดของมุมเลี้ยวของหัวเรือ (e_s) ที่จะนำมาใช้ในการป้อนกลับด้วยระบบควบคุมแบบฟีดแบ็ค ที่มีพารามิเตอร์ของระบบควบคุมเป็น K_{ps} ,

K_{ds} และ K_{is} เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมบังคับเลี้ยว (u_s) ในส่วนการควบคุมความเร็วรอบของใบพัดเรือหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของเรื่อนั้นจะใช้ระบบการควบคุมแบบฟีดด้วยเช่นกัน เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ (u_v) ที่มีพารามิเตอร์ของระบบควบคุมเป็น K_{pv} , K_{dv} และ K_{iv} เมื่อนิยามค่าความผิดพลาดของความเร็ว (e_v) ที่เป็นผลต่างของ V ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3) กำหนดค่า L_1 และ ζ เมื่อเทียบกับ ความเร็วที่วัดได้จากยานพาหนะด้วยการบูรณาการข้อมูลของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) เซนเซอร์วัดความเฉื่อย (IMU) และเข็มทิศแบบดิจิตอล (Compass)

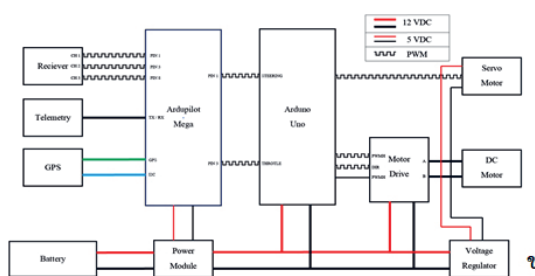


รูปที่ 3 การเชื่อมต่อระบบควบคุมขั้นต่ำแบบฟีดแบ็คและการติดตามเส้นวิถีโคจรเส้นตรง L_1 เข้ากับยานพาหนะ

อุปกรณ์ของหุ่นยนต์รถบังคับวิทยุและหุ่นยนต์เรือสองท่อน

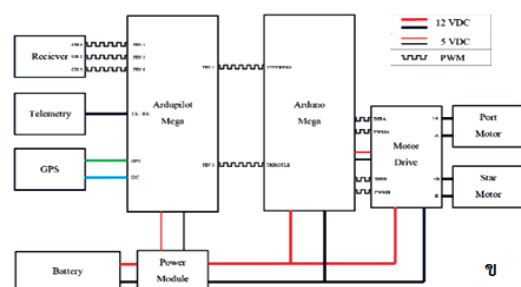
ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้งสองรูปแบบ คือ 1) หุ่นยนต์รถบังคับวิทยุที่ขับเคลื่อนด้วยล้อหลังและบังคับเลี้ยวด้วยสองล้อหน้า รุ่น Weight Grade V.2 ดังแสดงในรูปที่ 4 มีคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความกว้างและความสูงโดยรวมเป็น 31 และ 28 เซนติเมตร ตามลำดับ มังงเลี้ยวสูงสุดไม่เกิน 45 องศา ที่บังคับเลี้ยวล้อหน้าด้วยเซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) และ รถสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดไม่เกิน 2 เมตรต่อวินาที ที่ใช้ดีซีมอเตอร์ (DC motor) ในการขับเคลื่อนล้อหลัง โดยใช้แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์ 3 เซลล์ เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้ากระแส

ตรงหลัก ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยโมดูลกำลัง (Power module) และ 2) หุ่นยนต์เรือแบบสองท่อน



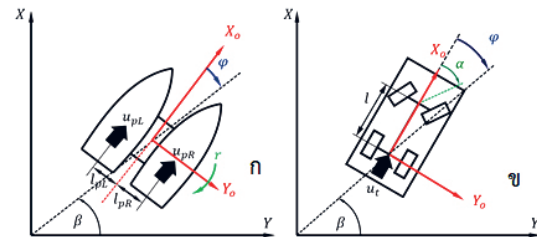
รูปที่ 4 รายละเอียดของหุ่นยนต์รถบังคับวิทยุแบบสี่ล้อ

- ก) รถสี่ล้อบังคับวิทยุและอุปกรณ์ควบคุม
- ข) แผนภาพการเชื่อมต่อระบบควบคุมและวงจรไฟฟ้าของรถบังคับวิทยุ



รูปที่ 5 รายละเอียดของหุ่นยนต์เรือสองท่อน

- ก) เรือสองท่อนบังคับวิทยุและอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุม
- ข) แผนภาพการเชื่อมต่อระบบควบคุมและวงจรไฟฟ้าของเรือสองท่อน



รูปที่ 6 แผนภาพวัตถุอิสระ

- ก) หุ่นยนต์เรือแบบสองท่อน [8]
- ข) หุ่นยนต์รถแบบบังคับด้วยล้อหน้า [9]

บังคับวิทยุภาคพื้นผิวน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5 ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความกว้างและความยาวโดยรวมเป็น 123 และ 84 เซนติเมตรตามลำดับ และ เรือสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดไม่เกิน 1.5 เมตรต่อวินาที โดยใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่ว 12 โวลต์ จำนวน 2 ลูก แต่ละลูกจ่ายกระแสได้สูงสุด 12 แอมแปร์ต่อชั่วโมง เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าหลัก ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยโมดูลกำลัง (Power module) โดยหุ่นยนต์ทั้งสองประเภทนี้จะสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในโหมดบังคับวิทยุและโหมดอัตโนมัติ ตามเส้นทางที่เชื่อมต่อจุดพิกัดที่กำหนด

