

การพัฒนาระบบนำทางแบบอัตโนมัติสำหรับหุ่นยนต์เรือสองท่อน  
เก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์

DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS NAVIGATION FOR  
HYDROGRAPHIC-SURVEY ROBOTIC CATAMARAN

คุณากร อนุวัตพานิชย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การพัฒนาระบบนำทางแบบอัตโนมัติสำหรับหุ่นยนต์เรือสองท่อน  
เก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์

คุณากร อนุวัตพานิชย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การพัฒนาระบบนำทางแบบอัตโนมัติสำหรับหุ่นยนต์เรือสองท่อนเก็บ  
ข้อมูลทางอุทกศาสตร์  
Development of Autonomous Navigation for Hydrographic-Survey  
Robotic Catamaran

ชื่อ – นามสกุล      นายคุณากร อนุวัตพานิชย์


สาขาวิชา      วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา      ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.

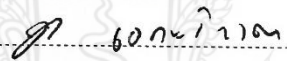
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม      อาจารย์ศิโรจน์ ศิริทรัพย์, Ph.D.

ปีการศึกษา      2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ

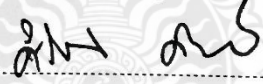
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒน์ ปราโมทย์, Ph.D.)

  
..... กรรมการ

(อาจารย์รุ่ง เอกะวิภาต, Ph.D.)

  
..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนูศักดิ์ จันทอง, Dr.-Ing.)


  
..... กรรมการ

(อาจารย์ศิโรจน์ ศิริทรัพย์, Ph.D.)

  
..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 29 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบนำทางแบบอัตโนมัติสำหรับหุ่นยนต์เรือสองท่อนเก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์
ชื่อ – นามสกุล	นายคุณากร อนุวัตพานิชย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2561

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบนำทางและระบบเก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์ในหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อน และ พัฒนาระบบรองรับการสันสะท้อนทางกลในหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่นน้ำ รวมทั้งการศึกษาตรรกะระบบนำทางอัตโนมัติด้วยตัวควบคุมแบบ  $L_1$  และการสร้างกลุ่มจุดจากเลเซอร์ แสดงรายละเอียดของสภาพแวดล้อมในแหล่งน้ำด้วยการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน

การทดลองในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ส่วนแรกเป็นการทดลองระบบรองรับการสันสะท้อนทางกลแบบอยู่กับที่และเคลื่อนที่สำหรับหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่นน้ำ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาพฤติกรรมการติดตามเส้นวิถี โคจรแบบตรงของหุ่นยนต์เรือสองท่อนขนาดเล็กและรถสี่ล้อที่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าระยะการขจัด ( $L_1$ ), อัตราส่วนความหน่วง ( $\zeta$ ), และค่าอัตราขยายมุมหันเห ( $K_{ps}$ ) ในตัวควบคุมแบบ  $L_1$  และในที่สุดท้ายเป็นการทดลองเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์จีพีเอส เลเซอร์ วัดความถี่ วัดความลึกน้ำและการบูรณาการร่วมกันเพื่อแสดงรายละเอียดสภาพแวดล้อมในลำน้ำ

ผลการศึกษาระบบรองรับการสันสะท้อนทางกลพบว่าความถี่จากอินพุตและผลตอบสนองจะมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากระบบสันสะท้อนเป็นแบบหน่วงเกิน แต่อัตราการส่งผ่านระยะขจัดลดลงได้ 50% ถึง 60% จากโครงสร้างของเรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่นน้ำ ในส่วนผลการศึกษาพฤติกรรมติดตามเส้นวิถี โคจร จากการเปลี่ยนแปลงค่าระยะการขจัด ( $L_1$ ) พบว่าถ้า  $L_1$  มีค่าน้อยส่งผลให้หุ่นยนต์แสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่แกว่งกลับไปมา แต่ถ้า  $L_1$  มีค่ามากส่งผลให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ลู่เข้าหาเส้นล่าช้า การเพิ่ม  $\zeta$  จนเข้าใกล้  $1/\sqrt{2}$  จะช่วยให้การเคลื่อนที่ลู่เข้าหาเส้นได้ราบเรียบและไม่แสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่แกว่งกลับไปมา และการเพิ่ม  $K_{ps}$  ให้สูงขึ้นจะช่วยให้หุ่นยนต์ติดตามเส้นได้ดีมากขึ้น และสำหรับในส่วนผลการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันเพื่อแสดงรายละเอียดวัตถุเหนือผิวน้ำ พบว่ามีองค์ประกอบภาพยังไม่สมบูรณ์จากความผิดพลาดของมุมหันเห

**คำสำคัญ:** เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น ระบบรองรับการสันสะท้อนทางกล ตัวควบคุมแบบ  $L_1$   
การควบคุมแบบอัตโนมัติ การบูรณาการข้อมูลทางอุทกศาสตร์

<b>Thesis Title</b>	Development of Autonomous Navigation for Hydrographic-Survey Robotic Catamaran
<b>Name - Surname</b>	Mr. Khunakon Anuwatpanich
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Pradya Prempraneerach, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2018

## ABSTRACT

The purposes of this research were to develop a system of navigation and hydrographic data collection for robotic catamarans, and a system of vibration suppression for wave-adaptive catamarans. Also, autonomous waypoint tracking systems using an  $L_1$  controller and laser point-cloud data reconstruction, displayed above water-level through the integration of data from different sensors were studied.

The experiments in this research are composed of 3 main parts. First, the experiments on a vibration suppression system for wave-adaptive catamarans were performed at the stationary base and in motion. Second, the behavior studies of small robotic catamarans and four-wheel cars during straight-line tracking influenced by variations in  $L_1$  displacement, damping ratio ( $\zeta$ ) and heading proportional gain ( $K_{ps}$ ) in the  $L_1$  controller were examined. Last, the hydrographic data collection and integration from GPS, laser scanner, IMU and echo sounder to present detailed views of environment in waterways were studied.

From the vibration suppression experiments, input and output frequency responses were in the same-order of magnitude because of overdamped characteristics of shock absorbers. However, the mechanism of the wave-adaptive catamaran could reduce displacement transmissibility up to 50-60%. For trajectory-tracking behavior studies by adjusting the  $L_1$  displacement parameter, the small  $L_1$  value caused oscillatory response while the large  $L_1$  value resulted in a slow approach to the straight-line trajectory. When increasing  $\zeta$  closed to  $1/\sqrt{2}$ , the straight-line tracking became smoother and did not exhibit oscillatory behaviour. And, increasing  $K_{ps}$  could help robots to better track along straight lines. Lastly, the experiments on data integration could provide detailed environment above water-level. However, a detailed environment reconstruction was imperfect due to error from yaw angle.

**Keywords:** Wave -adaptive catamaran, Mechanical vibration suppression system,  $L_1$  controller

Autonomous control, Hydrographical Data Integration

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรัชญา เปรมปราณีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่าง สูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ซึ่งสนับสนุน ทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) : สัญญารับทุนเลขที่ TG-44-47-59-067M แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้เช่นกัน

ขอขอบพระคุณ ดร.ศิริโรจน์ สิริทรัพย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำแนะนำสำหรับการ ปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนูศักดิ์ จานทอง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ปฏิบัติงานและ เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัยตั้งแต่แรกเริ่มจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการการสอบ วิทยานิพนธ์และให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรอง ผลงานการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา จนผู้วิจัยสามารถนำเอา หลักการและความรู้ มาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลรวมถึงห้องปฏิบัติการควบคุมและแมคคาทรอนิกส์ (E506) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อำนวยความสะดวกในการ ปฏิบัติงานและเครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณคณะผู้บริหาร ตลอดจนบุคลากรของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่องตลอดระยะเวลาที่ ผู้วิจัยกำลังศึกษาอยู่

และสุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ครอบครัวอนุวัตพานิชย์ญาติพี่น้องและเพื่อนๆทุกคนที่ มอบความรักและกำลังใจตลอดระยะเวลาการศึกษาในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คุณค่าที่พึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์และผู้มี พระคุณทุกท่าน

คุณากร อนุวัตพานิชย์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(11)
บทที่ 1 บทนำ.....	21
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย.....	21
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	25
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	25
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	25
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	26
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	26
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
2.1 การกำหนดกรอบอ้างอิง.....	28
2.2 การแปลงพิกัดเวกเตอร์เฉพาะ.....	33
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์เรือสองท่อน.....	38
2.4 ทฤษฎีการควบคุมการส่งผ่านการสั่นสะเทือนเชิงกล.....	47
2.5 ตรรกะการนำทางแบบไม่เชิงเส้นสำหรับการติดตามเส้นวิถีโคจร.....	51
2.6 การประมาณค่าความหนาแน่นกำลังสเปกตรัม.....	54
2.7 การประมาณค่ากำลังสเปกตรัมด้วยวิธี Welch's method.....	55
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	56
3.1 แผนการดำเนินการวิจัย.....	56

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	58
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	74
3.4 วิธีการทดลอง.....	101
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	111
4.1 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองการวิเคราะห์สเปกตรัมการสั่นสะเทือน..	111
4.2 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติ.....	130
4.3 การทดลองและการอภิปรายผลการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน.....	156
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	165
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	165
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	169
บรรณานุกรม.....	170
ภาคผนวก.....	172
ภาคผนวก ก การคำนวณขึ้นต้นเพื่อออกแบบหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น...	173
ภาคผนวก ข แบบโครงสร้างของหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น.....	178
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	183
ประวัติผู้เขียน.....	205



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทรัพยากรน้ำเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทั้งหลายบนโลกใบนี้ สำหรับประเทศไทยนั้นมีความเกี่ยวข้องกับน้ำอย่างหลากหลาย นอกเหนือจากการใช้น้ำเพื่อการดำรงชีวิตในกิจวัตรประจำวันแล้วนั้น ทรัพยากรน้ำยังมีบทบาทในภาคอุตสาหกรรม การเกษตรกรรม การคมนาคม และด้านอื่นๆอีกมากมาย ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาประเทศ ในปัจจุบันนี้ ปัญหาภาวะโลกร้อนมีความรุนแรงมากขึ้น ส่งผลให้สภาพอากาศเปลี่ยนแปลงและคาดการณ์ได้ยากขึ้นรวมถึงภัยธรรมชาติมีความรุนแรงมากกว่าเดิม ปัญหาเกี่ยวกับการจัดการทรัพยากรน้ำจึงถือว่าเป็นปัญหาสำคัญระดับประเทศ เช่น ปัญหาการที่มีน้ำน้อยเกินไปทำให้เกิดภัยแล้งและการรुकล้าของน้ำเค็มในลุ่มแม่น้ำต่างๆ หรือ ปัญหาการที่มีน้ำมากเกินไปทำให้เกิดน้ำท่วมจากการจัดการทรัพยากรน้ำที่ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ



(ก) ปัญหาน้ำแล้ง [1]

(ข) ปัญหาน้ำท่วมวัดไชยวัฒนาราม [2]

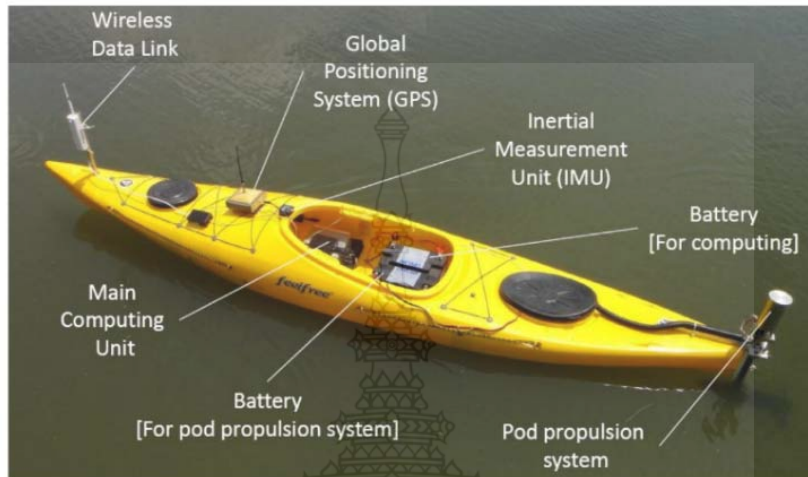
รูปที่ 1.1 ปัญหาเกี่ยวกับการจัดการทรัพยากรน้ำ

การวางแผนบริหารจัดการทรัพยากรน้ำที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยการคาดการณ์ที่แม่นยำผ่านระบบ Decision Support System (DSS) ในปัจจุบัน จีคความสามารถด้านเทคโนโลยีการประมวลผลมีสมรรถนะสูงขึ้นกว่าอดีตมาก ระบบ Decision Support System ในภาพแบบของการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเทคโนโลยีการจำลองขั้นสูงจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการคาดการณ์ที่แม่นยำขึ้นช่วยในการแก้ปัญหาและวางแผนการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น กระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มความแม่นยำของผลที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์นั้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่รวบรวมจากการสำรวจเก็บข้อมูลของค่าพารามิเตอร์จริงของน้ำจากหลายๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการตรวจสอบและพิสูจน์ (Validation & Verification) อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผสานข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดเข้าให้เข้ากับแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Data Assimilation หรือ Inverse Problem) เพื่อให้ได้มาซึ่งผลพยากรณ์โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ทำให้สามารถลดความไม่แน่นอน (Uncertainty Reduction) ของผลพยากรณ์ลงได้ ส่งผลให้ได้แนวทางการบริหารจัดการน้ำที่ประสิทธิภาพและสอดคล้องกับปัญหาได้ดียิ่งขึ้น

และในปัจจุบันนี้ คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผลมีความเร็วมากขึ้น แต่กลับมีขนาดเล็กกว่าในอดีตมาก ส่งผลให้เทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัตินั้นมีการพัฒนาอย่างก้าวกระโดด หุ่นยนต์จึงมีสมรรถนะที่สูงขึ้นอย่างมาก และมีความสามารถทำงานทดแทนมนุษย์ในภาคสนามและช่วยลดอัตราความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงาน เช่น การทำงานซ้ำเดิมกลางแจ้งต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานๆ การสำรวจในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ การสัมผัสกับสารปนเปื้อนในแหล่งน้ำสกปรก หรือการสำรวจในพื้นที่ที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าถึง เป็นต้น ทั้งนี้งานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบและพัฒนาเรือหุ่นยนต์อัตโนมัติเพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์ของน้ำในประเทศไทยนั้นยังมีไม่มากนัก จากการศึกษางานวิจัยในประเทศไทยที่ผ่านมาพบว่า ได้มีการพัฒนาและประดิษฐ์หุ่นยนต์เรือคายัคเพื่อใช้สำรวจความจุของแหล่งน้ำ โดย P. Prempraneerach et al. [3] ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ได้ทำการทดสอบการควบคุมเส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือคายัค ไปตามจุดเป้าหมายที่กำหนด และเปรียบเทียบกับผลการควบคุมแบบอัตโนมัติด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบป้อนกลับร่วมกับตัวสังเกตการณ์สถานะ ซึ่งยังมีข้อจำกัดด้านการควบคุมอันเนื่องมาจากปัจจัยภายนอกที่เกี่ยวกับตัวแปรไม่ทราบค่า เช่น กระแสคลื่นลมและกระแสน้ำ เป็นต้น และยังมีงานวิจัยอื่นๆ อีกคือ เรือสำรวจแบบอัตโนมัติที่ใช้เครื่องยนต์น้ำมันพร้อมระบบรายงานตามตำแหน่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G ที่ใช้สำรวจความลึกแหล่งน้ำโดย P. Prempraneerach et al. [4] ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ได้พัฒนาระบบการควบคุมการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนดด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี พร้อมกันนั้นสามารถตรวจวัดข้อมูลความลึกท้องน้ำด้วยเซนเซอร์คลื่นเสียง (Sonar sensor) และสามารถรายงานตำแหน่งเรือและค่าความลึกกลับมายังผู้ใช้งานได้ในเวลาจริง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยด้านเรือที่ขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติในต่างประเทศ ได้แก่ Tzeng and et al. [5] ได้มีพัฒนาระบบนำทางแบบอัตโนมัติสำหรับเรือขนาดเล็กให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดโดยใช้ระบบการควบคุมด้วยแบบจำลองภายใน (Internal Model Control หรือ IMC) ที่ป้อนกลับตำแหน่งด้วย Real Time Kinematic (RTK) GPS และ ประกอบด้วยการเปลี่ยนเส้นทางเคลื่อนที่จากกฎการนำทางแบบสี่ส่วนในระบบพิกัดนำทาง และ D. Soares and et al. [6] ได้พัฒนาและสร้างเรืออัตโนมัติที่มีราคาถูก

และใช้การผสมผสาน INS/GPS ด้วยเทคนิคตัวกรองสัญญาณแบบคาร์มาล เพื่อใช้ในระบบนำทาง สำหรับควบคุมองศาการหันเหและระยะทางไปยังเป้าหมายในระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ



รูปที่ 1.2 หุ่นยนต์เรือคายัคเพื่อใช้สำรวจความจุของแหล่งน้ำ [4]



รูปที่ 1.3 เรือสำรวจแบบอัตโนมัติที่ใช้เครื่องยนต์น้ำมันพร้อมระบบรายงานตามตำแหน่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G [5]

เพื่อช่วยลดผลกระทบจากการสิ้นสะท้อนเชิงกลจึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบรองรับการสิ้นสะท้อนที่เซนเซอร์ด้วย จากงานวิจัยในต่างประเทศพบว่า MARINE ADVANCED RESEARCH, INC [7] ได้มีการออกแบบเรือสองหุ่นแบบปรับตัวตามคลื่นได้เมื่อคลื่นเข้ามาปะทะด้านหน้า ซึ่งหุ่นทั้งสองมีความเป็นอิสระต่อกันและยังได้ติดตั้งระบบรองรับการสิ้นสะท้อนด้วย ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 เรือสองท่อน WAM-V 16' B.O.S.S. จาก ADVANCED RESEARCH, INC [10]

ดังนั้น การใช้หุ่นยนต์เรืออัตโนมัติเพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์ของน้ำนั้นจะเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อหุ่นยนต์เรือสามารถเก็บค่าพารามิเตอร์ของน้ำได้ตามคำสั่งของผู้ปฏิบัติงาน เพราะหุ่นยนต์เรือสามารถปฏิบัติงานได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำกว่า ซึ่งข้อมูลที่มีความแม่นยำสูงชิ้นนั้นสามารถนำไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และระบบ Decision Support System ต่อไป เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์เรือสองท่อนสำรวจแหล่งน้ำพร้อมติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ของน้ำ โดยหุ่นยนต์เรือสามารถระบุจุดพิกัดและมุมหันเหของตำแหน่งเรือ ณ ขณะปัจจุบันบนแกนอ้างอิงโลก จากนั้นทำการประมวลผลเส้นทางการเคลื่อนที่ไปยังจุดพิกัดใหม่ตามที่ต้องการหรือกำหนดโดยผู้ปฏิบัติการได้อย่างอัตโนมัติ ทั้งนี้ ตัวเรือสองท่อนสามารถปรับตัวตามคลื่นน้ำได้และติดตั้งระบบรองรับการสั่นสะเทือนทางกลเพื่อเสริมความแม่นยำให้กับเซนเซอร์เลเซอร์ ซึ่งทำให้ข้อมูลระยะทางที่วัดได้มีความแม่นยำขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบและพัฒนาเรือหุ่นยนต์สองท่อนเพื่อสำรวจแหล่งน้ำที่สามารถติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับเก็บข้อมูลค่าความลึกของน้ำ ณ จุดต่างๆตามจุดพิกัดที่กำหนด

1.2.2 เพื่อศึกษาและออกแบบระบบรองรับการสั่นสะเทือนทางกลของเรือสองท่อนสามารถปรับตัวตามคลื่นได้ โดยวิธีการประมาณค่าสเปกตรัมกำลัง

1.2.3 เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการนำทางแบบอัตโนมัติโดยใช้การบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน ได้แก่ เซนเซอร์เลเซอร์สแกนเนอร์, เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์จีพีเอส (GPS)

## 1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 การพัฒนาให้เรือสองท่อนสามารถปรับตัวตามคลื่นได้ที่มีระบบรองรับการสั่นสะเทือน จะทำให้ข้อมูลระยะทางที่วัดได้จากเซนเซอร์เลเซอร์มีความแม่นยำกว่าเรือสองท่อนแบบท่อนแบบไม่มีระบบรองรับการสั่นสะเทือนหรือไม่อย่างไร

1.3.2 ความแม่นยำในการนำทางแบบอัตโนมัติจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของตัวรับสัญญาณจีพีเอสหรือไม่อย่างไร

1.3.3 การปรับเปลี่ยนค่าระยะขจัด  $L_r$ , ค่าความหน่วงของระบบ และค่าอัตราขยายความผิดพลาดของมุมหันเห จะส่งผลต่อพฤติกรรมของหุ่นยนต์ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติอย่างไร

1.3.4 ความแม่นยำจากการวัดด้วยเซนเซอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าความผิดพลาดขององศาการหันเหของเซนเซอร์วัดมุมเอียง และ ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งจากเซนเซอร์จีพีเอส และ ค่าความผิดพลาดของระยะทางของวัตถุจากเซนเซอร์เลเซอร์สแกนเนอร์จะมีผลต่อความถูกต้องแม่นยำของการบูรณาการข้อมูลอย่างไร

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 เรือหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เกิน 1.5 เมตรต่อวินาที ไปยังจุดต่างๆตามพิกัดที่กำหนดด้วยเซนเซอร์จีพีเอส ได้อย่างอัตโนมัติ และมีค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งจากจุดพิกัดไม่เกิน 5 เมตร

1.4.2 เรือหุ่นยนต์สามารถตรวจวัดและเก็บข้อมูลรายละเอียดต่างๆเหนือผิวน้ำที่อยู่ห่างจากหุ่นยนต์เรือได้ในระยะไม่เกิน 80 เมตร เช่น คลิ่ง ทำน้ำ หรือสิ่งปลูกสร้างริมน้ำ ฯลฯ

1.4.3 เรือหุ่นยนต์สามารถเก็บข้อมูลความลึกของน้ำไม่เกิน 10 เมตร ณ จุดต่างๆตามพิกัดที่กำหนด

1.4.4 เรือหุ่นยนต์สามารถใช้ออกปฏิบัติงานได้ในแหล่งน้ำทั่วไปที่มีสภาพน้ำนิ่งแบบต่อเนื่องได้ไม่เกิน 1 ชั่วโมง

## 1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 การศึกษาปัญหาที่จะนำมาวิจัย

1.5.2 การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยต่างๆที่เคยมีมาแล้ว