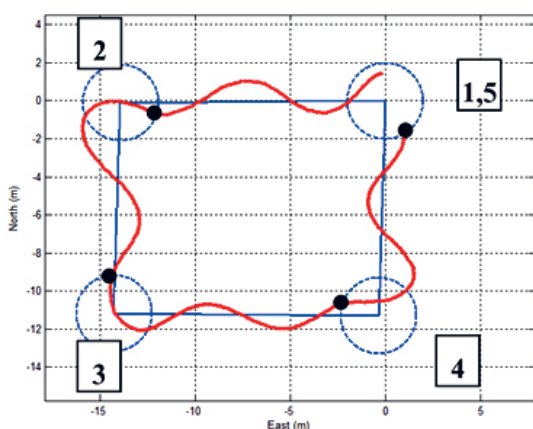
การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแบบสี่ล้อจะนำสัญญาณ u_s การควบคุมด้วย Ardubrover มาใช้เพื่อบังคับเลี้ยวสองล้อหน้าด้วยเซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) ได้โดยตรง ส่วนความเร็วของรถที่ขับเคลื่อนด้วยล้อหลัง จะใช้สัญญาณ u_l ในการควบคุมความเร็วรอบดีซีมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อหลังได้โดยตรงเช่นกัน แต่ทว่าเมื่อนำการควบคุมด้วย Ardubrover มาประยุกต์ใช้กับเรือแบบสองท่อน จะต้องทำการแปลงสัญญาณควบคุม u_s และ u_l มาใช้ปรับความเร็วรอบของใบพัดเรือที่ติดตั้งไว้กึ่งกลางเรือของแต่ละท่อนร่วมกัน โดยได้สร้างความ

สัมพันธของระบบควบคุมใบพัดซ้าย (u_{pL}) และ ใบพัดขวา (u_{pR}) เป็นดังสมการที่ (6)

$$\begin{aligned} u_{pL} &= u_t + 0.5u_s u_t + 0.3u_s && \text{และ} \\ u_{pR} &= u_t - 0.5u_s u_t - 0.3u_s \end{aligned} \quad (6)$$

3. ผลกระทบของพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบ L_1 ในการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรง

ในการทดลอง ผู้วิจัยได้กำหนดจุดพิกัดเป้าหมายไว้ทั้ง 5 จุด ที่ให้เส้นวิถีโคจรเป็นแบบเส้นตรงจำนวน 4 เส้นที่วนกลับมาที่จุดเริ่มต้นหรือจุดพิกัดที่ 1 และ 5 เป็นจุดเดียวกัน และกำหนดให้ขนาดรัศมีของวงกลมรอบจุดพิกัดเป้าหมายที่กำหนดมีค่าเป็น 2 เมตร (ที่แสดงด้วยวงกลมเส้นประ) ตอนเริ่มต้นหุ่นยนต์จะอยู่ภายในวงกลมรอบตำแหน่งที่ 1 และมีจุดพิกัดเป้าหมายเป็นจุดที่ 2 และ หุ่นยนต์จะพยายามติดตามเส้นวิถีโคจรที่ 1 เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าไปสู่ภายในวงกลมรอบจุดพิกัดตำแหน่งที่ 2 ระบบตรรกะการควบคุมจะเปลี่ยนจุดพิกัดเป้าหมายเป็นจุดที่ 3 และหุ่นยนต์จะติดตามเส้นวิถีโคจรที่ 2 จนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าสู่วงกลมรอบตำแหน่งจุดพิกัดที่ 5 จึงเป็นการสิ้นสุดโปรแกรมการควบคุมแบบอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 7



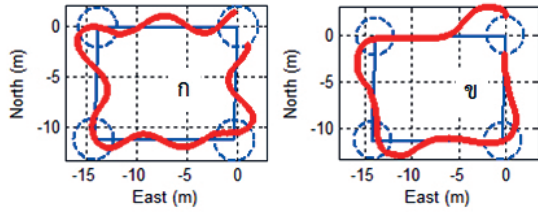
รูปที่ 7 การกำหนดรูปแบบการทดลองหุ่นยนต์ติดตามเส้นวิถีโคจร

เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของโปรแกรม Ardureover ทั้งหมด 3 ตัวแปรของตัวควบคุมแบบ L_1 ในสมการที่ 4 คือ 1) $L_1 = [17, 19, 20, 21]$ เมื่อ $\zeta = 0.8$ และ $K_{ps} = 1$ และ 2) $\zeta = [0.6, 0.7, 0.8]$ เมื่อ $L_1 = 17$ และ $K_{ps} = 1$ และ 3) $K_{ps} = [0.8, 1.0, 1.2, 1.4]$ ของตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) เมื่อ $L_1 = 17$ และ $\zeta = 0.8$ ซึ่งการวิเคราะห์ผลการทดสอบการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของเรือแบบสองท่อนั้นจะพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของตรรกะการควบคุมแบบ L_1 ได้จากค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดของระยะการขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ $\bar{d}$) และ ค่าสูงสุดโดยเฉลี่ยของค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ $\overline{\max(d)}$) ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$\bar{d}_i = \frac{\left(\sum_{j=2}^4 |GPS_{ij}(x, y) - WP_CMD_{ij}(x, y)| \right)}{3} \quad (7)$$

$$\overline{\max(d)}_i = \frac{\left(\sum_{j=2}^4 \max(GPS_{ij}(x, y) - WP_CMD_{ij}(x, y)) \right)}{3} \quad (8)$$