1.5.3 ตั้งสมมติฐานการวิจัย

1.5.4 กำหนดตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุม

1.5.5 ออกแบบการทดลอง

1.5.6 สร้างอุปกรณ์การทดลอง

1.5.7 ทำการทดลอง และเก็บผลการทดลอง

1.5.8 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.9 อธิปราชผลการทดลอง

1.5.10 สรุปผลการทดลอง

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เพิ่มประสิทธิภาพการคาดการณ์ผ่านระบบ Decision Support System (DSS) โดยการตรวจสอบและผสมผสานข้อมูลอุทกศาสตร์ที่พิกัดต่างๆ ณ เวลาปัจจุบันเข้ากับแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบนิเวศสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มเติมข้อมูลอื่นๆ เช่น ค่าความเค็มของน้ำ ค่าปริมาณออกซิเจนในน้ำ ฯลฯ ได้โดยติดตั้งเซนเซอร์เพิ่มเติมกับหุ่นยนต์เรือเพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์ตามที่ต้องการได้อีกด้วย

1.6.2 ช่วยลดความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้นต่อนักวิทยาศาสตร์ขณะทำการเก็บข้อมูล เช่น การสัมผัสกับสารปนเปื้อนในน้ำทั้งทางตรงและทางอ้อมเป็นระยะเวลานาน การสำรวจในพื้นที่อันตราย การประสบอุบัติเหตุทางน้ำ ฯลฯ เป็นต้น

1.6.3 ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานของนักวิทยาศาสตร์ในการเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของน้ำให้มีความรวดเร็วและแม่นยำอย่างเป็นระบบ

1.6.4 ช่วยลดภาระของนักวิทยาศาสตร์ในการเก็บข้อมูลของพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดจุดพิกัดที่ต้องการเก็บข้อมูลไว้ล่วงหน้า และ เรือหุ่นยนต์ยังสามารถทำงานซ้ำเดิมเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล และ ปฏิบัติงานต่อเนื่อง ได้เป็นเวลานานอีกด้วย

1.6.5 ได้องค์ความรู้ใหม่ๆสำหรับพัฒนาเรือหุ่นยนต์ที่เคลื่อนติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติ



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

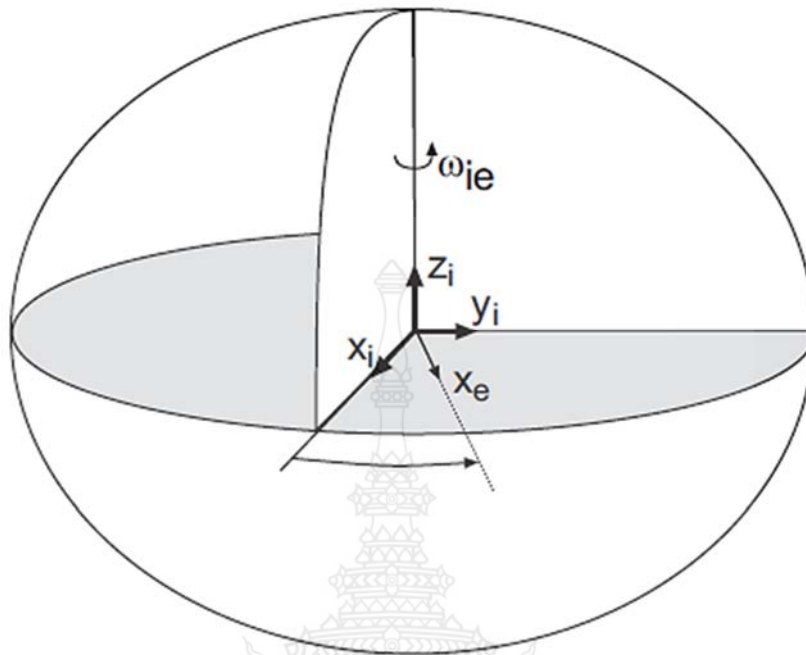
ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการศึกษาการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์เรือสองท่อนเพื่อสำรวจแหล่งน้ำที่สามารถติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อการตรวจวัดข้อมูลและพารามิเตอร์ต่างๆได้นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ ด้วยกัน ในส่วนที่ 1 คือ การออกแบบและพัฒนาในส่วนของโครงสร้างเรือหุ่นยนต์ โดยติดตั้งระบบรองรับการสั่นสะเทือนทางกลที่จะสามารถช่วยลดการส่งผ่านของแรงและระยะทางของการสั่นสะเทือนไปยังเซนเซอร์ต่างๆที่ติดตั้งไว้บริเวณด้านบนของหุ่นยนต์เรือ ทำให้ข้อมูลที่เซนเซอร์ต่างๆตรวจวัดได้มีความแม่นยำมากขึ้น และส่วนที่ 2 คือ การออกแบบและพัฒนาในส่วนระบบการนำทางแบบอัตโนมัติที่สามารถใช้งานได้กับทั้งยานพาหนะบนบกหรือรถบังคับแบบสี่ล้อ และ ยานพาหนะในน้ำหรือเรือแบบสองท่อนทั้งลำใหญ่และเล็ก และ ส่วนที่ 3 คือ การบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมเข้าด้วยกัน เพื่อช่วยในการสำรวจข้อมูลทางอุทกศาสตร์ ซึ่งการพัฒนาทั้ง 3 ส่วนนี้จะช่วยให้หุ่นยนต์เรือสองท่อนมีสมรรถนะสูงขึ้น สามารถปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และ มีความสะดวกต่อผู้ใช้งานในการสำรวจภาคสนามจริงอีกด้วย

#### 2.1 การกำหนดกรอบอ้างอิง [11]

##### 2.1.1 กรอบอ้างอิงเฉื่อย (Inertial Frame หรือ ECI)

กรอบอ้างอิงเฉื่อย เป็นกรอบอ้างอิงที่หยุดนิ่งในอวกาศเสมือนว่าไม่มีความเร่งในกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ซึ่งค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเฉื่อยทุกชนิดจะมีค่าที่สัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงเฉื่อย โดยจุดกำเนิด (Origin) ของกรอบอ้างอิงเฉื่อยสามารถกำหนดเป็นตำแหน่งใดๆ ก็ได้ แต่แกนพิกัดทั้ง 3 แกนนั้นจะต้องตั้งฉากกันตามกฎมือขวา แต่เพื่อความสะดวกกำหนดกรอบอ้างอิงเฉื่อยไว้ที่แกนกลางโลกหรือเรียกว่า “กรอบอ้างอิงเฉื่อยที่แกนกลางโลก (Earth Centered Inertial หรือ ECI Frame)” โดยจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงเฉื่อย ( $O_e$ ) นี้จะเป็นจุดเดียวกันกับจุดศูนย์กลางมวลของโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยกำหนดให้แกน x จะพุ่งไปที่ เวิร์นอล อิกวินอกซ์ (Vernal Equinox) และแกน z จะพุ่งไปยังแกนการหมุนของโลก และแกน y จะกำหนดตามกฎมือขวา ในกรอบอ้างอิงแบบ ECEF (Earth Centered Earth Fixed Frames) นั้นการหมุนของโลกจะเทียบเท่ากับกรอบอ้างอิงแบบ ECI ด้วยอัตราความเร็วเชิงมุม  $\omega_{ie}$  ซึ่งในกรอบอ้างอิงแบบ ECI นั้นเวกเตอร์อัตราเร็วเชิงมุมคือ  $\omega_{ie}^i = [0, 0, \omega_{ie}]^T$





รูปที่ 2.1 การหมุนของกรอบอ้างอิงแบบ ECEF เปรียบเทียบกับกรอบอ้างอิงเฉื่อยที่แกนกลางโลก (ECI) [11]

### 2.1.2 กรอบอ้างอิงที่มีโลกเป็นศูนย์กลางและกรอบอ้างอิงหมุนไปพร้อมกับโลก (Earth-Centered Earth-Fixed หรือ ECEF) [11]

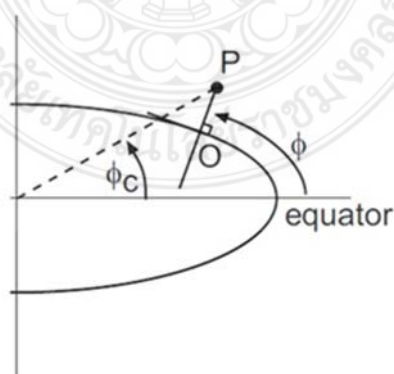
กรอบอ้างอิงแบบนี้มีเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า (Earth-Centered Rotational หรือ ECR) เป็นระบบพิกัดทางภูมิศาสตร์และระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) และบางครั้งเรียกว่าระบบ "ภาคพื้นดินทั่วไป (Conventional Terrestrial System)" โดยระบบพิกัดนี้มีจุดศูนย์กลาง ( $o_e$ ) อยู่จุดศูนย์กลางมวลของโลกเช่นเดียวกับกรอบอ้างอิงเฉื่อย แต่แกนการหมุนจะหมุนไปพร้อมโลกซึ่งมีความเร็วเชิงมุม ( $\omega_{ie}$ ) ที่สัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงเฉื่อยเท่ากับ  $7.292115 \times 10^{-5}$  rad/s ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้น สามารถเขียนเป็นเวกเตอร์ได้ว่า  $\omega_{ie}^e = [0, 0, 1]^T \omega_{ie}$  สำหรับยานพาหนะทางน้ำที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ค่อนข้างต่ำจึงไม่ต้องพิจารณาความเร็วการหมุนของโลกได้ ด้วยเหตุนี้จึงถือได้ว่าเป็นกรอบอ้างอิงเฉื่อย อย่างไรก็ตามก็ไม่ควรละเลยการหมุนของโลก ระบบพิกัดนี้มักจะใช้เพื่อเป็นแนวทางสากลในการเดินเรือและการควบคุม เช่น การอธิบายการเคลื่อนไหวและสถานที่ตั้งของเรือในการขนส่งระหว่างภาคพื้นทวีปที่แตกต่างกัน

### 2.1.3 กรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ (Geographic Frame) [11]

กรอบทางภูมิศาสตร์กำหนดไว้เฉพาะกรอบทางภูมิศาสตร์กำหนดไว้เฉพาะที่ เมื่อเทียบกับพื้นผิวที่มีสนามแรงโน้มถ่วงของโลกในค่าเฉลี่ยระดับน้ำทะเลปานกลางทั่วโลก โดยจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงนี้จะเคลื่อนที่ไปกับระบบและจะฉายภาพจากจุดกำเนิด  $P$  ไปบนรูปทรงรีอ้างอิงของโลก ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งทั้งสามแกนจะทำมุมกันตามกฎมือขวาในระบบพิกัดฉาก โดยที่แกน  $z$  ของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้นจะชี้ไปยังภายในตามผิวโค้งของรูปทรงรี แกน  $x$  จะชี้ไปยังทิศเหนือที่แท้จริงและแกน  $y$  จะชี้ไปทางทิศตะวันออก จุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์จะเสมือนยึดติดไปตามยานพาหนะเคลื่อนที่ ดังนั้นแกนของกรอบก็จะหมุนไปกับยานพาหนะด้วย กรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์จึงไม่ได้เป็นกรอบอ้างอิงเฉื่อย โดยต้องพิจารณาเพิ่มเติมคือ ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก และ ทิศเหนือที่แท้จริงโดยปกติแล้วจะมีทิศทางที่แตกต่างกัน และ เส้นตั้งฉากของรูปทรงรีจะไม่ผ่านเส้นศูนย์กลางของรูปทรงรีอ้างอิงถ้าจุดกำเนิดของระบบพิกัดนี้ไม่ได้อยู่ที่เส้นศูนย์สูตรหรืออยู่ที่แกนการหมุนของโลก

### 2.1.4 กรอบอ้างอิงแบบใช้จุดศูนย์กลางโลกเป็นหลัก (Geocentric Frame) [11]

กรอบอ้างอิงชนิดนี้จะมีความคล้ายคลึงกับกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ ซึ่งความแตกต่างหลักๆ คือ แกน  $z$  จากตำแหน่งที่ตั้งของระบบจะชี้ไปยังจุดศูนย์กลางของโลก แกน  $x$  จะชี้ไปยังทิศเหนือที่แท้จริงในระนาบที่ตั้งฉากกับแกน  $z$  ส่วนแกน  $y$  จะชี้ไปทางทิศตะวันออกตามกฎมือขวาในระบบพิกัดฉาก ดังนั้น แกนของกรอบก็จะหมุนไปเหมือนกับยานพาหนะทั้งในทิศเหนือหรือทิศตะวันออกด้วยเหตุนี้กรอบอ้างอิงแบบ Geocentric จึงไม่ใช่กรอบอ้างอิงเฉื่อย

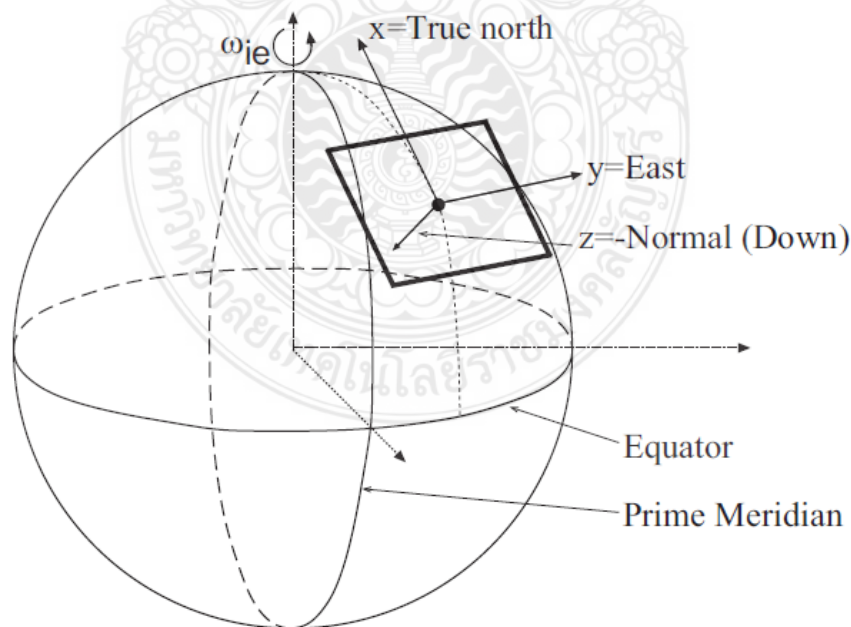


รูปที่ 2.2 อธิบายความแตกต่างระหว่างละติจูดแบบ Geodetic (ด้วยมุม  $\phi$ ) และแบบ Geocentric (ด้วยมุม  $\phi_c$ ) [11]

2.1.5 กรอบอ้างอิงแบบใช้จุดศูนย์กลางโลกเป็นหลักเฉพาะที่ (Local Geodetic) หรือ กรอบอ้างอิงระนาบสัมผัส (Tangent Plane) [11]

กรอบอ้างอิงแบบใช้จุดศูนย์กลางโลกเป็นหลักเฉพาะที่ (Local Geodetic) หรือ กรอบอ้างอิงระนาบสัมผัส (Tangent Plane) หรือ บางครั้งอาจเรียกว่า กรอบอ้างอิงแบบ NED เป็นระบบพิกัดที่เราอ้างอิงในชีวิตประจำวันของเรา โดยมีจุดกำเนิดซึ่งกำหนดโดยการปรับระนาบสัมผัสให้สัมผัสกับวงรีอ้างอิงของโลกที่สนใจ (ระบบภูมิประเทศของโลก, 1984) สำหรับระบบพิกัดนี้ แกน  $x$  จะชี้ไปทางทิศเหนือจริง แกน  $y$  ชี้ไปทางทิศตะวันออก ในขณะที่แกน  $z$  ชี้ลงไปจากพื้นผิวโลกไปยังจุดศูนย์กลางมวลของโลก ตำแหน่งบนระบบพิกัด NED สามารถเทียบกับ ECEF กำหนดโดยใช้มุม 2 มุม ประกอบด้วย  $\lambda$  และ  $\mu$  หมายถึง ลองจิจูด และ ละติจูด ตามลำดับ

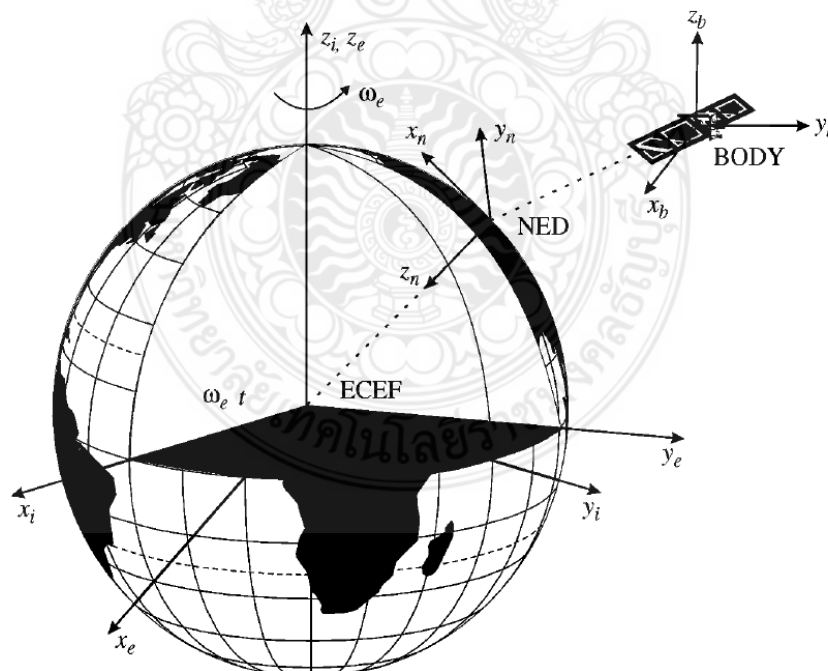
สำหรับยานพาหนะที่ปฏิบัติการในพื้นที่นั้นๆ การประมาณค่าคงที่ของตำแหน่งลองจิจูดและละติจูดที่อยู่บนพื้นผิวสัมผัสของโลกจะใช้สำหรับการนำทาง ซึ่งเรียกว่า “การนำทางแบบโลกแบน” และจะแสดงโดยใช้ตำแหน่งลองจิจูดและละติจูดบนแผนที่เพื่อให้เข้าใจอย่างง่าย สำหรับการนำทางแบบโลกแบนสามารถสรุปได้ว่า กรอบอ้างอิงแบบ NED เป็นกรอบอ้างอิงเฉื่อยและกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันยังคงประยุกต์ใช้ได้อยู่



รูปที่ 2.3 ระบบพิกัดการอ้างอิงพิกัดทางภูมิศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงแบบ ECEF [11]

### 2.1.6 กรอบอ้างอิงวัตถุ (Body-Fixed) [11]

กรอบอ้างอิงวัตถุ คือ กรอบอ้างอิงที่จะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับยานพาหนะ โดยตำแหน่งและการวางตัวของยานพาหนะจะมีความสัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงเฉื่อย (เช่น กรอบอ้างอิง ECEF หรือ NED) ในขณะที่ความเร็วเชิงเส้น  $(u, v, w)$  และความเร็วเชิงมุม  $(p, q, r)$  ของยานพาหนะ จะแสดงในระบบพิกัดของวัตถุ โดยปกติแล้วกรอบอ้างอิงของวัตถุจะกำหนดให้อยู่กับที่ อาทิเช่น จุดศูนย์กลางของแรงโน้มถ่วงของวัตถุหรือจุดศูนย์กลางของมวลของยานพาหนะ ซึ่งจะทำให้การหาสมการจลนศาสตร์ง่ายขึ้นและความเหมาะสมสำหรับการออกแบบระบบควบคุม ความแตกต่างของกรอบอ้างอิง NED และกรอบอ้างอิงวัตถุ คือ กรอบอ้างอิง NED มักจะถูกกำหนดให้เป็นลักษณะยานพาหนะเคลื่อนที่บนพื้นผิวสัมผัสบนพื้นผิววงรีโลกและมีทิศทางแกน  $z$  ซึ่งเข้าหาจุดศูนย์กลางมวลของโลก ซึ่งต่างจากทิศทางที่ต่างไปจากกรอบอ้างอิงวัตถุที่มีทิศทางอ้างอิงไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของในระบบพิกัดวัตถุนั้นๆ ดังนั้น กรอบอ้างอิงวัตถุจึงไม่ใช่กรอบอ้างอิงเฉื่อย ในการประยุกต์ใช้ในการนำทางนั้น โดยการวัดค่าที่ได้มาจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนยานพาหนะ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาตำแหน่งและความเร็วของยานพาหนะ ดังนั้น จึงกำหนดกรอบอ้างอิงของวัตถุที่รวมถึงยานพาหนะและเครื่องมือวัดจึงมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวเนื่องกับระบบพิกัดอีกด้วย



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของกรอบอ้างอิงที่ศูนย์กลางโลก, กรอบอ้างอิงระนาบสัมผัส และกรอบอ้างอิงวัตถุ [11]

### 2.1.7 กรอบอ้างอิงของอุปกรณ์ตรวจวัด [11]

เป็นการพิจารณากรอบอ้างอิงของเซนเซอร์ที่วางอยู่กับที่เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิงของยานพาหนะ จุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์สามารถกำหนดให้อยู่ตรงไหนก็ได้ แต่ระบบพิกัดทั้งสามแกนตั้งฉากซึ่งกันและกันและเป็นไปตามกฎมือขวา แต่ทิศทางนั้นจะขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งานที่ต่างกันไป ดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์เทียบกับจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงวัตถุ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเมทริกซ์การหมุนของกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์ไปยังกรอบอ้างอิงของวัตถุหรือยานพาหนะนั้นจะคงที่และกำหนดได้จากการออกแบบและวางระบบ

## 2.2 การแปลงพิกัดเวกเตอร์เฉพาะ

การนำทางบนภาคพื้นโลก หมายความว่า ตำแหน่งใดๆในระบบพิกัดต่างๆควรเชื่อมโยงกับจุดศูนย์กลางของโลกแทนที่จะเป็นกรอบเฉพาะที่อยู่บนพื้นผิวของโลก ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยความรู้จากส่วนก่อนหน้า

### 2.2.1 การแปลงระบบพิกัดจาก ECEF ไปยังกรอบอ้างอิงระนาบสัมผัส (NED Frame) [11]

ในการแปลงพิกัดระหว่าง ECEF ไปยังกรอบอ้างอิงระนาบสัมผัส จากสมการ

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}^c = [x, y, z]^c - [x_0, y_0, z_0]^c \quad (2.1)$$