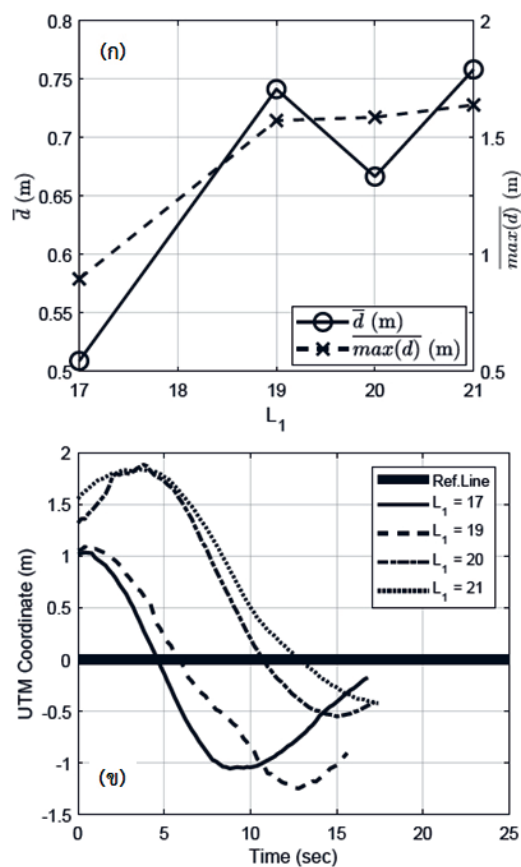
เมื่อ $GPS_{ij}(x, y)$ คือ ค่าข้อมูลพิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์ในระบบพิกัด UTM [10], $WP_CMD_{ij}(x, y)$ คือ ตำแหน่งบนเส้นวิถีโคจรแบบตรงสำหรับอ้างอิงค่าความผิดพลาดจากการติดตามเส้นวิถีโคจร, i แทน การทดลองครั้งที่ i และ j แทนเส้นวิถีโคจรอ้างอิงจากจุดพิกัดเริ่มต้นที่ 2 ถึง 4 โดยกำหนดให้เส้นจากจุดเป้าหมายที่ 2 ไปยังเป้าหมายที่ 3 คือ เส้นวิถีโคจรอ้างอิงที่ 2 เป็นต้น โดยผู้วิจัยจะไม่พิจารณาการเคลื่อนที่จากการติดตามเส้นวิถีโคจรที่ 1 เนื่องจากสภาพแวดล้อมทางอุทกศาสตร์สำหรับเก็บผลการทดลองส่งผลให้ไม่สามารถกำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์เรือได้เท่ากันในทุกการทดลองได้ ดังนั้นในการหาค่าเฉลี่ย $\bar{d}$ และ $\overline{\max(d)}$ จะคำนวณจากเส้นวิถีโคจรในช่วงที่เริ่มจากจุดที่ 2-4 เท่านั้น



ก) เมื่อ $L_1 = 15$

ข) เมื่อ $L_1 = 21$

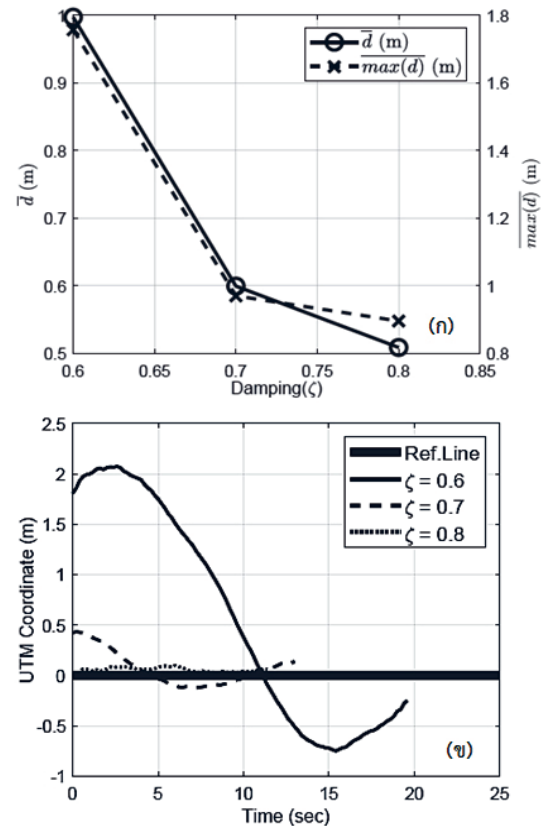
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือแบบสองหุ่น เมื่อปรับค่า L_1