โดยที่  $\Delta \hat{\mathbf{x}}^c$  คือ เวกเตอร์จากจุดกำเนิดระบบพิกัดระนาบสัมผัสไปยังตำแหน่งใดๆ กำหนดให้  $\mathbf{P}^c = [x, y, z]^c$  คือ เวกเตอร์และจุดพิกัดแต่ละแกนแสดงความสัมพันธ์กับแต่ละแกนกรอบอ้างอิง ECEF และ  $[x_0, y_0, z_0]^c$  คือ ตำแหน่งของจุดกำเนิดของระบบพิกัด ECEF ในระบบพิกัดระนาบอ้างอิงสัมผัส ในการแปลงเวกเตอร์จากระบบพิกัด ECEF  $[x, y, z]$  ไปยังตำแหน่งใดๆในระบบพิกัดระนาบสัมผัส  $[x'', y'', z'']$  โดยใช้คุณสมบัติเมทริกซ์การหมุน 2 ครั้ง โดยเริ่มจากหมุนรอบแกน z จากเส้นเมริเดียนตั้งต้นไปตามเส้นศูนย์สูตรไปทางทิศตะวันออกให้ตรงกับเส้นเมริเดียนของจุดกำเนิดระบบพิกัดระนาบสัมผัส การหมุนครั้งแรกจะทำให้ได้เมทริกซ์การหมุน  $\mathbf{R}_c^1$  ดังนี้

$$\mathbf{R}_c^1 = [\lambda]_3 = \begin{bmatrix} \cos(\lambda) & \sin(\lambda) & 0 \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ลองจิจูดของจุด  $[x_0, y_0, z_0]^c$  และการหมุนครั้งที่สองรอบแกน  $y'$  ไปยังจุดกำเนิดของระบบพิกัดระนาบสัมผัสจะทำให้ได้เมทริกซ์ ดังนี้

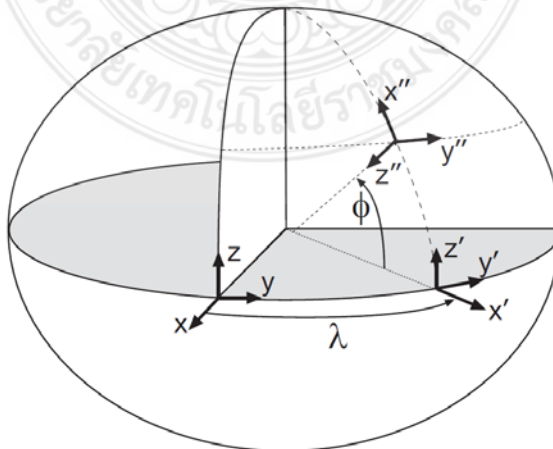
$$\mathbf{R}_1^t = \left[ -\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \right]_2 = \begin{bmatrix} \cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) & 0 & \sin\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) & 0 & \cos\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos(\phi) & 0 & \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\phi$  คือ ลองจิจูดของจุด  $[x_0, y_0, z_0]^c$  ดังนั้น การแปลงเวกเตอร์จากในระบบพิกัด ECEF ไปยังระบบพิกัดระนาบสัมผัส คือ

$$\mathbf{v}^t = \mathbf{R}_c^t \mathbf{v}^e \quad (2.4)$$

โดยที่  $\mathbf{R}_c^t$  คือ เมทริกซ์การหมุนสองครั้งจากระบบพิกัด ECEF ไปยังระบบพิกัดระนาบสัมผัส

$$\mathbf{R}_c^t = \mathbf{R}_1^t \mathbf{R}_c^1 = \begin{bmatrix} -\sin(\phi) \cos(\lambda) & -\sin(\phi) \sin(\lambda) & \cos(\phi) \\ -\sin(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\cos(\phi) \cos(\lambda) & -\cos(\phi) \sin(\lambda) & -\sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.5 การแปลงพิกัดจาก ECEF ไปยังกรอบอ้างอิงระนาบสัมผัสโดยการหมุนสองครั้ง

## 2.2.2 การแปลงระบบพิกัดจาก ECEF ไปยังกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ [11]

ในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้นมีบางจุดที่แตกต่างจากกรอบอ้างอิงแบบอื่นๆ กล่าวคือ ข้อแรก จุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์จะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของยานพาหนะและจะมีการฉายจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงยานพาหนะลงบนผิวโลกวงรีอ้างอิง ดังนั้น ตำแหน่งของยานพาหนะในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์คือ  $\mathbf{x}^g = [0, 0, -h]^T$  โดยละติจูด  $\phi$  และลองจิจูด  $\lambda$  คือการกำหนดตำแหน่งของจุดกำเนิดกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์บนผิวโลกวงรีอ้างอิง และความแตกต่างในข้อสอง คือ ค่าอนุพันธ์  $d\mathbf{x}^g/dt = [0, 0, -\dot{h}]^T$  ไม่ใช่เวกเตอร์ความเร็วของยานพาหนะ ดังนั้นเวกเตอร์ความเร็วที่สัมพันธ์กับโลกในกรอบอ้างอิง ECEF คือ  $\mathbf{v}_e^c = d\mathbf{x}^c/dt$  ซึ่งเวกเตอร์ดังกล่าวสามารถแสดงในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{v}_e^g = \mathbf{R}_e^g \mathbf{v}_e^c \quad (2.6)$$

เมื่อเวกเตอร์  $\mathbf{v}_e^c$  ไม่ใช่อนุพันธ์ของเวกเตอร์ตำแหน่งในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ ( $\mathbf{x}^g$ ) ซึ่งเวกเตอร์ความเร็วที่สัมพันธ์กับโลกแต่ละแกนในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์คือ  $\mathbf{v}_e^g = [v_n, v_e, v_d]^T$  ประกอบด้วยของเวกเตอร์ความเร็วในทิศเหนือ ( $v_n$ ), ความเร็วในทิศตะวันออก ( $v_e$ ) และความเร็วในแนวตั้ง ( $v_d$ ) ตามลำดับ และเมทริกซ์การหมุนจากกรอบอ้างอิง ECEF ไปยังกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ ( $\mathbf{R}_e^g$ ) จะมีรูปแบบเดียวกันกับเมทริกซ์การหมุนจากกรอบอ้างอิง ECEF ไปยังกรอบอ้างอิงระนาบสัมผัส ( $\mathbf{R}_e^t$ ) แต่มีแตกต่างกันตรงที่ เมทริกซ์การหมุนจากกรอบอ้างอิง ECEF ไปยังกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ ( $\mathbf{R}_e^g$ ) จะคำนวณโดยใช้ค่าละติจูด ( $\phi$ ) และลองจิจูด ( $\lambda$ ) ซึ่งเป็นตำแหน่งของยานพาหนะ ณ ขณะเวลาที่สนใจ แต่ทว่า เมทริกซ์การหมุนจากกรอบอ้างอิง ECEF ไปยังกรอบอ้างอิงระนาบสัมผัส ( $\mathbf{R}_e^t$ ) เป็นเมทริกซ์คงที่โดยใช้ค่าละติจูด  $\phi$  และลองจิจูด  $\lambda$  ที่จุดกำเนิดของระนาบสัมผัส ดังนั้นจากสมการที่ 6 จะสามารถแสดงการแปลงระบบพิกัดจาก ECEF ไปยังกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ได้ดังนี้

$$\mathbf{v}_e^g = \begin{bmatrix} v_n \\ v_e \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_M + h)\dot{\phi} \\ \cos(\phi)(R_N + h)\dot{\lambda} \\ -\dot{h} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

และ

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\lambda} \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_n}{R_M + h} \\ \frac{v_e}{\cos(\phi)(R_N + h)} \\ -v_d \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

โดยที่ค่า  $R_M$  = รัศมีในแนวเมริเดียนมีค่าเท่ากับ 6,378,137 เมตร,  $R_N$  รัศมีในแนวตั้งฉากมีค่าเท่ากับ 6,356,752.3 เมตร และ  $h$  คือระดับความสูงเหนือวงรีอ้างอิง

### 2.2.3 การแปลงกรอบอ้างอิงยานพาหนะไปยังกรอบอ้างอิงนำร่อง [11]

จากรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงระบบพิกัดทางภูมิศาสตร์ประกอบด้วยตัวแปร  $[n \ e \ d]^T$  และในระบบพิกัดยานพาหนะจะประกอบด้วยตัวแปร  $[u \ v \ w]^T$  ในความสัมพันธ์ของการแปลงเวกเตอร์กรอบอ้างอิงยานพาหนะและกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์นั้น โดยการใช้เมทริกซ์การหมุนจากเวกเตอร์กรอบอ้างอิงของยานพาหนะไปยังกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ ( $\mathbf{R}_g^b$ ) ซึ่งจะประกอบกับมุมออยเลอร์ โดยมีตัวประกอบคือ มุม โคลง ( $\phi$ ), มุมก้มเงย ( $\theta$ ), มุมหันเห ( $\psi$ ) ด้วยการใช้เมทริกซ์การหมุน 3 แกนของมุมออยเลอร์ ดังนั้น เวกเตอร์ที่แสดงในกรอบทางภูมิศาสตร์ (หรือในกรอบอ้างอิงผิวสัมผัสเฉพาะจุด) สามารถแปลงไปสู่ระบบพิกัดยานพาหนะได้โดยการใช้เมทริกซ์การหมุนทั้งสามมุมร่วมกัน ดังนี้

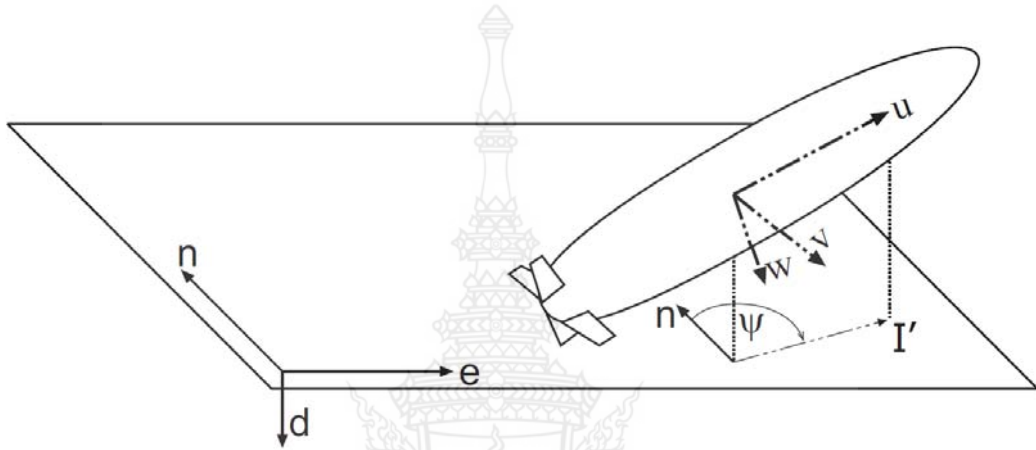
$$\mathbf{v}^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{v}^g$$

$$\mathbf{v}^b = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi c\theta & -s\theta \\ -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & c\theta s\phi \\ s\psi s\phi + c\psi s\theta c\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \mathbf{v}^g$$

$$\mathbf{v}^b = \mathbf{R}_g^b \mathbf{v}^g \quad (2.9)$$



โดยกำหนดให้  $\mathbf{v}^g$  คือส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร็วในกรอบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์,  $\mathbf{v}^b$  คือ ส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร็วในกรอบอ้างอิงของยานพาหนะ และกำหนดให้  $cx = \cos(x), sx = \sin(x)$  โดยมีคุณสมบัติการสลับที่ของเมทริกซ์การแปลงเวกเตอร์ คือ  $\mathbf{v}^g = (\mathbf{R}_g^b)^T \mathbf{v}^b$



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดระนาบสัมผัสและระบบพิกัดยานพาหนะ [11]

#### 2.2.4 การแปลงระบบพิกัดภูมิศาสตร์ไปยังระบบพิกัด Universal Transverse Mercator (UTM) [12]

ระบบพิกัด Universal Transverse Mercator หรือ UTM เป็นระบบพิกัดที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการทหารประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ พ.ศ.2424 สมการการฉายแผนที่แบบ Transverse mercator ที่ใช้กันเป็นรูปแบบของอนุกรมยกกำลัง มีหลายรูปแบบ เช่น Snyder (1987) ดังนี้

องค์ประกอบต่างๆ ของรูปทรงรีที่ใช้เป็นพื้นหลักฐานอ้างอิง และระบบพิกัด UTM ที่ต้องทราบ ได้แก่

- 1) ค่าความยาวกึ่งแกนยาว ( $a = 6,378,137.0$  เมตร) และค่าอัตราการยุบตัว ( $f = 1/298.257223563$ )
- 2) ตัวคูณมาตราส่วน ( $k_0$ ) ของเส้นเมริเดียนกลางซึ่งเท่ากับ  $0.9996$
- 3) ค่าละติจูด ( $\phi_0$ ) และลองจิจูด ( $\lambda_0$ ) ของจุดศูนย์กำเนิด สำหรับประเทศไทยอยู่ในโซน 47 และ 48 โดยที่  $\phi_0 = 0^\circ$  และ  $\lambda_0 = 99^\circ E$  สำหรับโซน 47 และ  $\lambda_0 = 105^\circ E$  สำหรับโซน 48
- 4) ค่าพิกัดเทียม  $E_0$  และ  $N_0$  ที่ใช้สำหรับประเทศอยู่ทางซีกโลกฝั่งเหนือเส้นศูนย์สูตร จะใช้  $E_0 = 500,000$  และ  $N_0 = 0$

ปริมาณที่สำคัญในการคำนวณการแปลงพิกัด UTM คือ ระยะตามแนวเส้นเมริเดียน (Meridian distance,  $M$ ) จากเส้นศูนย์สูตรไปยังตำแหน่งละติจูดที่ต้องการ ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 2.10

$$M = a \left[ \left( 1 - \frac{e^2}{4} - \frac{3e^4}{64} - \frac{5e^6}{256} \right) \phi - \frac{3}{8} \left( e^2 + \frac{e^4}{4} + \frac{15e^6}{128} \right) \sin 2\phi + \frac{15}{256} \left( e^4 + \frac{3e^6}{64} \right) \sin 4\phi - \frac{35e^6}{3072} \sin 6\phi \right] \quad (2.10)$$

โดยที่  $a$  คือ ความยาวกึ่งแกนยาวของพื้นหลักฐานวงรี,  $b$  คือ ความยาวกึ่งแกนสั้นของพื้นหลักฐานทรงรี  $b = a(1-f)$ ,  $e$  = First eccentricity ของทรงรีคำนวณได้จาก  $e = \sqrt{(a^2 - b^2)/a^2}$  และ  $e'$  = Second eccentricity ของทรงรี คำนวณได้จาก  $e' = \sqrt{(a^2 - b^2)/b^2}$  และกำหนดให้  $T = \tan^2 \phi$ ,  $C = e' \cos^2 \phi$ ,  $A = (\lambda - \lambda_0) \cos \phi$  และ  $v = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}$  จากตัวแปรเหล่านี้ สมการสำหรับแปลงค่าจากระบบพิกัดภูมิศาสตร์ไปยังระบบพิกัดฉาก UTM คือ

$$\left. \begin{aligned} X &= E_0 + k_0 v \left[ A + (1 - T + C) \frac{A^3}{6} + (5 - 18T + T^2 + 72C - 58e') \frac{A^5}{120} \right] \\ Y &= N_0 + k_0 \left\{ M + v \tan \phi \left[ \frac{A^2}{2} + (5 - T + 9C + 4C^2) \frac{A^4}{24} + (61 - 58T - T^2 + 600C - 330e'^2) \frac{A^6}{720} \right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

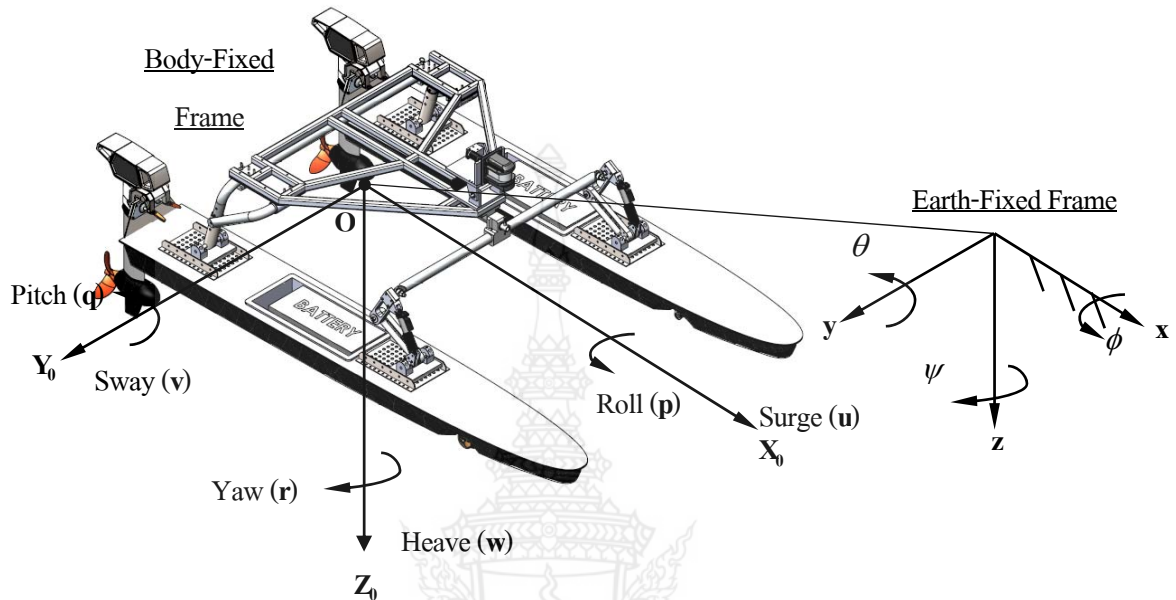
### 2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์เรือสองท่อน [13]

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานพาหนะทางน้ำใดๆก็ตามจะใช้การวิเคราะห์ร่วมกันทั้งสถิตยศาสตร์ (Statics) และพลศาสตร์ (Dynamics) ในส่วนของพลศาสตร์นั้นยังแบ่งการวิเคราะห์ออกได้เป็น จลนศาสตร์ (Kinematics) ซึ่งเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ตามหลักเรขาคณิต และ จลนพลศาสตร์ (Kinetics) ซึ่งเกี่ยวกับแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่

#### 2.3.1 จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์เรือสองท่อน [13]

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองท่อนสามารถอธิบายได้ใน 2 ระบบพิกัดฉาก คือ ระบบพิกัดฉากเทียบกับจุดบนเรือ (หรือ Body-Fixed Frame) และ ระบบพิกัดฉากเทียบกับแกนโลก (หรือ Earth-Fixed frame) ในระบบพิกัดฉากเทียบกับจุดบนเรือ จะกำหนดจุดกำเนิด  $O$  ให้อยู่ที่จุดศูนย์กลางมวลของเรือ (C.G.) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ และกำหนดให้แกน  $X_0$  มีทิศทางไปทางด้านหน้าตามแนวความยาวของเรือ (หรือเรียกว่า Longitudinal Axis) ส่วนแกน  $Y_0$  มีทิศทางไปทาง

ด้านขวา (Starboard) ของเรือ (หรือเรียกว่า Transverse Axis) และ แกน  $Z_0$  มีชี้จากบนลงล่าง (หรือเรียกว่า Normal Axis) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดฉากของเรือและระบบพิกัดฉากของโลก

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรต่างๆที่ถูกกำหนดโดยจาก SNAME (1950)

องศาอิสระที่	การเคลื่อนที่เชิงเส้น / เชิงมุม	แรงและโมเมนต์	ความเร็วเชิงเส้นและเร็วเชิงมุม	ตำแหน่งบนพื้นผิวโลกและมุมออยเลอร์
1	การเคลื่อนที่เชิงเส้นในแนวแกน $x$ (Surge)	$X$	$u$	$x$
2	การเคลื่อนที่เชิงเส้นในแนวแกน $y$ (Sway)	$Y$	$v$	$y$
3	การเคลื่อนที่เชิงเส้นในแนวแกน $z$ (Heave)	$Z$	$w$	$z$
4	การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน $x$ (Roll, Heel)	$K$	$p$	$\phi$
5	การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน $y$ (Pitch, Trim)	$M$	$q$	$\theta$
6	การเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน $z$ (Yaw)	$N$	$r$	$\psi$

การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองท่อนสามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกน 3 มิติในระบบพิกัดฉากเทียบกับจุดบนเรือ จะมีองศาอิสระได้สูงสุด 6 ตัวแปรดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยแยกเป็นการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น 3 ทิศทาง คือ Surge , Sway , Heave และ การเคลื่อนที่เชิงมุม 3 ทิศทาง คือ Roll , Pitch , Yaw โดยมีทิศทางเป็นบวกตามกฎมือขวา เช่นเดียวกันตำแหน่งหรือมุมใดๆในระบบพิกัดเทียบกับแกนโลก ซึ่งอธิบายด้วยตัวแปรของตำแหน่งและมุมออยเลอร์

ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองท่อนสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ในกรอบอ้างอิงวัตถุที่เป็นค่าสัมพัทธ์กับกรอบอ้างอิงที่ติดกับแกนโลก สำหรับการเคลื่อนที่ของยานพาหนะทางน้ำใดๆมักจะสมมติฐานว่าความเร่งเนื่องจากจุดใดๆบนพื้นผิวของโลกมีน้อยมาก ดังนั้นแล้ว กรอบอ้างอิงของโลกแบบ Earth-Center-Earth-Fixed หรือ ECEF ในระบบพิกัด xyz จะสามารถพิจารณาเป็นกรอบอ้างอิงเฉื่อยได้ โดยปกติแล้วในการอธิบายตำแหน่งและการวางตัวของลำเรือที่เทียบกับกรอบอ้างอิงแบบเฉื่อยสามารถกำหนดตัวแปรการเคลื่อนที่ใน 6 องศาอิสระในรูปแบบเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\eta} &= [\boldsymbol{\eta}_1^T, \boldsymbol{\eta}_2^T]^T; & \boldsymbol{\eta}_1 &= [x, y, z]^T; & \boldsymbol{\eta}_2 &= [\phi, \theta, \psi]^T; \\ \mathbf{v} &= [\mathbf{v}_1^T, \mathbf{v}_2^T]^T; & \mathbf{v}_1 &= [u, v, w]^T; & \mathbf{v}_2 &= [p, q, r]^T; \\ \boldsymbol{\tau} &= [\boldsymbol{\tau}_1^T, \boldsymbol{\tau}_2^T]^T; & \boldsymbol{\tau}_1 &= [X, Y, Z]^T; & \boldsymbol{\tau}_2 &= [K, M, N]^T; \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.12) จะมี  $\boldsymbol{\eta}$  คือ ส่วนประกอบของเวกเตอร์ของตำแหน่งและการวางตัวเมื่อเทียบกับระบบพิกัดของโลก  $\mathbf{v}$  คือ ส่วนประกอบของเวกเตอร์ของความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมเมื่อเทียบกับระบบพิกัดของเรือ และ  $\boldsymbol{\tau}$  คือ ส่วนประกอบของเวกเตอร์ของแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อตัวเรือโดยอ้างอิงกับระบบพิกัดของเรือ

## 2.3.2 ความสัมพันธ์ทางจลนศาสตร์ (Kinematics) โดยใช้มุมออยเลอร์ [13]

### 2.3.2.1 เมทริกซ์การหมุน (Rotation Matrix)

เมทริกซ์การหมุนอย่างง่ายโดยพื้นฐานแล้วจะอาศัยการหมุนทีละแกน โดยการกำหนดสัญลักษณ์เมทริกซ์การหมุนในรูปทั่วไป คือ  $\mathbf{C}_{i,\alpha}$  ซึ่งกำหนดให้  $\alpha$  แทนมุมใดๆที่หมุนรอบแกน  $i$  ซึ่งผลจากการหมุนรอบแกนต่างๆอย่างง่าย สามารถแสดงได้จากเมทริกซ์การหมุนดังนี้

$$\mathbf{C}_{x,f} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & \theta \\ c\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2.13)$$