รูปที่ 9 ผลการทดลองติดตามเส้นทางของเรือสองหุ่น เมื่อ $L_1 = [17, 19, 20, 21]$ และ $\zeta = 0.8, K_{ps} = 1$ คงที่ (ก) ผลกระทบต่อ $\bar{d}$ และ $\max(d)$ (รูปบน) และ (ข) เส้นทางเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นวิถีโคจร (รูปล่าง)

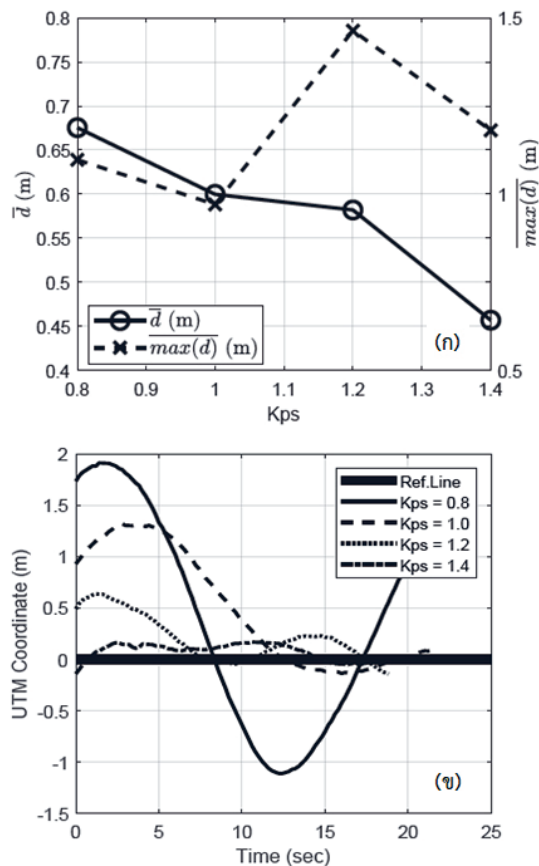
รูปที่ 8 แสดงพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงที่เชื่อมต่อกับจุดพิกัดที่กำหนดแบบอัตโนมัติของเรือแบบสองหุ่น โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือจะมีค่าผิดพลาดของระยะ

ขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (d) ที่มีผลตอบสนองเชิงเวลาของระบบอันดับสองเป็นแบบหน่วงขาด (Underdamped response) เมื่อเพิ่มค่าระยะการขจัดของ L_1 จาก 15 เป็น 21 (โดยกำหนดให้ $\zeta = 0.8, K_{ps} = 1$ เป็นค่าคงที่) จากรูปแสดงให้เห็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือจะลู่เข้าหาเส้นตรงที่เชื่อมต่อกับจุดพิกัดที่กำหนดข้างล่างที่ราบเรียบขึ้น ซึ่งทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลามีการแกว่งที่น้อยลง ดังนั้น จากสมการที่ 7 และ 8 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังแสดงรูปที่ 9 โดยที่ค่าเฉลี่ย $\bar{d}$ และ $\max(d)$ จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหมายความว่าระยะห่างจากเส้นตรงอ้างอิงโดยรวมจะมีค่ามากขึ้นแม้ว่าจะมีการกวัดแกว่งที่น้อยลง



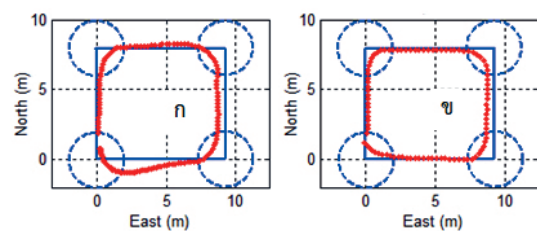
รูปที่ 10 ผลการทดลองติดตามเส้นทางของเรือสองหุ่น เมื่อ $\zeta = [0.6, 0.7, 0.8]$ และ $L_1 = 17, K_{ps} = 1$ คงที่ (ก) ผลกระทบต่อ $\bar{d}$ และ $\max(d)$ (รูปบน) และ (ข) เส้นทางเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นวิถีโคจร (รูปล่าง)

ส่วนการเพิ่มค่าอัตราส่วนความหน่วง (หรือ ξ) จาก 0.6 ไปถึง 0.8 จะทำให้เรือหุ่นยนต์ มีเส้นวิถีโคจรที่ติดตามเส้นตรงที่เชื่อมจุดพิกัดที่กำหนดได้ราบเรียบดีขึ้น และมีการกวัดแกว่งที่น้อยลงมาก ดังนั้นค่าเฉลี่ย $\bar{d}$ และ $\max(\bar{d})$ จะมีค่าลดน้อยลงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งมีผลกระทบเช่นเดียวกันกับการเพิ่มค่าอัตราขยาย K_{ps} ที่แสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลการทดลองติดตามเส้นทางของเรือสองหุ่น เมื่อ $K_{ps} = [0.8, 1.0, 1.2, 1.4]$ และ $L_1 = 17$, $\xi = 0.8$ คงที่ (ก) ผลกระทบต่อ $\bar{d}$ และ $\max(\bar{d})$ (รูปบน) และ (ข) เส้นทาง การเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจร (รูปล่าง)