เมื่อ  $s \cdot = \sin(\cdot)$ ,  $c \cdot = \cos(\cdot)$  ซึ่งแสดงแทนสัญลักษณ์อย่างง่ายในเมทริกซ์การหมุน

### 2.3.2.2 การแปลงความเร็วเชิงเส้นในระบบพิกัดของเรือไปสู่ระบบพิกัดของโลก [13]

ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ของความเร็วเชิงเส้นในระบบพิกัดของเรือสามารถแปลงให้เป็นเวกเตอร์ของความเร็วเชิงเส้นในระบบพิกัดของโลกโดยอาศัยการแปลงด้วยมุมออยเลอร์โดยกำหนดค่าให้เมทริกซ์การหมุนรวมกันใน 3 แนวแกนที่แทนด้วยสัญลักษณ์  $\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)$  ดังในสมการด้านล่างนี้

$$\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) = \mathbf{C}_{z,\psi} \mathbf{C}_{y,\theta} \mathbf{C}_{x,f} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

ดังนั้น สมการการแปลงเวกเตอร์ของความเร็วเชิงเส้นในระบบพิกัดของเรือให้อยู่ในระบบพิกัดของโลก นั้นแสดงในสมการที่ (2.11)

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) \mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

### 2.3.2.3 การแปลงความเร็วเชิงมุมในระบบพิกัดของเรือไปสู่ระบบพิกัดของโลก [13]

เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมในระบบพิกัดของเรือประกอบด้วยตัวแปร  $\mathbf{v}_2 = [p, q, r]^T$  ที่สัมพันธ์กับ เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมในระบบพิกัดของโลก  $\boldsymbol{\eta}_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$  ด้วยเมทริกซ์การแปลงความเร็วเชิงมุม  $\mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2)$  ดังสมการที่ (2.14)

$$\dot{\eta}_2 = \mathbf{J}_2(\eta_2)\mathbf{v}_2$$

โดยที่เมทริกซ์การแปลงความเร็วเชิงมุม  $\mathbf{J}_2(\eta_2)$  คือ

$$\mathbf{J}_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi / c\theta & c\phi / c\theta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

โดยการแทนสัญกรณ์อย่างง่าย คือ  $s \cdot = \sin(\cdot)$ ,  $c \cdot = \cos(\cdot)$ ,  $t \cdot = \tan(\cdot)$  ดังนั้น สมการการแปลงเวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมในระบบพิกัดของเรือที่สัมพันธ์กับเวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมในระบบพิกัดของโลก คือ

$$\dot{\eta}_2 = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_2(\eta_2)\mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi / c\theta & c\phi / c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

ดังนั้น สมการจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์เรือสองท่อน จะสามารถอธิบายได้จากการรวมกันของความสัมพันธ์ของความเร็วแบบเชิงเส้นและแบบเชิงมุมทั้งสองสมการที่ (2.11) และ (2.13) ในระบบพิกัดของเรือไปสู่ในระบบพิกัดของโลก จะได้สมการจลนศาสตร์รวมในรูปเวกเตอร์ คือ

$$\dot{\eta} = \mathbf{J}(\eta)\mathbf{v} = \begin{bmatrix} [\dot{\eta}_1]_{3 \times 1} \\ [\dot{\eta}_2]_{3 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{J}_1(\eta_1)]_{3 \times 3} & [\mathbf{0}]_{3 \times 3} \\ [\mathbf{0}]_{3 \times 3} & [\mathbf{J}_2(\eta_2)]_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\mathbf{v}_1]_{3 \times 1} \\ [\mathbf{v}_2]_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

เพื่อลดความซับซ้อนของสมการในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่หุ่นยนต์เรือสองท่อนที่เคลื่อนที่อยู่บนผิวน้ำ จึงตั้งสมมติฐานว่าค่าความเร็วในแนวตั้ง Heave (หรือ  $\mathbf{w}$ ) , มุมการโคลงของเรือ Roll (หรือ  $\mathbf{p}$ ) และ มุมการก้มเงยของเรือ Pitch (หรือ  $\mathbf{q}$ ) นั้นมีขนาดที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับพื้นผิวของโลก ทำให้การวิเคราะห์สมการเคลื่อนที่ของเรือสามารถตัดตัวแปรสามตัวดังกล่าวออกไปได้ ดังนั้น การวิเคราะห์ตัวแปรสถานะในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองท่อนจึงเหลือแค่เพียง ความเร็วเชิงเส้นในการเดินทางของเรือ Surge (หรือ  $\mathbf{u}$ ) , ความเร็วเชิงเส้นในการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ซ้าย-ขวา Sway ( $\mathbf{v}$ ) และ

ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของหัวเรือ Yaw (หรือ  $r$ ) ซึ่งจะสามารถนำมาเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ของเวกเตอร์ตัวแปรสถานะในระบบพิกัดฉากเทียบกับจุดบนเรือ ได้เป็น  $\mathbf{v} = [u \ v \ r]^T$  ดังนั้น สมการจลศาสตร์ในระบบพิกัดของเรือ ไปสู่ระบบพิกัดของโลก จะสามารถลดรูปเหลือดังสมการที่ (2.17)

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

### 2.3.3 พลศาสตร์ของหุ่นยนต์เรือสองท่อน [18,19]

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน สมการพลศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของหุ่นยนต์เรือสองท่อนที่พิจารณาการเคลื่อนที่ใน 3 องศาอิสระตามระบบพิกัดของเรือ ดังสมการ

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v}) + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $\mathbf{M}$  คือ เมทริกซ์ของมวลและความเฉื่อยของเรือ ที่ประกอบด้วย เมทริกซ์ของมวลและความเฉื่อยของเรือเสมือนวัตถุแข็งเกร็ง ( $\mathbf{M}_{RB}$ ) ที่พิจารณารวมกับ เมทริกซ์ของมวลและความเฉื่อยของน้ำที่เกิดขึ้นจากผลของแรงทางอุทกพลศาสตร์ของเรือ ( $\mathbf{M}_A$ ) ดังสมการ

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_G \\ 0 & mx_G & I_{xx} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -Y_{\dot{v}} & -N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

และ  $\mathbf{C}(\mathbf{v})$  คือ เมทริกซ์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงสู่ศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของเรือเสมือนวัตถุแข็งเกร็ง ( $\mathbf{C}_{RB}$ ) รวมกับเมทริกซ์ของเมทริกซ์แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงสู่ศูนย์กลางจากผลของแรงทางอุทกพลศาสตร์ ดังสมการ

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_G r + v) & -mu & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_v v + Y_r r \\ 0 & 0 & -X_u u \\ -Y_v v - Y_r r & X_u u & 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

และ  $\mathbf{D}$  คือ เมทริกซ์ความหน่วงจากผลของแรงทางอุทกพลศาสตร์แบบเชิงเส้น ดังสมการ

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \mathbf{D}_p(\mathbf{v}) + \mathbf{D}_s(\mathbf{v}) + \mathbf{D}_w(\mathbf{v}) + \mathbf{D}_M(\mathbf{v}) \quad (2.23)$$

เมื่อ  $\mathbf{D}_p(\mathbf{v})$  คือเทอมฟังก์ชันของ Potential Damping,  $\mathbf{D}_s(\mathbf{v})$  คือเทอมฟังก์ชันของ Skin friction,  $\mathbf{D}_w(\mathbf{v})$  คือเทอมฟังก์ชันของ Wave drift damping และ  $\mathbf{D}_M(\mathbf{v})$  คือเทอมฟังก์ชันของ Damping จาก Vortex shedding ดังนั้น เมทริกซ์ความหน่วงจะมีรูปแบบดังนี้

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -Y_r & -N_r \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

และ  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  คือเมทริกซ์ของเวกเตอร์ในเทอมของแรงคืนกลับสู่สมดุลที่สัมพันธ์กับความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก  $f_G$  และแรงลอยตัว  $f_B$  ที่สัมพันธ์กับเส้นความสูงเมตาเซนตริก แต่ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ใน 3 แนวแกน เมทริกซ์ของเวกเตอร์  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = [0]$  เพราะไม่ได้พิจารณาความเร็วของการเคลื่อนที่ในทิศทางในแนวตั้ง Heave ( $\mathbf{w}$ )

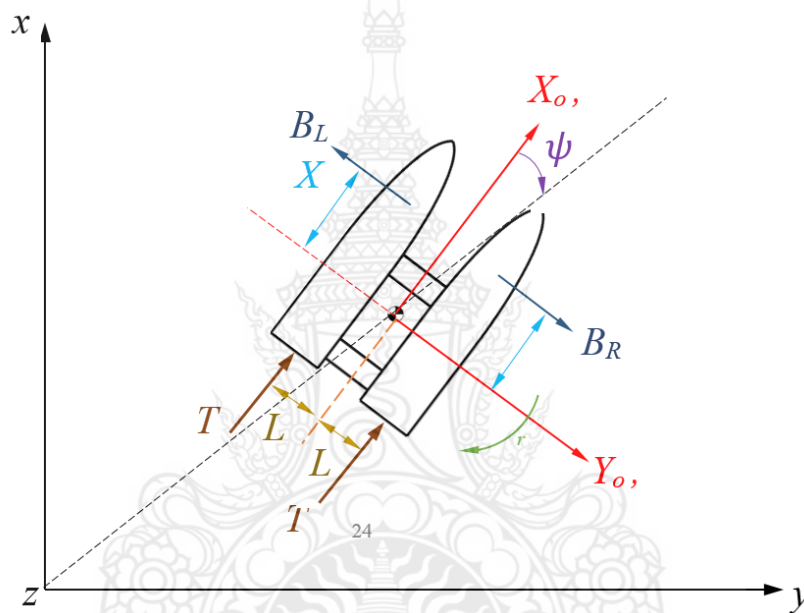
และ  $\boldsymbol{\tau}$  คือเมทริกซ์ของเวกเตอร์ของแรงและโมเมนต์จากภายนอกที่กระทำกับจุดอ้างอิง( $\mathbf{O}$ ) ของลำเรือ สำหรับการพิจารณาการเคลื่อนที่ในระบบพิกัดของเรือแบบเชิงเส้นใน 2 แนว และแบบเชิงมุมอีก 1 แนว เป็น  $\mathbf{v} = [u \quad v \quad r]^T$  ดังนั้นเมทริกซ์ของเวกเตอร์  $\boldsymbol{\tau}$  จะได้เป็น

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} \quad (2.25)$$



### 2.3.4 สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองท่อน [14]

ในงานวิจัยนี้ หุ่นยนต์เรือสองท่อนจะติดตั้งมอเตอร์ใบพัดขับเคลื่อนท้าย จำนวน 2 เครื่อง ทางท้ายลำเรือของแต่ละท่อน และได้ติดตั้งมอเตอร์ใบพัดทางด้านหัวเรือ อีกจำนวน 2 ตัว โดยมอเตอร์ใบพัดขับเคลื่อนท้ายจะติดตั้งแบบหมุนไม่ได้ และก่อให้เกิดแรงผลักดันเฉพาะตามแนวแกน Longitudinal Axis ของเรือเท่านั้น ส่วนมอเตอร์ใบพัดหน้าติดตั้งแบบหมุนไม่ได้บริเวณด้านหน้าของแต่ละท่อนของเรือแบบสองท่อน ซึ่งทำให้เกิดแรงผลักดันเฉพาะแนวแกน Transverse Axis ของเรือ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพวัตถุอิสระของหุ่นยนต์เรือสองท่อน [14]

การวิเคราะห์แรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อจุดอ้างอิงของลำเรือ (หรือ จุด O) ในระบบพิกัดเทียบกับจุดบนเรือ (Body-Fixed Frame) โดยใช้แผนภาพวัตถุอิสระของหุ่นยนต์เรือสองท่อนดังแสดงรูปที่ 2.8 โดยกำหนดให้แรงผลักดันจากใบพัดท้าย คือ  $[T_L \ T_R]^T$  และแรงผลักดันจากใบพัดหน้า คือ  $[-B_L \ B_R]^T$  ในการวิเคราะห์แรงและโมเมนต์รอบจุดอ้างอิง สามารถแสดงผลรวมของแรงและโมเมนต์ได้ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \text{ผลรวมของแรงในแนวแกน } X_o : \quad \Sigma F_{X_o} &= T_L + T_R \\ \text{ผลรวมของแรงในแนวแกน } Y_o : \quad \Sigma F_{Y_o} &= -B_L + B_R \\ \text{ผลรวมของโมเมนต์รอบจุด C.G. : } \Sigma M_{CG} &= -B_L X_B + B_R X_B + T_L L_L - T_R L_R \end{aligned} \right\} (2.26)$$

จากสมการที่ 2.21 และ 2.22 สามารถจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ว่า

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ -X_B & X_B & L_L & -L_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_L \\ B_R \\ T_L \\ T_R \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

โดยเมทริกซ์อินพุต (B) คือ

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ -X_B & X_B & L_L & -L_R \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

และ อินพุต (u) ที่สามารถควบคุมแรงจากใบพัดได้ คือ

$$\mathbf{u} = [B_L \quad B_R \quad T_L \quad T_R]^T \quad (2.29)$$

### 2.3.5 สมการพลศาสตร์ของหุ่นยนต์เรือสองท่อนในระบบพิกัดของโลก

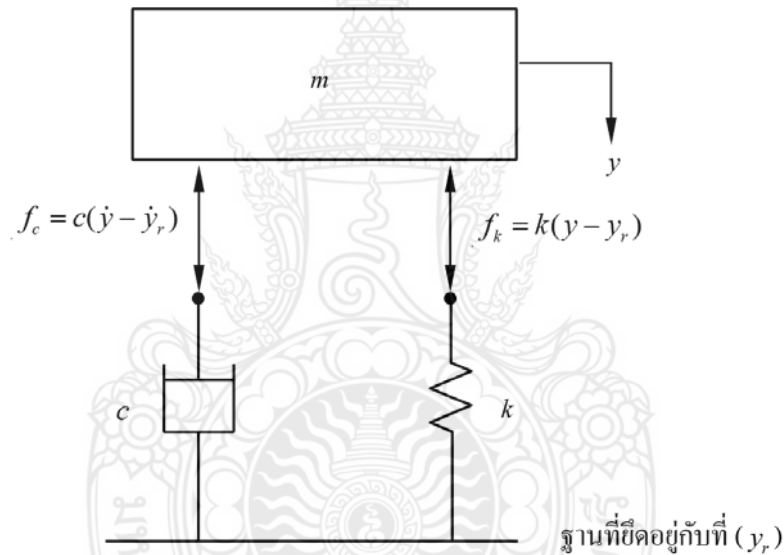
ในการแปลงสมการพลศาสตร์ของหุ่นยนต์เรือสองท่อนในระบบพิกัดของเรือในสมการที่ (2.16) ไปสู่ระบบพิกัดของโลก ดังสมการ

$$\mathbf{M}_\eta(\eta)\ddot{\eta} + \mathbf{C}_\eta(\mathbf{v}, \eta)\dot{\eta} + \mathbf{D}_\eta(\mathbf{v}, \eta) + \mathbf{g}_\eta(\eta) = \mathbf{J}^{-T}(\eta)\mathbf{B}\mathbf{u} \quad (2.30)$$

โดยที่  $\boldsymbol{\eta}$  คือ เมทริกซ์ของตัวแปรสถานะในระบบพิกัดโลก  $[x \quad y \quad \psi]^T$

## 2.4 ทฤษฎีการควบคุมการส่งผ่านการสั่นสะเทือนเชิงกล [15]

การสั่นสะเทือนในหุ่นยนต์เรือสองหุ่นนั้น มีสาเหตุหลักมาจากคลื่นน้ำที่เข้ามาปะทะทางด้านหน้าของเรือ ส่งผลให้การตรวจวัดระยะทางวัตถุด้วยเซนเซอร์เลเซอร์มีความคลาดเคลื่อน ถึงแม้ว่าการสั่นสะเทือนจะคลื่นน้ำจะเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่ก็อาจควบคุมให้การสั่นสะเทือนลดลงได้ ดังนั้น เพื่อลดการสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านจากลำเรือไปยังเซนเซอร์เลเซอร์ ในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบระบบรองรับการสั่นสะเทือนเชิงกลที่มีผลมาจากคลื่นน้ำที่เข้ามาปะทะทางด้านหน้าของเรือ ในการควบคุมการส่งผ่านการสั่นสะเทือนทำได้โดยออกแบบสปริงและตัวหน่วงที่มีค่าเหมาะสมสำหรับระบบการสั่นสะเทือน โดยพิจารณาจากสมการการเคลื่อนที่ของระบบการสั่นสะเทือนจากกฎข้อที่สองของนิวตัน ดังนี้



รูปที่ 2.9 แผนผังวัตถุอิสระแบบจำลองการสั่นสะเทือนทางกลจากการสั่นสะเทือนของพื้น

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน

$$\Sigma F_y = ma_y$$

$$-c(\dot{y} - \dot{y}_r) - k(y - y_r) = m\ddot{y}$$

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = 2\xi\omega_n\dot{y}_r + \omega_n^2 y_r \quad (2.31)$$

เมื่อกำหนดให้การเคลื่อนที่ของฐานยึดเป็นแบบฮาร์โมนิก

$$y(t) = Y \cos \omega t = \text{Re}[Y e^{j\omega t}]$$

การตอบสนองในรูปแบบเชิงซ้อนคือ

$$z(t) = Z e^{j\omega t}$$

$$\text{และ } x(t) = \text{Re}[z(t)]$$

แทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ (2.31) และให้  $r = \omega / \omega_n$  จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการเคลื่อนที่ของวัตถุด้านบนและการสั่นสะเทือนจากลำเรือ ดังนี้

$$\frac{Y}{Y_r} = |T(\omega)| = \sqrt{\frac{1 + (2\xi r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (2.32)$$

สมการที่ 2.32 เรียกว่า สมการอัตราส่วนการส่งผ่านระยะขจัดจากการสั่นสะเทือนที่ต้องการออกแบบ (Displacement Transmissibility หรือ T.R.) ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการเคลื่อนที่ของวัตถุ  $Y$  กับขนาดการสั่นสะเทือนของลำเรือ  $Y_r$  อัตราส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าวัตถุด้านบนจะเคลื่อนที่ไปเท่าไรเมื่อให้การกระตุ้น โดยการสั่นของพื้นที่มีความถี่ต่างๆ โดยความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.3) จะสามารถแสดงดังในรูปที่ 2.11 และส่วนขยายช่วงอัตราส่วนความถี่มากกว่า  $\sqrt{2}$  ในรูปที่ 2.12

นอกเหนือจากการพิจารณาการส่งผ่านการสั่นสะเทือนแล้ว การพิจารณาขนาดของแรงที่ส่งผ่านก็จำเป็นที่จะต้องพิจารณาเช่นกัน จากแผนภาพวัตถุอิสระ (Free Body Diagram) ในรูปที่ 2.13 จะได้ว่าแรงส่งผ่านมีค่าเท่ากับผลบวกของแรงที่ส่งผ่านโดยสปริง และส่งผ่านโดยตัวหน่วงการสั่นสะเทือน และจากสมการการเคลื่อนที่ จะได้ว่าแรงนี้มีค่าเท่ากับ  $-m\ddot{y}$  ดังสมการ

$$F(t) = k(y - y_r) - c(\dot{y} - \dot{y}_r) = m\ddot{y}$$

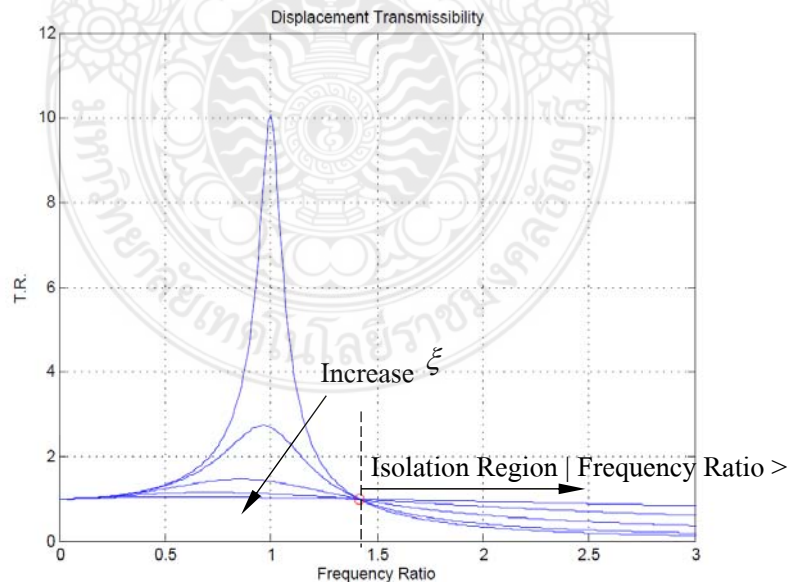
ดังนั้น จะได้ว่า

$$F(t) = m\omega^2 Y_r \cos(\omega t + \theta) = m\omega^2 Y_r |T(\omega)| \cos(\omega t + \theta) = F_T \cos(\omega t + \theta)$$

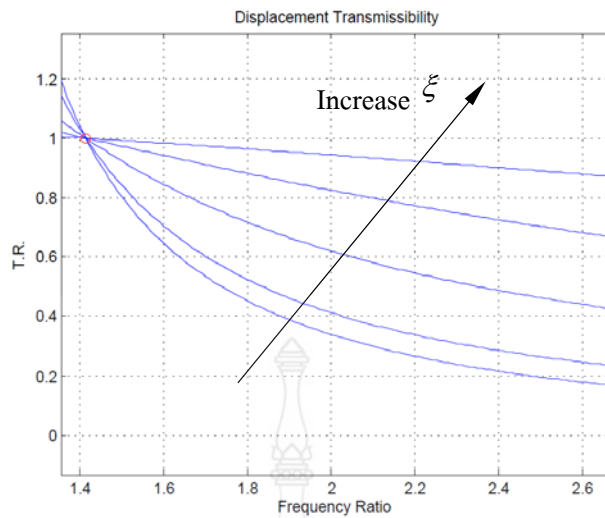
$$\frac{F_T}{kY_r} = |T(\omega)| = r^2 \sqrt{\frac{1 + (2\xi r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (2.33)$$

สมการที่ (2.4) เรียกว่า สมการอัตราส่วนการส่งผ่านแรงจากการสั่นสะเทือนที่ ต้องการออกแบบ หรือ Force transmissibility ( $F_T$ ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนแสดงขนาดแรงส่งผ่านที่ความถี่ ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแสดงขนาดแรงส่งผ่านที่ เปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนความถี่ ( $r$ ) และอัตราส่วนความหน่วง ( $\xi$ )

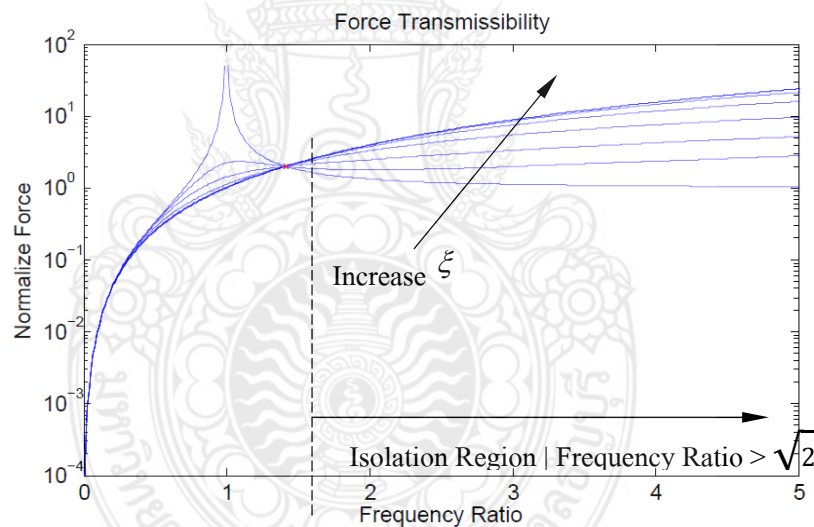
จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่อินพุตมีค่าน้อยๆ อัตราส่วนการส่งผ่านระยะ ขจัดจะมีค่าเข้าใกล้ 1 คือ การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับลำเรือจะใกล้เคียงกับฐานของมวลด้านบน และ อัตราส่วนการส่งผ่านระยะขจัดก็จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความถี่อินพุตเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของระบบ และจะพบว่า อัตราส่วนการส่งผ่านระยะขจัดจะเริ่มลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วง Isolation ซึ่งสามารถทำได้โดย ลดค่าความแข็งของสปริง ( $k$ ) และเพิ่มมวล ( $m$ ) ให้กับระบบการสั่นสะเทือน สำหรับการ เพิ่มอัตราส่วนความหน่วง นั้น พบว่า สามารถลดขนาดการส่งผ่านระยะขจัดในช่วงเข้าใกล้ความถี่ ธรรมชาติได้มาก แต่ในขณะเดียวกัน การเพิ่มอัตราส่วนความหน่วง ทำให้ขนาดของการส่งผ่านระยะ ขจัดกลับเพิ่มมากขึ้นตามความถี่ที่มากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการส่งผ่านระยะขจัดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ ต่างๆ



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่งผ่านระยะขจัดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่างๆ ณ บริเวณส่วนขยายช่วงอัตราส่วนความถี่มากกว่า  $\sqrt{2}$

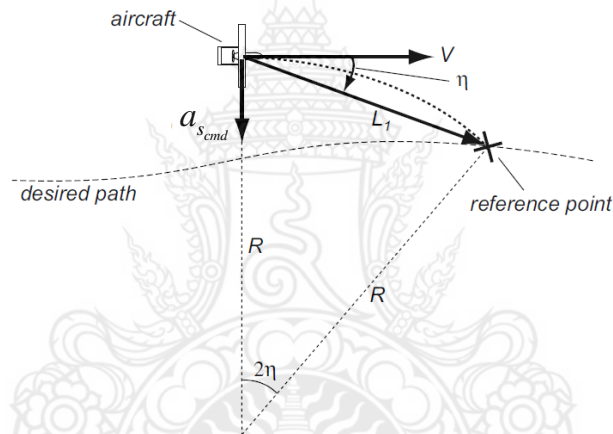


รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่งผ่านแรงที่ความถี่ต่างๆ

จากรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มอัตราส่วนความหน่วง ( $\zeta$ ) พบว่า สามารถลดขนาดการส่งผ่านระยะขจัดในช่วงเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติ แต่ก็ทำให้ขนาดของการส่งผ่านแรงกลับเพิ่มมากขึ้นในช่วง Isolation เช่นเดียวกับ Displacement transmissibility ดังนั้น การเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงมากเกินไปจึงไม่เป็นผลดีต่อระบบการสั่นสะเทือนเมื่อความถี่ที่มากกระตุ้นมีค่ามาก

## 2.5 ทรรกะการนำทางแบบไม่เชิงเส้นสำหรับการติดตามเส้นวิถีโคจร [16]

ระบบการนำทางนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับยานพาหนะอัตโนมัติ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ ทรรกะการนำทางแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยตัวควบคุมป้อนกลับแบบเชิงเส้น ที่มีความสามารถติดตาม เส้นวิถีโคจร ในส่วนการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบตรงนั้นจะคล้ายคลึงกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ (PD) และในส่วนการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบโค้งจะใช้การควบคุมล่วงหน้าช่วยให้สามารถ ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบโค้งได้อย่างราบรื่น วิธีนี้สามารถติดตามเส้นวิถีโคจรโดยเสมือนว่ามีความเร่ง ศูนย์ศูนย์กลางจำลองหรือความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ ดังในสมการที่ (2.34) เพื่อให้ยานพาหนะเข้าสู่หาเส้นทางวิถีโคจร จะใช้ความเร็วและมุมหันของยานพาหนะเพื่อช่วยในการคำนวณ ที่แสดงได้ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนผังแนวคิดของทรรกะการนำทาง และ ตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง [16]

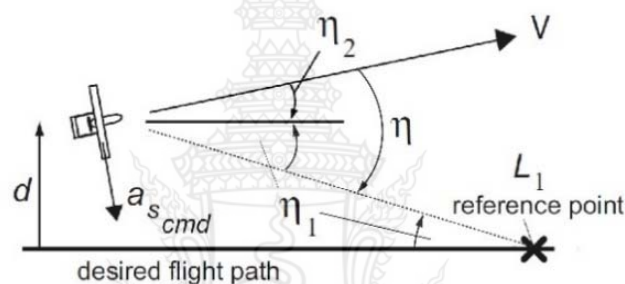
โดยกำหนดสมการความเร่งด้านข้างหรือความเร่งศูนย์ศูนย์กลาง คือ

$$a_{s_{cmd}} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \quad (2.34)$$

เมื่อ  $a_{s_{cmd}}$  คือ ความเร่งด้านข้างที่มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของเวกเตอร์ความเร็วของยานพาหนะ,  $V$  คือ เวกเตอร์ความเร็วของยานพาหนะ,  $L_1$  คือ เส้นที่กำหนดจากตำแหน่งยานพาหนะไปยังจุดอ้างอิง บนวิถีที่ต้องการ  $\eta$  มุมที่เกิดขึ้นจากเวกเตอร์ความเร็วของยานพาหนะ ( $V$ ) ไปยังเส้นทางวิถีโคจร ตามแนว  $L_1$  (โดยมี ทิศทางตามเข็มนาฬิกาเป็นบวก)

ในการวิเคราะห์การติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรง ที่แสดงคุณลักษณะสำคัญนั้นจะศึกษาจาก 2 ตัวแปร คือ ระยะการขจัดตามแนวเส้นตรง  $L_1$  ระหว่างยานพาหนะกับจุดอ้างอิง (Reference point) บนเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการ (Design flight path) และมุม  $\eta$  ระหว่างเวกเตอร์ความเร็ว ( $V$ ) และแนวเส้นตรง  $L_1$  ซึ่งจะสามารถใช้การวิเคราะห์ด้วยระบบเชิงเส้นอันดับสอง โดยกำหนดให้ตัวแปรในระบบเชิงเส้นอันดับสองเป็น  $d$  ที่นิยามเป็นค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ Cross-track error) และสมมติว่ามุม  $\eta$  มีขนาดเล็กๆ ซึ่ง

$$\sin \eta \approx \eta = \eta_1 + \eta_2 \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.14 แบบจำลองการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรง [16]

จากรูปที่ 2.14 สำหรับสามเหลี่ยมด้านล่าง จะได้  $\eta_1 \approx d/L_1$  และสามเหลี่ยมด้านบนจะได้  $\eta_2 \approx \dot{d}/V$  เมื่อแทน  $\eta_1$  และ  $\eta_2$  ลงในสมการที่ (2.35) และ แทน  $\sin \eta$  กลับเข้าไปในสมการที่ (2.34) จะได้สมการตรรกะการนำทางในรูปแบบระบบเชิงเส้นอันดับสอง ดังนี้

$$a_{s_{cmd}} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \approx 2 \frac{V}{L_1} \left( \dot{d} + \frac{V}{L_1} d \right) \quad (2.36)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 2.37 กับตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ (PD Controller) โดยกำหนดให้  $(2V^2/L_1^2)$  คือ เทอมที่เสมือนตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional หรือ P)  $(2V/L_1)$  คือ เทอมของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative หรือ D)

ในการหาระยะห่างระหว่างยานพาหนะและเส้นทางวิถีโคจรตามแนว  $L_1$  สามารถคำนวณได้โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยแบบจำลองของระบบที่เป็นแบบเชิงเส้น ที่ประกอบด้วยตัวควบคุม



แบบเชิงเส้นและระบบควบคุมจากสมการที่ (2.34) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณและวิเคราะห์เสถียรภาพ จะสมมติว่า ไม่มีคิพพลศาสตร์ของยานพาหนะ และ สันนิษฐานว่ามุม  $\eta_2$  มีขนาดเล็ก ๆ และแทนค่าสั่งของความเร่งสู่ศูนย์กลางเป็น  $a_{s_{cmd}} \approx -\ddot{d}$  ในสมการที่ (2.34) จะได้ว่า

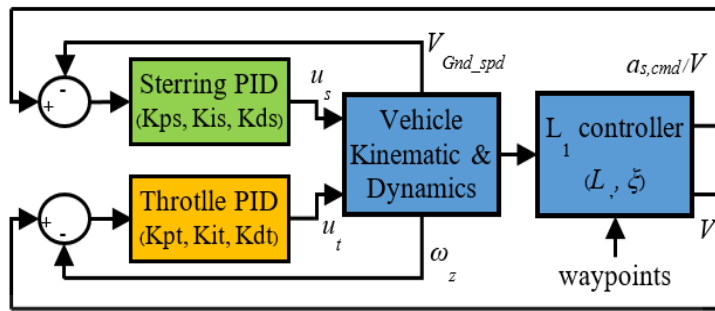
$$\ddot{d} + 2\xi\omega_n\dot{d} + \omega_n^2d = 0 \quad (2.37)$$

โดยค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบ ( $\xi$ ) คือ  $\xi = 1/\sqrt{2}$  หรือค่าอัตราส่วนความหน่วงวิกฤติและค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ ( $\omega_n$ ) คือ  $\omega_n = \sqrt{2}V/L_1$  จากสมการที่ (2.37) สำหรับกรณีเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงที่เป็นระบบแบบเชิงอันดับสองที่มีอัตราส่วนความหน่วงวิกฤตินั้น ความถี่ธรรมชาติจะถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของความเร็วของยานพาหนะที่ต้องการ ( $V$ ) และ ระยะการขจัดระหว่างยานพาหนะและเส้นทางวิถีโคจรสำหรับการเลือกจุดอ้างอิง ( $L_1$ )

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

$$\Delta\psi = \frac{a_s}{V} \Delta t \quad (2.38)$$

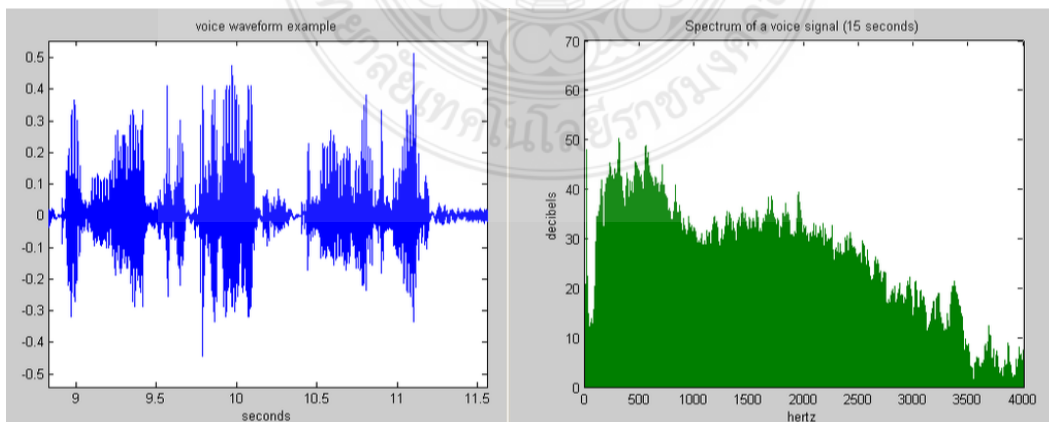
เมื่อ  $\Delta t$  คือ ผลต่างของเวลาในรูปการควบคุม ฉะนั้นจะสามารถพิจารณา ( $\Delta\psi$ ) ได้เสมือนกับค่าความผิดพลาดของมุมเลี้ยวของหัวเรือ ( $e_s$ ) ที่จะนำมาใช้ในการป้อนกลับด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี ที่มีพารามิเตอร์ของระบบควบคุมเป็น  $K_{ps}$ ,  $K_{ds}$  และ  $K_{is}$  เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมบังคับเลี้ยว ( $u_s$ ) ในส่วนการควบคุมความเร็วรอบของใบพัดเรือหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของเรื่อนั้นจะใช้ระบบการควบคุมแบบพีดีด้วยเช่นกัน เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ ( $u_r$ ) ที่มีพารามิเตอร์ของระบบควบคุมเป็น  $K_{pr}$ ,  $K_{dr}$  และ  $K_{ir}$  เมื่อนิยามค่าความผิดพลาดของความเร็ว ( $e_r$ ) ที่เป็นผลต่างของ  $V$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.34) กำหนดค่า  $L_1$  และ  $\xi$  เมื่อเทียบกับ ความเร็วที่วัดได้จากยานพาหนะด้วยการบูรณาการข้อมูลของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) เซนเซอร์วัดความเฉื่อย (IMU) และเข็มทิศแบบดิจิทัล (Compass)



รูปที่ 2.15 การเชื่อมต่อระบบควบคุมขั้นต่ำแบบพีไอดีและการติดตามเส้นวิถีโคจรเส้นตรง  $L_1$  เข้ากับยานพาหนะและทิศทางของเวกเตอร์ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากความเร่งในสมการ 2.34

## 2.6 การประมาณค่าความหนาแน่นกำลังสเปกตรัม

ในการประมวลผลสัญญาณเชิงสถิติจะสมมติฐานว่าสัญญาณทั่วไปจากกระบวนการทางกายภาพจะมีความถี่หลายส่วนที่มีความซับซ้อน ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณค่าความถี่ที่สนใจร่วมกับสัญญาณรบกวน จุดประสงค์หลักของการประมาณค่าความหนาแน่นของสเปกตรัม (Spectral Density Estimation, SDE) คือ การแปลงข้อมูลสัญญาณที่มีความถี่ซับซ้อนไปสู่รูปแบบที่เรียบง่ายมากยิ่งขึ้น และอีกจุดประสงค์หนึ่งของการประมาณความหนาแน่นของสเปกตรัม คือการตรวจหาช่วงข้อมูลใด ๆ ในสัญญาณข้อมูลโดยสังเกตที่ค่าสูงสุดของขนาด ตามค่าความถี่ที่สอดคล้องกัน ดังนั้น กระบวนการใด ๆ ที่วัดปริมาณต่างๆของสัญญาณ (เช่น ขนาด กำลัง ความเข้มหรือเฟส) เทียบกับความถี่ สามารถเรียกได้ว่าเป็นการวิเคราะห์สเปกตรัม



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเสียง (ซ้าย) ด้วยการประมาณค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมใน Periodogram (ขวา)

และปัจจุบันเทคนิคอื่น ๆ อีกมากมายสำหรับการประมาณสเปกตรัมได้รับการพัฒนาเพื่อลดข้อเสียของ Periodogram แบบพื้นฐาน เช่น การประมาณค่ากำลังสเปกตรัมด้วยวิธี Welch's method ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

## 2.7 การประมาณค่ากำลังสเปกตรัมด้วยวิธี Welch's method

ในวิชาฟิสิกส์ วิศวกรรมและคณิตศาสตร์ประยุกต์ วิธีของเวลช์ตั้งชื่อตาม P.D. Welch สำหรับการประมาณค่ากำลังของสัญญาณที่ความถี่ต่างกัน หรือเรียกว่าวิธีการประมาณความหนาแน่นของสเปกตรัม แนวคิดของวิธีนี้จะใช้ค่าประมาณสเปกตรัมด้วย periodogram ซึ่งเป็นผลมาจากการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ วิธีการของเวลช์ คือการปรับปรุงวิธีการประมาณสเปกตรัมด้วย periodogram แบบทั่วไปประยุกต์เข้ากับวิธีของ Bartlett โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่จะแสดงในสเปกตรัมพลังงาน

สำหรับการประมาณค่ากำลังสเปกตรัมด้วยเครื่องมือสำเร็จรูปของโปรแกรม MATLAB มีรายละเอียดดังนี้

$pxx = pwelch(x)$  จะแสดงค่าความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลัง (PSD) ของสัญญาณที่แทนด้วย  $x$  ไปเป็นตัวแปรความหนาแน่นของกำลังที่แทนด้วย  $pxx$ , โดยใช้ตัวประมาณค่าเฉลี่ยของแต่ละส่วนที่ทับซ้อนกันของเวลช์ โดยที่  $x$  เป็นเมทริกซ์ การประมาณค่ากำลังสเปกตรัมคำนวณจะเก็บไว้ในคอลัมน์ของ  $pxx$  ถ้า  $x$  เป็นจำนวนจริง  $pxx$  จะเป็นการประมาณค่าแบบ One-side แต่ถ้าหาก  $x$  เป็นจำนวนเชิงซ้อน  $pxx$  จะเป็นการประมาณค่าแบบ two-side โดยค่าเริ่มต้น  $x$  จะแบ่งออกเป็นสองส่วนที่ใกล้เคียงจำนวนยาวที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้แต่ไม่เกิน 8 ส่วนโดยมีการเหลื่อมซ้อนกัน 50% แต่ละส่วนย่อยจะมีหน้าต่างที่มีหน้าต่าง Hamming การคำนวณ periodogram จะมีค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่า PSD ถ้าไม่สามารถแบ่งได้ ความยาวของ  $x$  ตรงกับจำนวนเต็มของกลุ่มที่มีการซ้อนทับกัน 50% แล้ว  $x$  จะถูกตัดทอนตามลำดับ



ตารางที่ 3.1 แผนดำเนินการวิจัย (ต่อ)

แผนงานวิจัย	2559			2560			2561						
	ส.ค.	ก.ย.	พ.ย.	ม.ค.	มี.ค.	พ.ค.	ก.ค.	ก.ย.	พ.ย.	ม.ค.	มี.ค.	พ.ค.	ก.ค.
	ต.ค.	ธ.ค.	ก.พ.	เม.ษ.	มิ.ย.	ส.ค.	ต.ค.	ธ.ค.	ก.พ.	เม.ษ.	มิ.ย.	ส.ค.	
8. ติดตั้งหน่วยควบคุมการนำทาง อากาศยานไร้คนขับ เข้ากับรถบังคับ วิทยุและการทดลองเบื้องต้น													
9. ติดตั้งหน่วยควบคุมการนำ ทาง อากาศไร้คนขับ เข้ากับ หุ่นยนต์เรือสองท่อน													
10. การทดลองหุ่นยนต์เรือสอง ท่อนที่ใช้ตรรกะการนำทาง $L_1$ Controller													
11. จัดทำบทความวิจัยเรื่อง การ เคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถี โคจรแบบ อัตโนมัติของยานพาหนะบนบก และในน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ $L_1$													
12. การทดลองระบบรองรับ การสั่นสะเทือนทางกลใน หุ่นยนต์เรือสองท่อน													
13. จัดทำผลงานเผยแพร่ตีพิมพ์ ระดับนานาชาติ เรื่อง Vibration Suppression for Unmaned Catamaran													
14. การศึกษาและทดลองวิธี การบูรณาการข้อมูลจาก เซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน													
15. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์													

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 หุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น

หุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น มีลักษณะเป็นเรือสองท่อนที่แต่ละท่อนมีความอิสระต่อกัน แต่ละท่อนติดตั้งฐานยึด 2 จุด ที่บริเวณส่วนหน้าจะติดตั้งกลไกแขนยึดโซ่ค้ำร่วมกัน น้ำมัน ของ CaneCreek รุ่น DBAir ท่อนละ 1 ชุด สำหรับรองรับการสั่นสะเทือนทางกลจากอุทกพลศาสตร์และมีจุดหมุนร่วมบริเวณกึ่งกลางลำเรือเพื่อรองรับการเคลื่อนที่ในมุมก้มเงยของแต่ละท่อนที่มีจุดหมุนร่วมที่ฐานยึดส่วนท้ายลำเรือ หุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น ได้ถูกติดตั้งเครื่องยนต์ชนิดมอเตอร์ไฟฟ้า Torqeedo รุ่น Cruise 2.0 TS ที่ส่วนท้ายของแต่ละท่อน คุณสมบัติโดยรวมของหุ่นยนต์เรือสองท่อน สามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 3.2

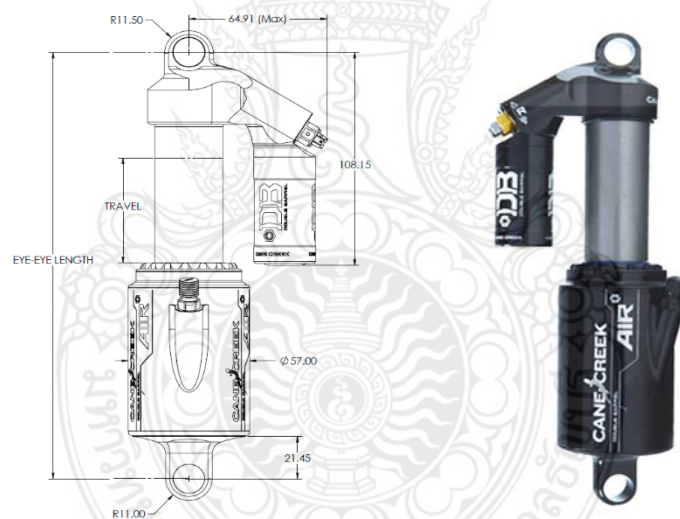
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของหุ่นยนต์เรือสองท่อน