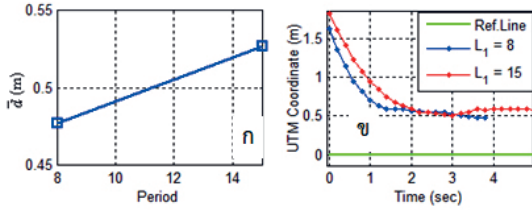
เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงของเรือแบบสองหุ่น กับหุ่นยนต์รถแบบสี่ล้อที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ทั้งสองรูปแบบ เมื่อใช้พารามิเตอร์แบบเดียวกัน คือ $L_1 = 15$, $\xi = 0.8$ และ $K_{ps} = 1$ จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรม การติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงที่เชื่อมต่อสี่จุดพิกัดที่กำหนดแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์รถสี่ล้อ โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์รถสี่ล้อจะมีค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (d) ที่มีผลตอบสนองเชิงเวลาของระบบอันดับสองเป็นแบบความหน่วงเกิน (Overdamped response) เมื่อลดค่าระยะการ ขจัดของ L_1 จาก 15 ลดลงเหลือ 8 เส้นทาง การเคลื่อนที่ของรถแบบสี่ล้อจะลู่อเข้าหาเส้นตรงที่เชื่อมต่อจุดพิกัดที่กำหนดได้รวดเร็วขึ้น หรือ สามารถติดตามเส้นทางที่กำหนดได้ดีขึ้นนั่นเอง ซึ่งจะสามารถสังเกตได้จากสมการที่ (4) เมื่อลดค่า L_1 จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติ (ω_n) หรือ ความถี่ ในการแกว่งของผลตอบสนองของเส้นทางการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น จึงให้หุ่นยนต์รถสี่ล้อสามารถ ลู่อเข้าหาเส้นตรงที่กำหนดได้รวดเร็วขึ้น



ก) เมื่อ $L_1 = 15$

ข) เมื่อ $L_1 = 8$

รูปที่ 12 เปรียบเทียบพฤติกรรมการติดตามเส้นทางของรถสี่ล้อ เมื่อ $L_1 = [8, 15]$ และ $\xi = 1$, $K_{ps} = 1$

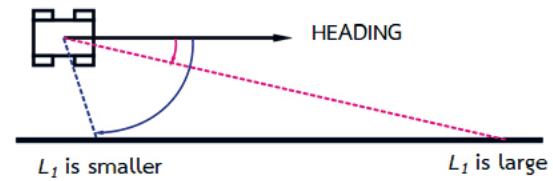


รูปที่ 13 ผลการทดลองติดตามเส้นของหุ่นยนต์
เรือสองหุ่น เมื่อ $L_1 = [8, 15]$ และ $L_1 = 17$,
 $\xi = 0.8$ คงที่ ก) ผลกระทบต่อ $\bar{d}$ และ $\max(\bar{d})$
ข) เส้นทางการเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจร

4. การอภิปรายผลการทดลอง

เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ค่า
ระยะการขจัด (L_1) ต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของ
ยานพาหนะแบบอัตโนมัติ จากในรูปที่ 8 พฤติกรรม
การติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือแบบ
สองหุ่นเมื่อกำหนดให้ $L_1 = 15$ ส่งผลให้หุ่นยนต์เรือ
ลู่เข้าหาเส้นตรงที่กำหนดเร็วเกินไป ทำให้เส้นทาง
การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือแกว่งกลับไปมา
อย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ $L_1 = 21$
ที่มีพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรได้ช้ากว่าแต่
ราบเรียบมากกว่า โดยจะสามารถอธิบายผลกระทบ
ของพารามิเตอร์ L_1 ได้ด้วยรูปที่ 14 ในกรณีที่
กำหนดให้ระยะการขจัด L_1 มีค่าสั้นเกินไปดังแสดง
ด้วยเส้นประสีน้ำเงิน จะทำให้หุ่นยนต์มีมุมหันเห
กว้างมาก แม้ว่าหุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่เข้าหา
เส้นวิถีโคจรได้เร็ว แต่ระบบควบคุมบังคับเลี้ยวมุม
หันเหของหุ่นยนต์เรื่อนั้นไม่สามารถตอบสนองให้
เรือติดตามเส้นวิถีโคจรได้อย่างทันท่วงท่าทำให้เส้น
วิถีโคจรกวัดแกว่งไปมาเมื่อเทียบกับในกรณีที่ใช้
 $L_1 = 21$ ที่แสดงด้วยเส้นประสีชมพูที่ยาวมากขึ้น
ทำให้หุ่นยนต์เรือมีมุมหันเหลู่เข้าสู่เส้นวิถีโคจร
ที่น้อยลง ส่งผลให้ผลตอบสนองของเรือในการลู่
เข้าเส้นวิถีโคจรนั้นช้าลงตามไปด้วย และอาจทำให้
เส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือจะไม่ทนทาน
ต่อสิ่งรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่ง
สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ของการเคลื่อนที่