คุณสมบัติ	ขนาด / น้ำหนัก / วัสดุ
1. ความกว้างของท่อน	45 เซนติเมตร
2. ความยาวของท่อน	3 เมตร
3. ความสูงของท่อน	24 เซนติเมตร
4. ความกว้างรวมของหุ่นยนต์เรือสองท่อน	2 เมตร
5. ความยาวรวมของหุ่นยนต์เรือสองท่อน	3.125 เมตร
6. ความสูงรวมของหุ่นยนต์เรือสองท่อน	1.6 เมตร
7. น้ำหนักสูงสุดที่รับได้	373.1 กิโลกรัม
8. น้ำหนักรวมขณะปฏิบัติการ	ไม่เกิน 260 กิโลกรัม
9. วัสดุของลำเรือ	คาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon Fiber)
10. วัสดุโครงสร้าง	อลูมิเนียม (Aluminium) และ สแตนเลส (Stainless Steel)
11. เครื่องยนต์	มอเตอร์ไฟฟ้า Torqeedo รุ่น Cruise 2.0TS : 2 เครื่อง
12. แรงขับเคลื่อนหลัก	115 ปอนด์ / เครื่อง
13. แหล่งพลังงาน	แบตเตอรี่แบบตะกั่ว 4 ลูก



รูปที่ 3.1 หุ่นยนต์เรือสองล้อแบบปรับตัวตามคลื่น

### 3.2.2 โช้คแก๊สร่วมน้ำมัน CaneCreek รุ่น DBAir [19]



รูปที่ 3.2 โช้คแก๊สร่วมน้ำมัน CaneCreek รุ่น DBAir (ซ้าย) ขนาดโดยรวม (ขวา) ภาพจริง [19]

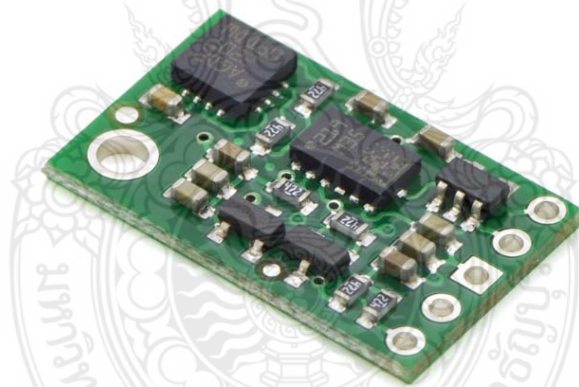
โช้คแก๊สร่วมน้ำมัน CaneCreek รุ่น DBAir มีหน้าที่ช่วยดูดซับแรงจากการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนเชิงกลในระบบรองรับการสั่นสะเทือนที่อยู่ระหว่างล้อแบบคาร์บอนไฟเบอร์และฐานรองรับการสั่นสะเทือนด้านบน มีความสามารถในการปรับค่าสัมประสิทธิ์สปริงและสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้เหมาะสมกับระบบรองรับการสั่นสะเทือนและความถี่ของแรงที่มากระทำได้ ซึ่งจะส่งผลให้อุปกรณ์ต่างๆ และเซนเซอร์ตรวจวัดมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และการปรับตั้งที่เหมาะสมจะช่วยลดการส่งผ่านแรงไปยังโครงสร้างของเรือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่ด้านบนฐานรองรับ

การสันสะเทือน ทำให้เซนเซอร์ต่าง ๆ นั้นสามารถวัดข้อมูลได้แม่นยำขึ้นและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นอีกด้วย โช้คแก๊สร่วมน้ำมัน ของ CaneCreek รุ่น DBAir มีรายละเอียดข้อมูลจำเพาะต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดข้อมูลจำเพาะของ โช้คแก๊สร่วมน้ำมัน CaneCreek รุ่น DBAir [19]

1. น้ำหนัก	500 กรัม โดยประมาณ (ขึ้นอยู่กับขนาด)
2. การปรับตั้ง	1) ค่าความแข็งสปริงแก๊ส 2) ความเร็วการยุบตัวของโช้ค 3) ความเร็วการคืนตัวของโช้ค
3. การเคลือบผิว	อะโนไดซ์และแกะสลักด้วยเลเซอร์
4. วิธีการจับยึด	Norglide® bushing 1/2" Universal Axle

3.2.3 เซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย ของ Pololu รุ่น MiniIMU-9 v2 [20]



รูปที่ 3.3 เซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย ของ Pololu รุ่น MiniIMU-9 v2 [20]

เซนเซอร์ Pololu รุ่น MiniIMU-9 v2 คือ เซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย (IMU) ของระบบที่มีราคาถูก โดยเซนเซอร์รุ่นนี้รวมเซนเซอร์ 3 ชนิดไว้ในบอร์ดเดียวกัน ได้แก่ ไจโรสโคปรุ่น L3GD20 3 แนวแกน, เซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น 3 แนวแกน รุ่น LSM303DLHC และเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก 3 แนวแกน สามารถสื่อสารกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยรูปแบบ I<sup>2</sup>C สำหรับคุณสมบัติอื่นๆ ดังแสดงตารางที่ 3.4



ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น รุ่น LSM303DLHC ที่ติดตั้งในเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย ของ Pololu รุ่น MiniIMU-9 v2 [20]

1. รูปแบบการสื่อสาร	I <sup>2</sup> C
2. ค่าความต่างศักย์รองรับ	2.5 – 5.5 VDC
3. แนวแกนการวัด	x , y และ z
4. ค่าความละเอียดที่ใช้วัด	±2g
5. รูปแบบข้อมูล	
1) C type	Short
2) stdint.h type	Int16_t
3) Bit	16
5) Sign	Signed
6) Range	-32768...32767

3.2.4 เซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย ของ Razor รุ่น 6 DOF [21]



รูปที่ 3.4 เซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย (IMU) ของ Razor รุ่น 6 DOF [21]

เซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย (IMU) ของ Razor รุ่น 6 DOF เป็นเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย (IMU) ขนาดเล็ก ติดตั้งเซนเซอร์ LPR530AL สำหรับตรวจวัดการเคลื่อนที่ในมุมก้มเงย (Pitch) และมุมโคลง (Roll) ร่วมกับเซนเซอร์ LY530ALH สำหรับตรวจวัดมุมหันเห (Yaw) และยังติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 สำหรับตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นใน 3 แนวแกนการเคลื่อนที่ ใ้กับบอร์ดเดียวกันโดยคุณสมบัติต่างๆของเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย (IMU) ของ Razor รุ่น 6 DOF มีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของเซนเซอร์วัดความเร่งแบบเชิงเส้น ADXL335 ที่ติดตั้งในเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย (IMU) ของ Razor รุ่น 6 DOF [21]

1. แหล่งจ่ายไฟ	
1) ค่าความต่างศักย์ที่ใช้งาน	1.8-3.6 VDC
2) ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้งาน	350 $\mu$ A
2. รูปแบบการสื่อสาร	อะนาล็อก (Analog) 10 บิต
3. แนวแกนการวัด	x , y และ z
4. ค่าความไวของเซนเซอร์	300 mV/g
5. ย่านการวัดสูงสุด	$\pm 3g$ ถึง $\pm 3.6g$ (ขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า)
6. Sensitivity ของ $X_{OUT}$ , $Y_{OUT}$ , $Z_{OUT}$	270 - 330 mV/g (ขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้า)
7. ZERO g BIAS LEVEL	
1) 0 g Voltage ที่ $X_{OUT}$ , $Y_{OUT}$	1.65 V
2) 0 g Voltage ที่ $Z_{OUT}$	1.80 V

3.2.5 หน่วยควบคุมการนำทางแบบอัตโนมัติ Ardupilot Mega และซอฟต์แวร์ Mission Planner ที่ใช้แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ [22]

อาคูไพลอต เมกะ (Ardupilot Mega หรือ APM) เป็นอุปกรณ์หน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติ แบบโอเพนซอร์ซ (Open Source) สำหรับการควบคุมรถยนต์ไร้คนขับ, เฮลิคอปเตอร์และอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งมีพื้นฐานการทำงานบน อาคูโน เมกะ (Arduino Mega) ด้วยหน่วยประมวลผล ATmega 2560 ประกอบร่วมกับเซนเซอร์ตรวจวัดต่างๆ เช่น เข็มทิศ ไซโรสโคป เซนเซอร์วัดความเร่งและบารอมิเตอร์ ช่วยทำให้การนำทางมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังรองรับอุปกรณ์หรือเซนเซอร์จากอื่นๆ เช่น เซนเซอร์ตรวจจับสัญญาณจีพีเอส , อุปกรณ์รับส่งข้อมูลทางไกล (Telemetry) , เซนเซอร์ตรวจวัดระยะทาง , เซนเซอร์วัดความเร็ว เพื่อเสริมสมรรถนะให้กับยานพาหนะอัตโนมัติเหล่านั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถสรุปคุณสมบัติเด่นได้ดังนี้

1) เป็นอุปกรณ์ที่มีเฟิร์มแวร์ (Firmware) โอเพนซอร์ซ สามารถสนับสนุนกับยานพาหนะหลากหลายรูปแบบ

2) สามารถติดตั้งเฟิร์มแวร์ที่สะดวก ลดขั้นตอนการเขียนโปรแกรม และยังสามารถแก้ไขหรือพัฒนาซอร์ซโค้ด (Source Code) ด้วยภาษา C++ บน Arduino IDE

3) รองรับการสื่อสารรับส่งผ่านคอมพิวเตอร์โดยใช้ Telemetry ด้วยซอฟต์แวร์ Mission Planner สามารถควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติและสามารถติดตามการเคลื่อนที่ได้โดยคอมพิวเตอร์

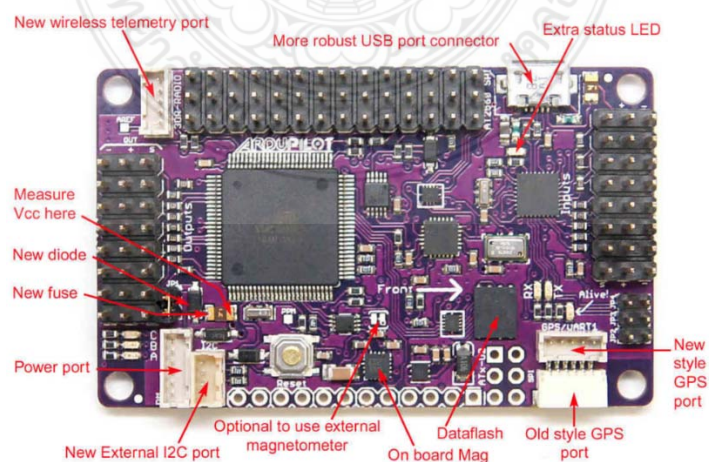
4) รองรับการเชื่อมต่อเซนเซอร์หรืออุปกรณ์อื่นๆที่หลากหลายที่ช่วยเสริมสมรรถนะยานพาหนะอัตโนมัติให้ดียิ่งขึ้น เช่น เซนเซอร์ตัวรับสัญญาณจีพีเอส ระบบช่วยรักษาความเสถียรภาพกล้องบันทึกภาพ (Camera Gimbal) เซนเซอร์วัดระยะทาง (Range Finder) และอื่นๆ

5) มีหน่วยความจำ (Data Logging) ขนาด 4 เมกะไบต์ (MegaBytes) สำหรับติดตามบันทึกข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆขณะใช้งาน

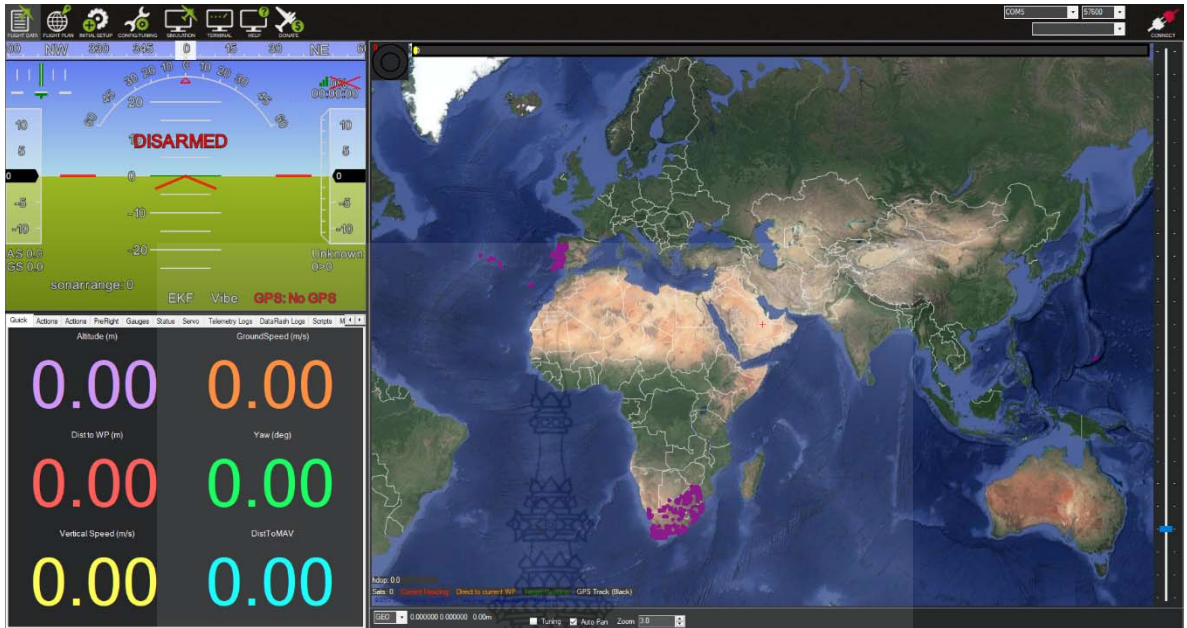
6) มีระบบป้องกันความผิดพลาด (FailSafe) ในกรณีฉุกเฉิน เช่น การเคลื่อนที่เกินระยะสัญญาณควบคุม ทำให้ยานพาหนะสามารถเคลื่อนกลับได้อย่างปลอดภัย



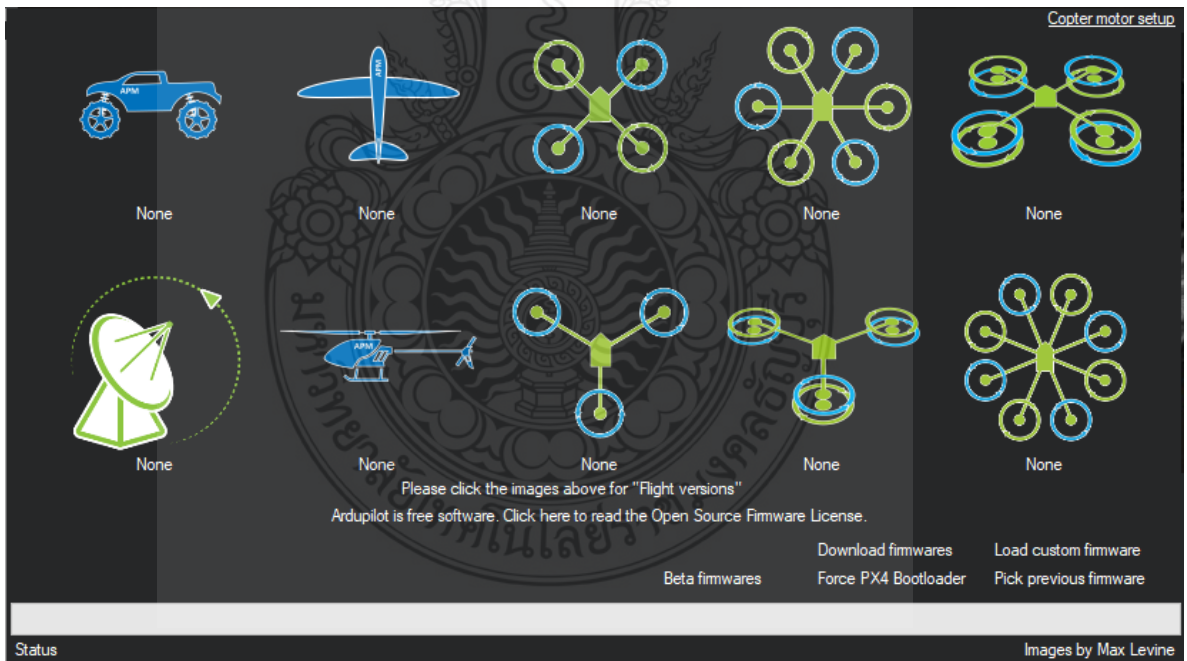
รูปที่ 3.5 อาดูไพล็อต เมกะ (Ardupilot Mega หรือ APM) [22]



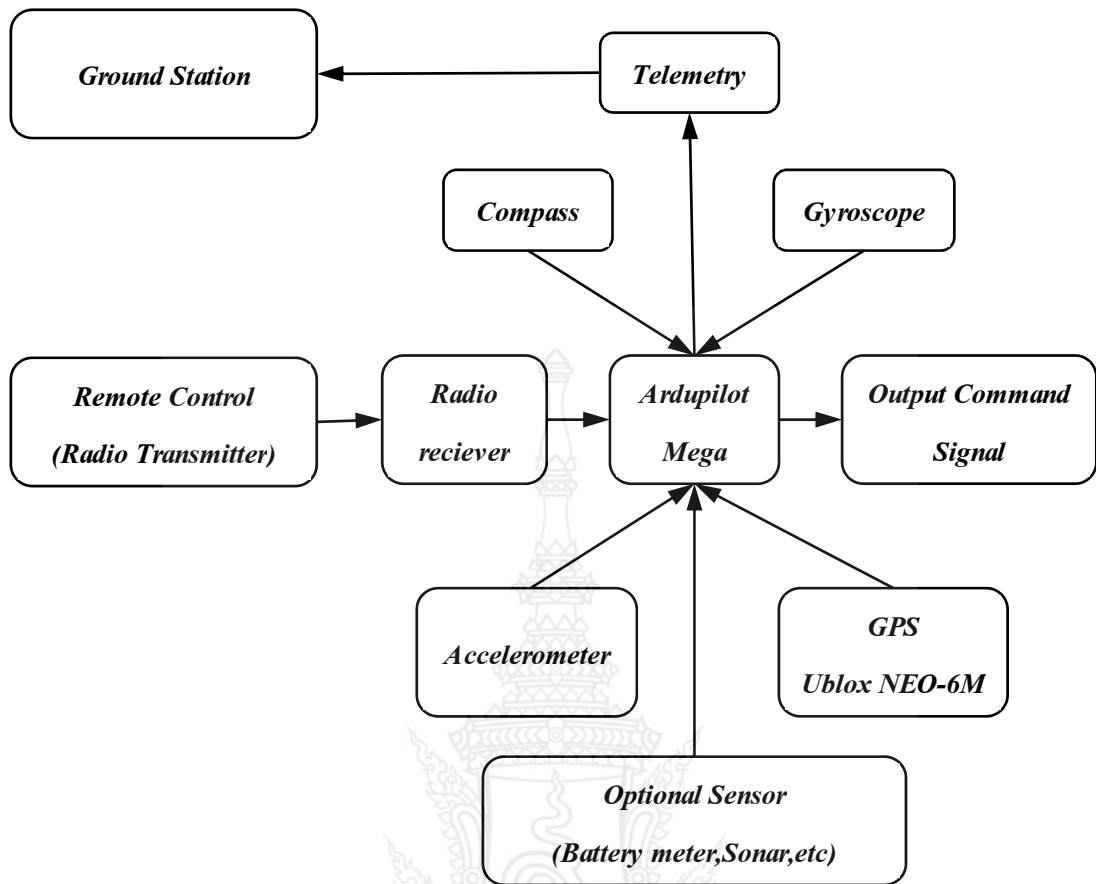
รูปที่ 3.6 โครงสร้างภายในอาดูไพล็อต เมกะ [22]



รูปที่ 3.7 ซอฟต์แวร์ Mission Planner [22]



รูปที่ 3.8 ประเภทเฟิร์มแวร์ของยานพาหนะที่รองรับบนอานูไฟล็ด เมกะ [22]



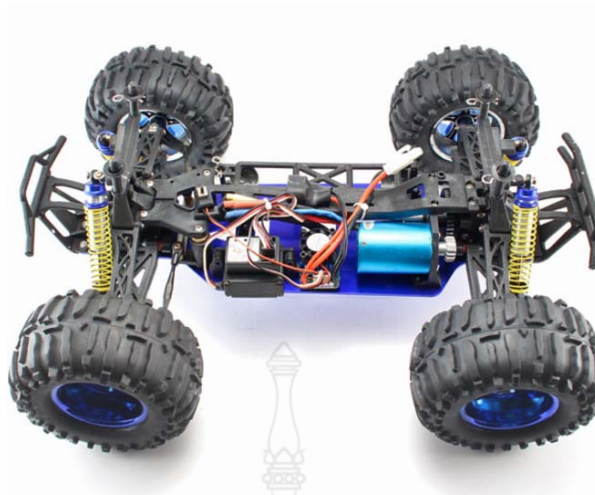
รูปที่ 3.9 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆเข้ากับหน่วยควบคุมการนำทาง Ardupilot Mega

### 3.2.6 รถบังคับวิทยุแบบสี่ล้อ Weight Grade V.2

สำหรับการทดลองอุปกรณ์ในเบื้องต้นนี้ ผู้วิจัยทำการติดตั้ง อาดูพิไลออต แมกะ และ อุปกรณ์เสริมต่างๆเข้ากับตัวรถ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เพื่อใช้ศึกษาและทดลองการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆสำหรับใช้ทดลองการควบคุมติดตามเส้นวิถีโคจร

#### ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติทางกายภาพของรถบังคับวิทยุ Weight Grade V.2

1. ความกว้างโดยรวมของรถบังคับ	31 เซนติเมตร
2. ความยาวโดยรวมของรถบังคับ	38 เซนติเมตร
3. ความสูงโดยรวมของรถบังคับ	28 เซนติเมตร
4. วงเลี้ยวสูงสุด	ไม่เกิน 45 องศา
5. แหล่งพลังงานหลัก	แบตเตอรี่ลิเทียมโพลีเมอร์ 3 เซลล์
6. ความเร็วสูงสุดไม่เกิน	2 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 3.10 รถบังคับวิทยุ Weight Grade V.2

### 3.2.7 หุ่นยนต์เรือแบบสองท่อนขนาดเล็กบังคับวิทยุภาคพื้นผิวน้ำ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้หุ่นยนต์เรือสองท่อนขนาดเล็กเพื่อใช้ทดลองการติดตามเส้นวิถีโคจรด้วยตัวควบคุมแบบ  $L_1$  และศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนจะนำไปประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น เพราะหุ่นยนต์เรือสองท่อนขนาดเล็กมีความสะดวกในการขนย้ายมากกว่าหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น และหุ่นยนต์เรือสองท่อนทั้งสองนั้นมีรูปแบบการควบคุมที่เหมือนกัน คือขับเคลื่อนด้วยการควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนของใบพัด 2 ใบ แบบ differential-drive ดังนั้นการใช้หุ่นยนต์เรือสองท่อนขนาดเล็กจะทำให้การปฏิบัติงานหรือทดลองสามารถทำได้สะดวกมากขึ้น



รูปที่ 3.11 หุ่นยนต์เรือสองท่อนขนาดเล็ก

### ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติทางกายภาพของเรือสองท่อนขนาดเล็ก

1. ความกว้างโดยรวมของเรือสองท่อนขนาดเล็ก	84 เซนติเมตร
2. ความยาวโดยรวมของเรือสองท่อนขนาดเล็ก	123 เซนติเมตร
3. ความสูงโดยรวมของเรือสองท่อนขนาดเล็ก	83 เซนติเมตร (รวมความสูงเสายึดเซนเซอร์เลเซอร์)
4. แหล่งพลังงานหลัก	แบตเตอรี่ตะกั่ว 12 โวลต์ 2 ลูก
5. ความเร็วสูงสุดไม่เกิน	1 เมตรต่อวินาที

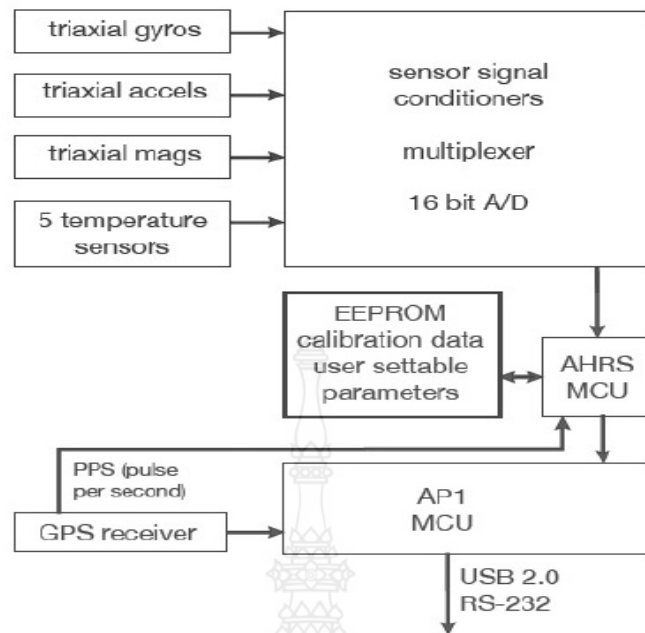
#### 3.2.8 เซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย ของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ [23]

โดยเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อยรุ่นนี้ จะมีทั้งเซนเซอร์วัดค่าความเฉื่อย (IMU) และเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) อยู่ในตัวเดียวกันโดยส่วนประกอบหลักคือ เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) แบบ 3 แกน, เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) แบบ 3 แกน, เซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก (Magnetometer) แบบ 3 แกนและตัวรับสัญญาณเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) โดยข้อดีของเซนเซอร์รุ่นนี้ คือ มีหน่วยประมวลผล (MCU) อยู่ภายในตัวและใช้เทคนิค AHRS มาช่วยในการบูรณาการข้อมูลค่าความเฉื่อยจากเซนเซอร์ IMU และค่าตำแหน่งจากเซนเซอร์จีพีเอส เข้าด้วยกันทำให้ได้ข้อมูลการเคลื่อนที่ๆแม่นยำยิ่งขึ้น



#### รูปที่ 3.12 เซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย ของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ [23]

โดยข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์วัดค่าความเฉื่อย (IMU) และ เซนเซอร์จีพีเอส (GPS) นั้น จะส่งข้อมูลผ่านพอร์ต USB/RS232 ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้ในส่วนอื่นต่อไป โดยโครงสร้างภายในของระบบแสดงดังไดอะแกรมต่อไปนี้



รูปที่ 3.13 โครงสร้างภายในของเซนเซอร์ของ Microstrain รุ่น 3DM-GX3-45 [23]

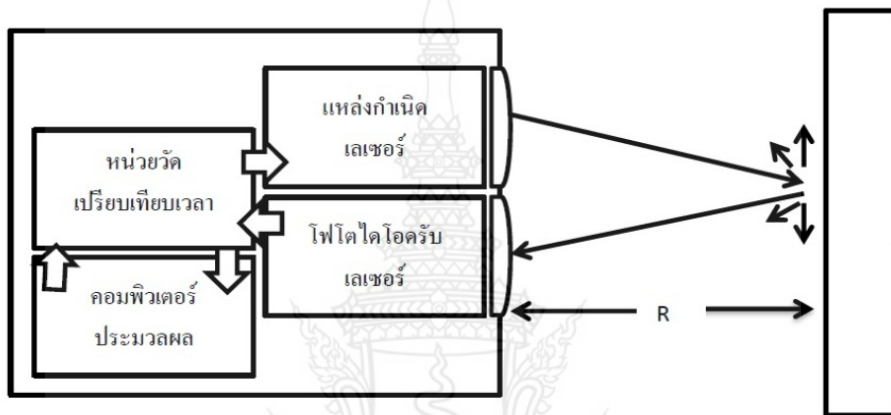
ตารางที่ 3.8 ข้อมูลคุณสมบัติของเซนเซอร์ของ Microstrain รุ่น 3DM-GX3-45 [23]

1. ความถูกต้องในการวัดตำแหน่ง	$\pm 2.5$ เมตรในแนวขนานกับพื้นโลกและ $\pm 5$ เมตรในแนวตั้งฉากกับพื้นโลก
2. อัตราการส่งออกข้อมูลของเซนเซอร์วัดมุมเอียง	1 ถึง 100 เฮิร์ตซ์
3. ช่วงการวัดของเซนเซอร์วัดความเร่ง	$\pm 5$ เมตร
4. ช่วงการวัดของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม	$\pm 300$ องศาต่อวินาที
5. ความถูกต้องของมุมออยเลอร์เมื่ออยู่กับที่	$\pm 0.5$ องศา
6. ความถูกต้องของมุมออยเลอร์เมื่อเคลื่อนที่	$\pm 2$ องศา
7. ช่วงการวัดของเซนเซอร์วัดแม่เหล็ก	$\pm 2.5$ เกาส์
8. ความสามารถในการวัดซ้ำ	0.2 องศา
9. ความถูกต้องขององศาการหันเหของ เซนเซอร์จีพีเอส (GPS)	0.5 องศา
10. ความถูกต้องความเร็วของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS)	0.1 เมตรต่อวินาที
11. ความถูกต้องตำแหน่งในแนวขนานของ เซนเซอร์จีพีเอส (GPS)	2.5 เมตร CEP
12. อัตราการส่งออกข้อมูลของ เซนเซอร์จีพีเอส (GPS)	1 ถึง 4 เฮิร์ตซ์



### 3.2.9 เซนเซอร์เลเซอร์ Hokuyo รุ่น UXM-30LXH-EWA [24]

ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์มีเครื่องวัดระยะทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ การวัดระยะทางด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์มีการใช้ประโยชน์จากการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีกำลังในการทะลุทะลวงและเป็นลำแสงควมแน่น เช่น แสงเลเซอร์ (Laser) เครื่องวัดระยะทางจะกำเนิดเลเซอร์และจับเวลาในการเดินทางด้วยหน่วยวัดเปรียบเทียบเวลา ซึ่งคุณภาพของข้อมูลขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่แสงตกกระทบเป็นของแข็ง เรียบหรือหยาบ แห้งหรือชื้น เมื่อแสงเดินทางกลับมายังเครื่องรับจะมีการเปรียบเทียบเวลาอีกครั้ง



รูปที่ 3.14 หลักการทำงานเบื้องต้นของเลเซอร์สแกนเนอร์ [24]

ในงานวิจัยนี้ใช้เซนเซอร์เลเซอร์ Hokuyo รุ่น UXM-30LXH-EWA ซึ่งจะทำการสแกนในระนาบเดียวและอยู่ในระบบพิกัดเชิงขั้วแบบ 2 มิติ ถ้าแสงของเลเซอร์ที่ปล่อยออกมานั้นไปกระทบกับวัตถุเป้าหมายจะทำให้ได้ของข้อมูลเป้าหมายในรูปแบบของระยะทางและรัศมีซึ่งการสแกนจะอยู่ภายใน 190 องศา และระยะสแกนสูงสุดที่ 80 เมตร



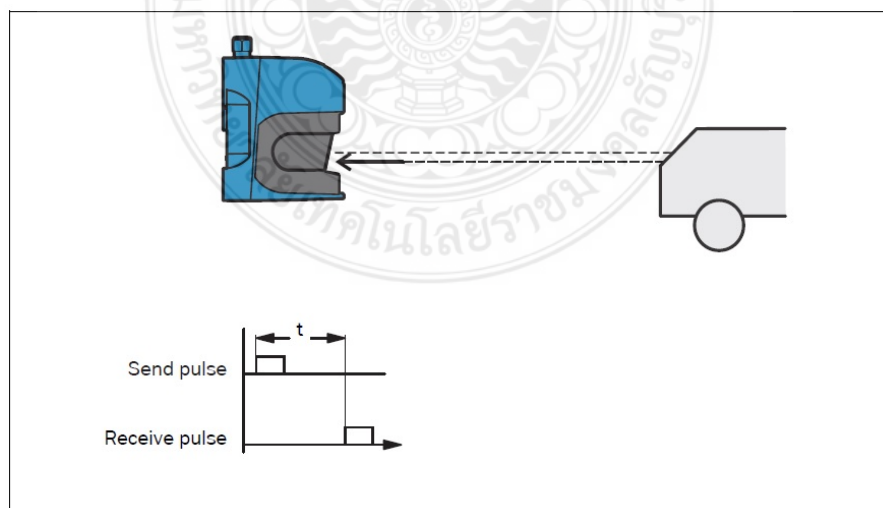
รูปที่ 3.15 เซนเซอร์เลเซอร์ Hokuyo รุ่น UXM-30LXH-EWA [24]

ตารางที่ 3.9 คุณสมบัติต่างๆของเซนเซอร์เลเซอร์ Hokuyo รุ่น UXM-30LXH-EWA [24]

1. ขนาด (กว้าง ยาว สูง)	124 × 126 × 150 มิลลิเมตร
2. น้ำหนัก	1.2 กิโลกรัม (ไม่รวมสายไฟ)
3. ค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่าย	10-30 โวลต์ แบบกระแสตรง
4. การใช้พลังงานโดยรวม	น้อยกว่า 7.2 วัตต์
5. แหล่งกำเนิดแสง	ชนิดเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ไดโอด เลเซอร์คลาส 1
6. ระยะเวลาตรวจจับ	อยู่ในช่วง 0.1 ~ 30 ม., 190 องศา
7 ความแม่นยำของระยะเวลาตรวจจับ	ในช่วง +/-30 มม
8. ความละเอียดเชิงมุม	0.125 องศา (360 องศา/2880 สเต็ป)
9. ความเร็วในการสแกน	50 ms (1,200 rpm)
10. รูปแบบการสื่อสาร	Ethernet 100BASE-TX(Auto-negotiation)

### 3.2.9.1 การวัดระยะทาง

เลเซอร์สแกนจะปล่อยแสงเลเซอร์ออกมาเป็นพัลส์โดยใช้เลเซอร์ไดโอด ถ้าแสงเลเซอร์นั้นสามารถสะท้อนบนวัตถุเป้าหมายได้จะทำให้เกิดการสะท้อนของลำแสงกลับไปยังตัวรับแสงที่ตัวเซนเซอร์ โดยระยะทางของวัตถุนั้นคำนวณได้โดยใช้เวลาตั้งแต่ปล่อยลำแสงออกมาเกิดการสะท้อนและรับกลับ ไปยังตัวเซนเซอร์ซึ่งหลักการดังกล่าวนี้เรียกว่า “เวลาที่ใช้ในการสะท้อน (Time Of Flight)”



รูปที่ 3.16 หลักการควบคุมเวลาที่ใช้ในการสะท้อน (Time of Flight) [24]

### 3.2.9.2 การวัดทิศทาง

แสงเลเซอร์ที่กระจายออกไปนั้นจะหันเหได้โดยการใช้กระจกที่สามารถหมุนได้ที่อยู่ภายในและสแกนในลักษณะที่เป็นวงกลม ซึ่งจะหมุนเป็นลำดับที่สม่ำเสมอโดยใช้เซนเซอร์วัดรอบการหมุนแบบเชิงมุม

### 3.2.9.3 ข้อจำกัดของเซนเซอร์เลเซอร์

สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ -10 ถึง +50 องศาเซลเซียส, ความชื้น 85%RH และการตรวจวัดอาจผิดพลาดอันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อม อาทิเช่น ฝนตก, หิมะ หรือ แสงอื่นๆ ที่มีค่าสูงกว่า 1,000 ลักซ์

### 3.2.9.4 ลักษณะข้อมูลจากเซนเซอร์เลเซอร์

ข้อมูลการตรวจวัดของเซนเซอร์เลเซอร์จะอยู่ในรูปแบบระบบพิกัดเชิงขั้ว คือ ระยะทางในแนวรัศมีและมุมการวัดในแนวนั้นๆ ( $r, \theta$ ) โดยสามารถแปลงข้อมูลให้อยู่ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนหรือพิกัดฉาก ( $x, y$ ) ได้จากฟังก์ชันสำเร็จรูป pcread('LaserFile.pcd') ในโปรแกรม MATLAB 2017

### 3.2.10 เครื่องวัดพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม Hemisphere S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) [25]



รูปที่ 3.17 เครื่องวัดพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม Hemisphere S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) [25]

**Hemisphere S321** คือ เครื่องวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียม GNSS ที่มีช่องรับสัญญาณดาวเทียมจำนวนที่หลากหลาย มีความแม่นยำสูงทั้งแนวระนาบและแนวตั้ง ซึ่งมีคุณลักษณะเฉพาะดังต่อไปนี้

- 1) มีช่องรับสัญญาณดาวเทียมจำนวนมากกว่า 350 ช่องสัญญาณ ที่สามารถรับและบันทึกข้อมูลสัญญาณดาวเทียม GPS และ GLONASS และ Galileo ได้ ทั้ง 2 ความถี่แบบ L1 และความถี่แบบ L2 โดย Mode ในการรับสัญญาณจะต้องเป็นแบบ Carrier phase หรือ เทียบเท่า และสามารถรับสัญญาณ SBAS ได้ สำหรับ Beidou ต้อง ได้ทั้งความถี่ B1 , B2 และ B3
- 2) สามารถปฏิบัติงานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธี Static, Real Time Kinematic (RTK)
- 3) มีเสารับสัญญาณดาวเทียม ที่มีพอร์ตสำหรับ SIM card เพื่อการเชื่อมต่อระบบ 3G รองรับระบบ CORS และ RTK Network หรือ VRS ได้
- 4) เครื่องเสารับสัญญาณดาวเทียม สามารถเก็บข้อมูลดาวเทียมโดยใช้หน่วยความจำแบบภายใน (Internal) 4 GB และมีช่องบรรจุแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ Micro SD Card ได้ 32 GB
- 5) ต้องสามารถใช้ระบบ WebUI ในการควบคุมการทำงานและ Upgrade Firmware และใช้ตั้งค่าหรือสั่ง การเครื่อง GNSS Receiver รวมทั้งใช้ในการ Download และ Delete ข้อมูลรังวัดจากดาวเทียมที่บันทึก ในตัวเครื่องเสารับสัญญาณดาวเทียม ได้โดยผ่านระบบ Wifi และ Bluetooth
- 6) ตัวเครื่องป้องกันฝุ่นและน้ำตามมาตรฐาน IP67
- 7) ตัวเครื่องเสารับสัญญาณดาวเทียม ได้รับมาตรฐานความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และทนต่อการตกกระแทกที่พื้นคอนกรีตจากความสูง 2 เมตร
- 8) ตัวเครื่อง GNSS ต้องได้รับมาตรฐานความปลอดภัยในการติดไฟแบบ UL 94HB
- 9) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS สามารถบันทึกข้อมูลความถี่ได้เท่ากับ 10 Hz
- 10) เมื่อประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรมประมวลผลสัญญาณดาวเทียมแล้ว มีความคลาดเคลื่อนของการ รังวัดในระบบ Static Post Processing ทางราบ (Horizontal) ไม่เกินกว่า 3mm หรือน้อยกว่า และทางตั้ง ไม่เกินกว่า 3.5 mm ของระยะเส้นฐานที่รังวัด
- 11) เมื่อประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรมประมวลผลสัญญาณดาวเทียมแล้ว มีความคลาดเคลื่อนของการ รังวัด (RMS) ในระบบ Real Time Kinematics ทางราบ (Horizontal) ไม่เกินกว่า 8 mm หรือน้อยกว่า และ ทางตั้ง (Vertical) ไม่เกินกว่า 15 mm หรือน้อยกว่า ของระยะเส้นฐานที่รังวัด
- 12) สามารถรับสัญญาณปรับแก้จากดาวเทียม ได้โดยมีความ คลาดเคลื่อนของการรังวัด (RMS) ทางราบ (Horizontal) ไม่เกินกว่า 0.08 เมตร หรือน้อยกว่า และทางตั้ง (Vertical) ไม่เกินกว่า 0.16 เมตร

13) มีแบตเตอรี่ภายในสำหรับเครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม GNSS ชนิดลิเทียมพร้อมเครื่องประจุไฟฟ้า

14) มีวิทยุส่งสัญญาณแบบ Built-In UHF Radio Modem สำหรับส่งข้อมูลปรับแก้ RTCM ที่ความถี่ไม่ต่ำกว่า 420-460 Mhz และมี Channel Spacing ที่ 12.5KHz / 25KHz ที่มีขนาดกำลังส่งไม่น้อยกว่า 1 วัตต์

15) มีระบบ Smart Voice Broadcast System. หรือ “Speaking” Receiver ให้เสียงแสดงการทำงานหรือ สถานะของเครื่อง GNSS ได้

16) มีช่องสำหรับเชื่อมต่อแบตเตอรี่ภายนอกได้ 1 ช่อง

17) มีอุปกรณ์วัดความสูงของเสาอากาศ 1 ช่อง

18) มีขาตั้งกล้องแบบสามขา (Tripod) แบบชนิดปรับเลื่อนได้ จำนวน 1 ชุด

19) มีกล่องแบบแข็งแรงกันการกระแทกสำหรับบรรจุเครื่อง GNSS จำนวน 1 กล่อง

### 3.2.11 เซนเซอร์นำร่องและวัดความลึกน้ำของ GARMIN รุ่น *GPSMAP® 421s* [26]

เซนเซอร์นำร่องและวัดความลึกน้ำของ GARMIN รุ่น *GPSMAP® 421* คือ ระบบนำร่องขนาดเล็กที่มีหน้าจอแสดงผล QVGA ขนาด 4 นิ้ว สามารถแสดงแผนที่และระบุตำแหน่งด้วยระบบนำร่อง GPS และรองรับการเชื่อมต่อกับเซนเซอร์วัดความลึกด้วยคลื่นเสียงสะท้อน (Echo Sounder) Airmar สามารถวัดความลึกได้สูงสุด 1,500 ฟุต (457 เมตร)



รูปที่ 3.18 เซนเซอร์นำร่องและวัดความลึกน้ำของ GARMIN รุ่น *GPSMAP® 421s* [26]

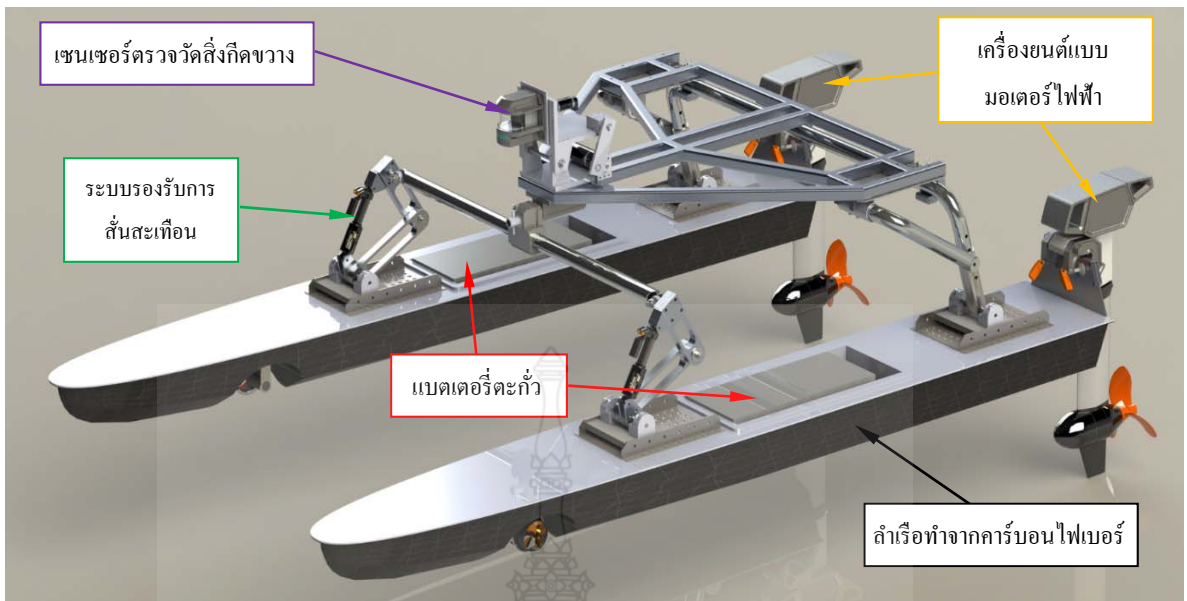
ตารางที่ 3.10 คุณสมบัติของเซนเซอร์นำร่องและวัดความลึกน้ำของ GARMIN รุ่น GPSMAP ® 421s

1. ขนาด (กว้าง,ยาว,สูง)	5.7 x 5.0 x 2.7 นิ้ว (14.5 x 12.7 x 6.9 เซนติเมตร)
2. ความละเอียดของหน้าจอ	4 นิ้ว 240 x 320 พิกเซล
3. รูปแบบการแสดงผล	หน้าจอแบบ QVGA
4. น้ำหนัก	1.3 lb (590 g)
5. ความสามารถในการกันน้ำ	ตามมาตรฐาน IPX7
6. ระบบนำร่อง	รองรับ GPS
7. NMEA input/output:	รองรับมาตรฐาน NMEA 0183 และ NMEA 2000

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 การออกแบบหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น