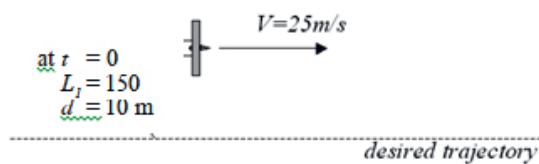
ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงแบบอัตโนมัติในรูป
ที่ 9 ได้คือ เมื่อเพิ่มค่า L_1 ให้สูงขึ้นจะพบว่าค่าเฉลี่ย
ของค่าผิดพลาดของระยะการขจัดจากยานพาหนะ
ไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ $\bar{d}$) มีแนวโน้ม
เพิ่มขึ้นตามค่า L_1 และค่าสูงสุดโดยเฉลี่ยของค่า
ผิดพลาดของระยะขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้น
วิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ $\max(\bar{d})$) เพิ่มขึ้น
ตามค่า L_1 ที่มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเช่นกัน



รูปที่ 14 ลักษณะการติดตามเส้นวิถีโคจร
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า L_1

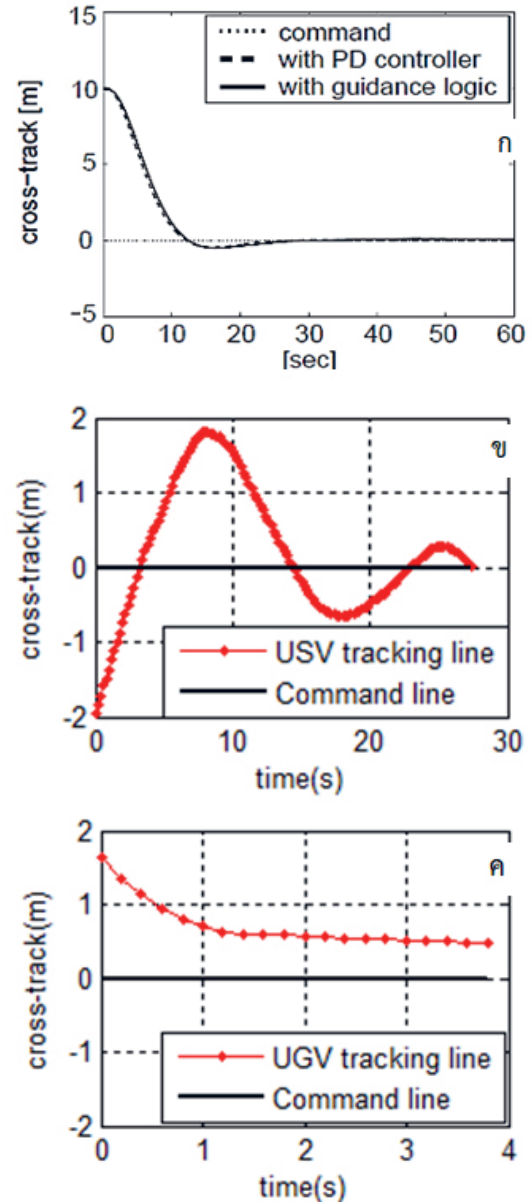
และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบพฤติกรรม
การติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงแบบอัตโนมัติ
ที่แตกต่างกันของหุ่นยนต์ทั้งสองรูปแบบ เมื่อใช้ค่า
 $L_1 = 15$ ที่เท่ากัน พบว่าหุ่นยนต์รถ (ในรูปที่ 12 ก)
มีพฤติกรรมติดตามเส้นที่ราบเรียบกว่า
หุ่นยนต์เรือ (ในรูปที่ 8 ก) เนื่องจากล้อของ
หุ่นยนต์รถไม่มีการสั่นไถลไปบนพื้นผิวถนน ทำให้
หุ่นยนต์รถตอบสนองได้ไวเมื่อบังคับเลี้ยวมุมหันเห
ติดตามเส้นวิถีโคจร และเมื่อผู้วิจัยทดลอง
เปลี่ยนแปลงค่า L_1 ที่ใช้กับหุ่นยนต์รถพบว่าในกรณี
ที่ใช้ค่า $L_1 = 8$ พบว่าหุ่นยนต์รถสามารถลู่เข้าหา
เส้นวิถีโคจรได้เร็วกว่าในการทดลองที่ใช้ค่า $L_1 = 15$
ดังแสดงด้วยตัวอย่างพฤติกรรมจริงในรูปที่ 12
(ข) และยังส่งผลให้ $\bar{d}$ ลดลงตาม L_1 อีกด้วย
ดังแสดงในรูปที่ 13 (ก) เมื่อพิจารณาผลกระทบ
จากค่า L_1 ที่มีผลต่อพฤติกรรมของหุ่นยนต์ทั้งสอง
ประเภทที่มีความแตกต่างกันของพลศาสตร์
จะเห็นได้ว่าโดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ มีความ
สอดคล้องกับผลการศึกษาในงานวิจัยอ้างอิงที่ [3]
ซึ่งอภิปรายทฤษฎีการควบคุมติดตามเส้นวิถี

โคจรด้วยตัวควบคุม L_1 และทำการศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบตรงด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับ โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 15 ผลการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับในทางทฤษฎีสอดคล้องและเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับผลการทดสอบของหุ่นยนต์รถล้อและของหุ่นยนต์เรือสองหุ่นในงานวิจัยนี้ และยังแสดงให้เห็นชัดว่าค่า L_1 ที่เหมาะสมกับยานพาหนะแต่ละประเภทจะแตกต่างกันได้ซึ่งเป็นผลมาจากข้อจำกัดทางกายภาพและทางพลศาสตร์ของยานพาหนะชนิดนั้นๆ ดังการเปรียบเทียบพฤติกรรมการลู่เข้าหาเส้นทางที่กำหนดที่แสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 15 เงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยอ้างอิง [3]

ในขั้นถัดมา การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า ξ ที่มีผลต่อพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือพบว่า การเพิ่มให้สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า $\bar{d}$ และ $\max(\bar{d})$ ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก) และจากรูปที่ 10 (ข) แสดงให้เห็นว่าการใช้ $\xi = 0.6$ (เส้นสีน้ำเงิน) แสดงพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือแกว่งกลับไปกลับมามากที่สุด กลับไปมามากที่สุด ทำให้มี $\max(\bar{d})$ สูงที่สุดและยังส่งผลให้ $\bar{d}$ มีค่าสูงที่สุดไปด้วยเช่นกัน



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจร ก) ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยอ้างอิง [3] ข) ผลการทดลองติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือสองหุ่น ค) ผลการทดลองติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์รถล้อ

เมื่อผู้วิจัยทดลองเพิ่มค่า ξ ให้สูงขึ้นเป็น 0.7 (เส้นสีแดง) จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรแบบส่ายกลับไปมาจะลดลง ส่งผลให้ $\max(\bar{d})$ และ $\bar{d}$ ลดลงตามไปด้วย และเมื่อเพิ่มค่า $\xi = 0.75$ จะเห็นได้ว่า หุ่นยนต์สามารถลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรได้ราบเรียบมากที่สุด ส่งผลให้

$\overline{\max(d)}$ และ $\bar{d}$ มีค่าน้อยที่สุด จากการทดลองเปลี่ยนแปลงค่า ξ แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับผลตอบสนองแบบฮาร์โมนิกที่ได้รับมาจากสมการที่ (4) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับสอง (2nd order linear ODEs) เมื่อกำหนดให้ $0 < \xi < 1$ จะเป็นผลตอบสนองแบบมีความหน่วงขาด (underdamped response) ซึ่งช่วยให้ลดพฤติกรรมเคลื่อนที่ส่ายกลับไปมาและลู่อเข้าหาเส้นวิถีโคจรได้อย่างราบเรียบและเร็วมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่า ξ ให้เข้าใกล้ 1 และจะลู่อเข้าหาเส้นวิถีโคจรได้ช้าลงเมื่อ ξ มากกว่า 1 หรือเป็นผลตอบสนองแบบความหน่วงเกิน (Overdamped response)

ในส่วนการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า $K_{p\text{-Steering}}$ (K_{ps}) ต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือดั้งแสดงในรูปที่ 11 (ก) จะพบว่าเมื่อค่า K_{ps} เพิ่มขึ้น $\bar{d}$ จะมีแนวโน้มลดลง แต่ $\overline{\max(d)}$ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 11 (ข) แสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือดั้ง ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีที่ใช้ค่า $K_{ps} = 0.8$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้ค่า $K_{ps} = 1.4$ (เส้นสีชมพู) จะพบว่าที่ค่า $K_{ps} = 0.8$ แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองการบังคับเลี้ยวมุมหันเหของหุ่นยนต์เรือดั้งที่ล่าช้า ทำให้มุมการลู่อเข้าเส้นวิถีโคจรจึงมีขนาดกว้างมาก ส่งผลให้มีพฤติกรรมเคลื่อนที่ตามเส้นทางแบบส่ายกลับไปมาและไม่ทนทานต่อสิ่งรบกวนจากสภาพแวดล้อม แต่ในกรณีที่ใช้ค่า $K_{ps} = 1.4$ แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองบังคับเลี้ยวมุมหันเหของหุ่นยนต์เรือดั้งที่ไวมากกว่าเมื่อใช้ค่า $K_{ps} = 0.8$ ผลที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีตัวควบคุมแบบพีไอดี จากคุณลักษณะของ K_{ps} ซึ่งเป็นตัวควบคุมอัตราขยายค่าความผิดพลาดของมุม η ในกรณีที่ผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำจะส่งผลให้ระบบควบคุม

จะมีผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady-State) ล่าช้า ในทางกลับกัน ผลจากอัตราขยายสัดส่วนที่สูง ค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ส่งผลให้ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองที่ไวมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย

5. สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตรรกะการนำทางติดตามเส้นวิถีโคจรด้วยตัวควบคุม L_1 โดยศึกษาผลกระทบในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม L_1 จำนวน 3 ค่า คือ L_1 , ξ และ K_{ps} และได้ใช้ตรรกะการนำทางด้วยตัวควบคุม L_1 กับหุ่นยนต์ 2 ประเภทที่มีพลศาสตร์แตกต่างกัน คือ หุ่นยนต์รถสี่ล้อที่มีการบังคับเลี้ยวด้วยล้อหน้า, ขับเคลื่อนด้วยล้อหลังและไม่สามารถลื่นไถลบนผิวสัมผัสถนน ซึ่งแตกต่างจากหุ่นยนต์เรือสองหุ่นจะใช้แรงผลักดันระหว่างใบพัดที่เท่ากันในทิศทางเดียวกันสำหรับการเคลื่อนที่ทางตรงและบังคับเลี้ยวด้วยการสร้างแรงผลักดันต่างกันระหว่างสองใบพัดและสามารถลื่นไถลไปบนผิวน้ำได้เมื่อมีผลกระทบจากอุทกพลศาสตร์ จากการศึกษาเปรียบเทียบหุ่นยนต์ทั้ง 2 ประเภทสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ในการศึกษาผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนค่า L_1 ของหุ่นยนต์ทั้งสองประเภทพบว่า การกำหนดค่า L_1 จะแปรผันตรงกับขนาดระยะขจัดของเส้นตรง L_1 และแปรผกผันกับมุมหันเลี้ยวเส้นวิถีโคจร การกำหนดค่า L_1 ที่มีความเหมาะสมจะส่งผลให้หุ่นยนต์สามารถติดตามเส้นวิถีโคจรได้อย่างราบเรียบและลู่อเข้าหาเส้นทางอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะกับหุ่นยนต์เรือสองหุ่น เนื่องจากพฤติกรรมของเรือที่เป็นแบบความหน่วงขาด ทำให้ต้องใช้ค่า L_1 ที่มากจึงจะมีส่วนหุ่นยนต์รถสี่ล้อมีพฤติกรรมเป็นแบบความหน่วงเกิน ทำให้ต้องปรับตั้งค่า L_1 ที่น้อยจึงจะลู่อเข้าหาเส้นทางได้อย่างรวดเร็ว

2) การศึกษาผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนค่า ξ ที่ใช้กับหุ่นยนต์เรือพบว่ามีความสอดคล้องกับผลตอบสนองจากระบบอันดับสองแบบมีความหน่วงแบบหน่วงขาด ซึ่งส่งผลให้พฤติกรรมตามเส้นวิถีโคจรแกว่งกลับไปมาและค่อยๆ ลดลงตามเวลา เนื่องจากพลศาสตร์ของเรื่อนั้นมีแรงเสียดทานต้านที่น้อย การเพิ่มค่า ξ ให้สูงขึ้นจนเข้าใกล้ค่า $1/\sqrt{2}$ หรือค่าความหน่วงวิกฤติ จะช่วยลดพฤติกรรมแกว่งกลับไปมาและลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรได้รวดเร็วและราบเรียบมากยิ่งขึ้น ส่วนการปรับค่า ξ จะมีผลกระทบต่อ ผลตอบสนองของหุ่นยนต์รถที่น้อยมากเนื่องจากผลตอบสนองเป็นแบบความหน่วงเกินอยู่แล้ว

3) ในตัวควบคุมพีไอดีของระบบการบังคับเลี้ยว เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า K_{ps} ให้สูงขึ้นจะช่วยให้หุ่นยนต์ทั้งสองประเภทสามารถเคลื่อนที่ลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรได้เร็วมากขึ้นและยังช่วยให้หุ่นยนต์สามารถติดตามเส้นวิถีโคจรได้ดียิ่งขึ้นโดยมีการกวัดแกว่งของเส้นทางการเคลื่อนที่น้อยลง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติสัญญารับทุนเลขที่ TG-44-47-59-067M

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Mu D, Zhao Y, Wang G, Fan Y and Bai Y. Course control of usv based on fuzzy adaptive guide control. 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 2016 : 6433-6437.

[2] Changshun W, Huang Z, Yu Y. USV trajectory tracking control system based on ADRC. 2017 Chinese Automation Congress (CAC). 2017 : 7534-7538.

[3] Park S, John D, Jonathan H. A New nonlinear guidance logic for trajectory tracking. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences. 2004.

[4] Idris M H B M, Kamarudin M A A B C, Sahalan M I, Abidin Z B Z, Rashid M M. Design and development of an autonomous surface vessel for inland water depth monitoring. 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE). Kuala Lumpur. 2016 : 177-182.

[5] ArduPilot Dev Team. ArduPilot mega [Internet]. 2017 [cited 2017 May 15]. Available from: <http://www.ardupilot.org> (in Thai)

[6] Sinisterra A, Dhanak M, Kouvaras N. A USV platform for surface autonomy. OCEANS 2017 – Anchorage. 2017 : 1-8.

[7] Hassan S, Alam M, Siddiqui N A, A A Siddiqui, M T Qadri. Designing and control of autonomous Unmanned Ground Vehicle. 2017 International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT). 2017 : 1-5.

- [8] Boonyarak S, Prempraneerach P. Real-time obstacle avoidance for car robot using potential field and local incremental planning. 2014 11 th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2014 : 1-5.
- [9] Prempraneerach P. Trajectory tracking using sliding mode control for autonomous surface vessel. 2016 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC). 2016, pp. 1-6.
- [10] Yiengveerachon V. Engineering surveying. 2. Bangkok: Chulalongkorn University Press. Bangkok. 2016 (in Thai).