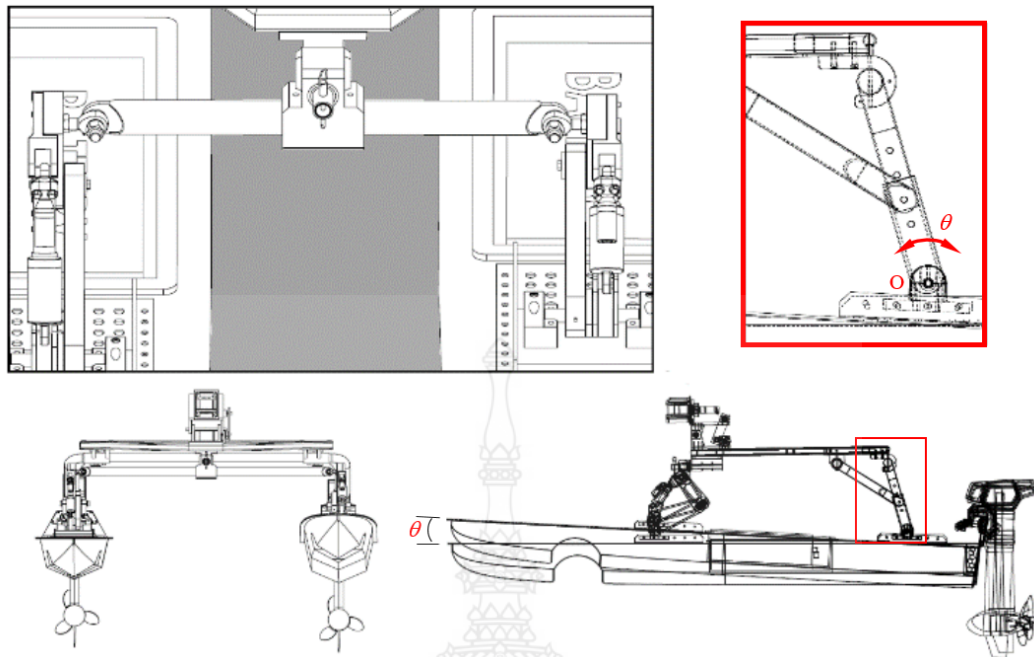
ในการออกแบบเรือหุ่นยนต์แบบสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นว่า การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWORKS®) ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ซึ่งจะช่วยให้เกิดความรวดเร็วและสามารถปรับปรุงแก้ไขได้ง่าย และสามารถมองเห็นชิ้นงานที่ออกแบบไว้โดยไม่ต้องสร้างต้นแบบจริง นอกจากนั้นยังสามารถประเมินรูปร่าง น้ำหนักโดยรวมของเรือต้นแบบ และ ความสามารถในการรับแรงของชิ้นส่วนต่าง เพื่อจะได้ช่วยลดจำนวนการสร้างชิ้นงานและน้ำหนักโดยรวมของเรือต้นแบบ เนื่องจากสามารถจำลองสภาวะการทำงานต่าง ๆ เพื่อทำการทดลองชิ้นงานได้ ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ก่อนนำไปสร้างชิ้นงานจริงและนำไปทดลองการใช้งานจริงได้อีกด้วย



รูปที่ 3.19 การออกแบบหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่นด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค

### 3.3.2 การติดตั้งโซ้คแก๊สร่วมน้ำมัน CaneCreek DBAir ในโครงสร้างรองรับการสั่นสะเทือนทางกล

เพื่อลดผลกระทบจากสั่นสะเทือนจากคลื่นส่งผลให้เซนเซอร์เลเซอร์สามารถเก็บข้อมูลระยะทางของวัตถุได้แม่นยำถูกต้องมากขึ้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โซ้คแก๊สร่วมน้ำมัน Cane Creek DBAir จำนวน 2 ตัว ติดตั้งที่บริเวณส่วนหน้าของแต่ละท่อนเรือ แต่ละท่อนเชื่อมต่อกันด้วยคาน โดยมีจุดหมุนที่แกนสลักบริเวณกึ่งกลางซึ่งมีหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างฐานยึดและ โครงสร้างด้านบน โซ้คมีระยะหุดสูงสุด 8 เซนติเมตร ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบก้มเงย (pitching motion) ระหว่างท่อนได้สูงสุด 3 องศา โดยมีจุดหมุนที่จุด 0 บริเวณฐานยึดส่วนท้าย ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การติดตั้งโซ่และผลกระทบจากโซ่ขยับตัวส่งผลให้เกิดผลต่างมุมระหว่างสองท่อน

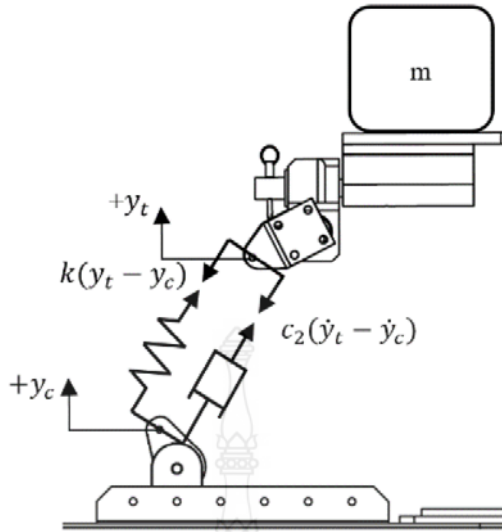
### 3.3.3 การวิเคราะห์อัตราการส่งผ่านการสั่นสะเทือนทางกล

ในการวิเคราะห์ระบบช่วยลดการสั่นสะเทือนทางกลของฐานเซนเซอร์เลเซอร์ที่มีผลมาจากคลื่นน้ำกระทำต่อทุ่นด้านใดด้านหนึ่ง โดยสมมติฐานว่า ระบบรองรับการสั่นสะเทือนทางกลจากโซ่แก๊สร่วมน้ำมันประกอบด้วยความดันอากาศภายในกระบอกซึ่งเสมือนทำหน้าที่เป็นสปริงและน้ำมันทำหน้าที่เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง ดังนั้น เมื่อใช้กฎข้อที่สองของนิวตันมาช่วยวิเคราะห์แผนภาพวัตถุอิสระในรูปที่ 3.21 จะได้สมการการเคลื่อนที่ของระบบสั่นสะเทือนทางกล คือ

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{y}_i + c_2\dot{y}_i + ky_i &= c_2\dot{y}_c + ky_c \\ \text{หรือ} \quad \ddot{y}_i + \frac{c_2}{m}\dot{y}_i + \frac{k}{m}y_i &= \frac{c_2}{m}\dot{y}_c + \frac{k}{m}y_c \end{aligned} \right\} (3.1)$$

โดยกำหนดให้  $m$  คือ มวลรวมของเซนเซอร์เลเซอร์และฐานยึด,  $k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์สปริง (Stiffness coefficient) จากความดันอากาศในกระบอกโซ่,  $c_2$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (Damping coefficient) ที่มาจากค่าความหนืดของน้ำมัน ค่า  $y_i$  คือ ระยะการขจัดของฐานเซนเซอร์เลเซอร์ และ  $y_c$  คือ ระยะการขจัดของฐานโซ่



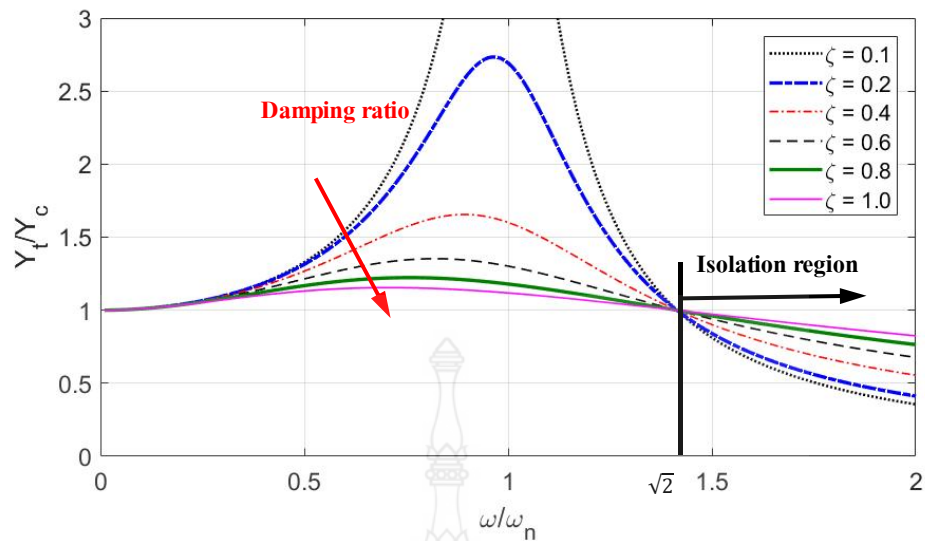


รูปที่ 3.21 แผนภาพวัตถุอิสระของโช้คแก๊สร่วมน้ำมันของ Cane Creek DBAir

ในการออกแบบระบบลดการสั่นสะเทือนทางกลในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์จากสมการอัตราส่วนการส่งผ่านระยะขจัด (หรือ Displacement transmissibility's equation) โดยอัตราส่วนนี้แสดงในรูปอัตราส่วนของผลตอบสนองการสั่นสะเทือน (Normalized amplitude,  $Y_t/Y_c$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับฟังก์ชันของอัตราส่วนความถี่  $(\omega/\omega_n)$  โดยที่  $\omega$  คือความถี่ภายนอกที่เข้ามากระตุ้นที่บริเวณฐานโช้คด้านล่าง,  $\omega_n$  คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ (หรือเท่ากับ  $\sqrt{k/m}$ ),  $\zeta$  คือ อัตราส่วนความหน่วง (หรือมีค่าเท่ากับ  $c_2/(2\sqrt{km})$ )

$$\frac{Y_t}{Y_c} = \frac{1 + ((2\zeta) \cdot (\omega/\omega_n))^2}{\sqrt{(1 + (\omega/\omega_n)^2)^2 + ((2\zeta) \cdot (\omega/\omega_n))^2}} \quad (3.2)$$

จากสมการที่ 3.2 สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์อัตราส่วนแบบบรรทัดฐานของผลตอบสนองการสั่นสะเทือน (Normalized amplitude,  $Y_t/Y_c$ ) ต่อฟังก์ชันของอัตราส่วนความถี่  $(\omega/\omega_n)$  ที่เพิ่มขึ้นเมื่อ ณ ค่าอัตราส่วนความหน่วงต่างๆ ( $\zeta$ ) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.22 ดังนี้



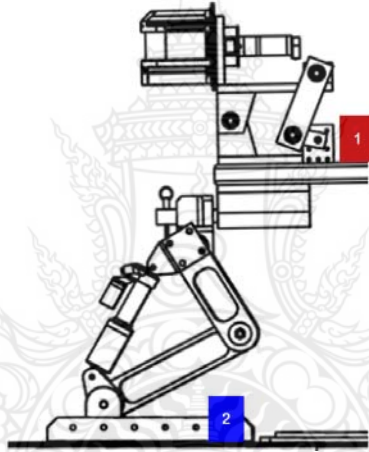
รูปที่ 3.22 อัตราส่วนแบบบรรทัดฐานของผลตอบสนองของการส่งผ่านการสั่นสะเทือน( $Y_t/Y_c$ ) ที่เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนความถี่ ( $\omega/\omega_n$ ) ที่อัตราส่วนความหน่วงต่างๆ

จากรูปที่ 3.22 แสดงอัตราการส่งผ่านการสั่นสะเทือน(Displacement transmissibility) ของระบบแบบมีความหน่วง อัตราการส่งผ่านนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความถี่ที่มากระตุ้นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติ ( $\omega \rightarrow \omega_n$ ) ส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบสั่นสะเทือนเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) และอัตราการส่งผ่านระยะขจัดจะลดลงเมื่ออัตราส่วนความถี่มากกว่า  $\sqrt{2}$  หรือเรียกการส่งผ่านแรงลดลงว่าเป็นช่วง Isolation ซึ่งจะเห็นผลได้ชัดเมื่อค่าอัตราส่วนความหน่วงมีค่า  $0 < \zeta < 1$  หรือเรียกว่า ผลตอบสนองแบบหน่วงขาด (Underdamped response) และอัตราการส่งผ่านระยะขจัดจะลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนความหน่วงเพิ่มมากขึ้นมากกว่า 1 หรือเรียกว่า ผลตอบสนองแบบหน่วงเกิน (Overdamped response)

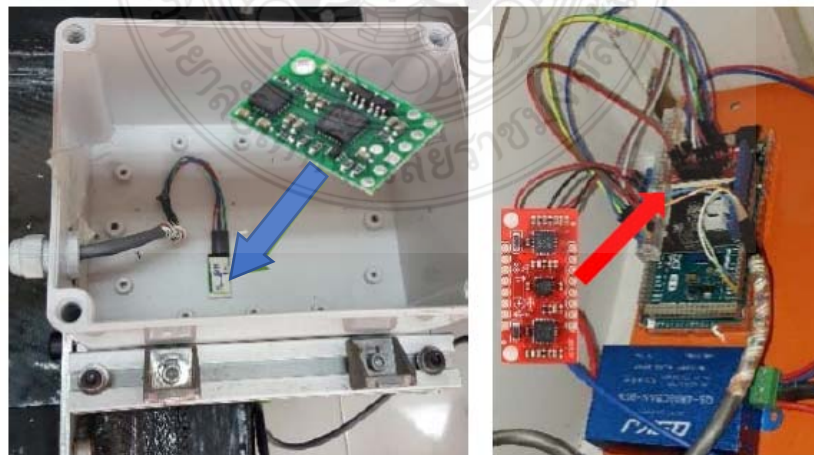
สำหรับการวิเคราะห์การทดลองการสั่นสะเทือนทางกลในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการของเวลส์ (Welch's method) ซึ่งเป็นฟังก์ชันสำเร็จรูปในโปรแกรม MATLAB สำหรับการประมาณค่ากำลังความหนาแน่นของสเปกตรัมแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาของสัญญาณค่าที่ได้รับจากเซนเซอร์วัดค่าความเร่งทั้ง 2 ตัว ที่ความถี่ต่างๆกัน ด้วยวิธีการนี้จะสามารถแยกค่าความถี่ที่สนใจกับความถี่ที่มาจากสัญญาณรบกวนออกจากกันได้ โดยพิจารณาจากขนาดของค่ากำลังความหนาแน่นของสเปกตรัม อย่างไรก็ตาม ความละเอียดของค่าความถี่จำกัดที่  $\pm/2$  สำหรับการกำหนดย่านสเปกตรัมแบบ One-side

### 3.3.4 การติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งสำหรับตรวจวัดการสั่นสะเทือนทางกล

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) จำนวน 2 ตัว สำหรับตรวจวัดความเร่งจากการสั่นสะเทือนทางกลด้านบนของ โฉลจะเลือกใช้เซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อยของ Razor รุ่น 6 DOF ติดตั้งที่ฐานสำหรับติดตั้งเซนเซอร์เลเซอร์ และที่ด้านล่างของ โฉลจะติดตั้งเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อยของ Pololu รุ่น MiniIMU-9 v2 ที่บริเวณฐาน โฉลของหุ่นเรือดำน้ำด้านสตาร์ ข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์วัดความเร่งจะบันทึกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due ที่มีความถี่ 16 เฮิรซ์ ในการติดตั้งเซนเซอร์ทั้ง 2 ตัวจะกำหนดให้แนวแกน z ตามแนวทิศทางการเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก , แนวแกน x ขนานตามความยาวลำเรือ โดยกำหนดให้ค่าบวกไปทางด้านหน้าของเรือ และแนวแกน y จะมีทิศที่ตั้งฉากกับความยาวของลำเรือ



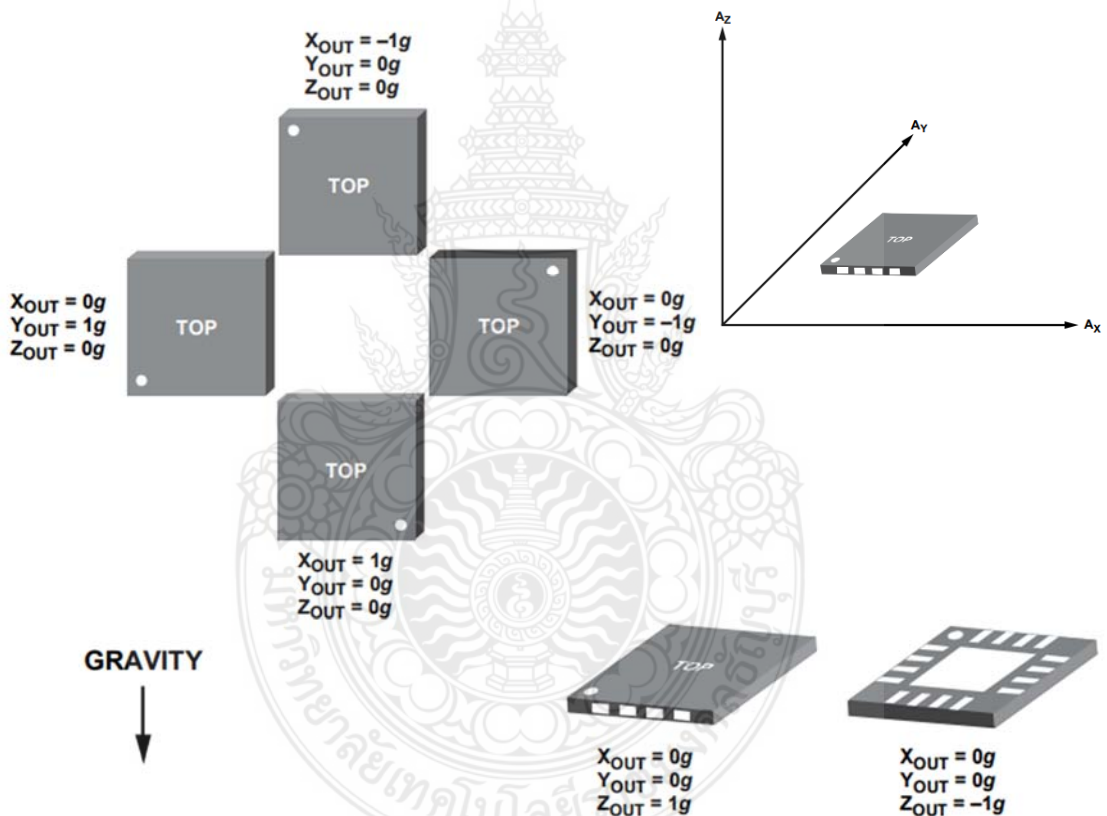
รูปที่ 3.23 การติดตั้งโฉลแก๊สร่วมน้ำมันของ Cane Creek DBAir เข้ากับหุ่นยนต์เรือสองหุ่น



รูปที่ 3.24 การติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งด้านล่างที่บริเวณฐาน โฉล (ซ้าย) และการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งด้านบนที่กล่องควบคุมหลัก (ขวา)

### 3.3.5 การเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้นสำหรับตรวจวัดการสั่นสะเทือนทางกล

การบันทึกผลค่าความเร่งที่ได้รับจากเซนเซอร์วัดความเร่งทั้งสองตัวจึงจำเป็นต้องผ่านการปรับเทียบค่าข้อมูลดิบทุกๆแนวแกน โดยผู้วิจัยติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งทั้งสองตัวบนแผ่นระนาบโดยกำหนดให้เซนเซอร์ทั้งสองตัวมีกรอบอ้างอิงในทิศทางเดียวกัน จากนั้นหมุนแผ่นระนาบเพื่อปรับเทียบกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์แต่ละแนวแกนให้ขนานกับเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $g$ ) ทีละแนวแกน โดยให้กรอบอ้างอิงของเซนเซอร์ของแกนที่ต้องการปรับเทียบมีทิศทางตามแนวความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกและตรงข้ามกับความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกดังแสดงในรูปที่ 3.25

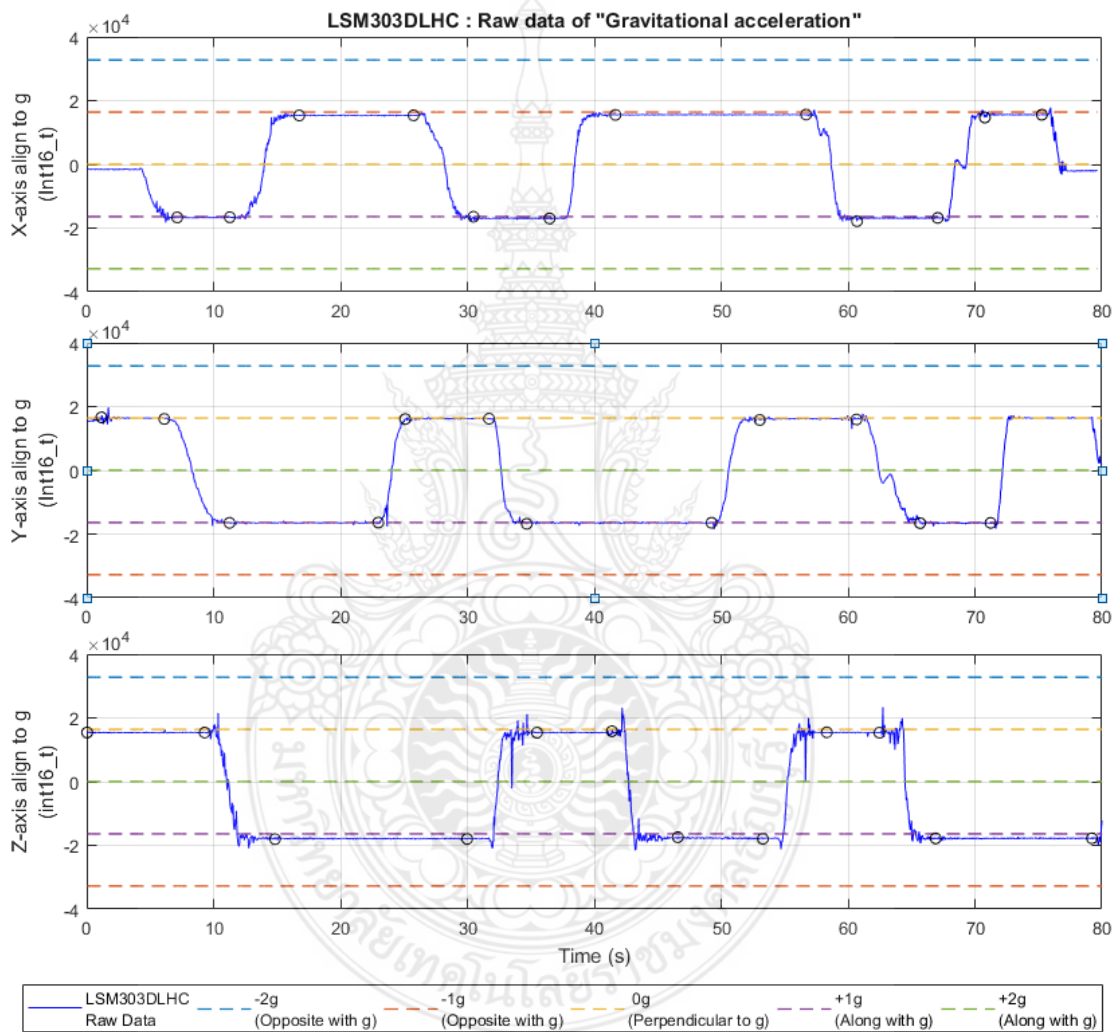


รูปที่ 3.25 รูปแบบค่าข้อมูลสัญญาณขาออกเปรียบเทียบกับทิศทางการตัวของเซนเซอร์วัดความเร่งที่อ้างอิงกับเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก [21]

จากการทดลองปรับเทียบกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์ตามแนวเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกดังรูปที่ 3.25 สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

3.3.5.1 การประเมินข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC ที่ติดตั้งในเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย Pololu รุ่น MimiIMU-9 v2 (เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งค่านกลางที่หมุนเรือ)

จากผลการทดลองเปรียบเทียบรอบอ้างอิงของเซนเซอร์ตามแนวแกน  
 ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกและตรงข้ามกับตามแนวแกนความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก  
 โดยการหมุนเซนเซอร์วัดความเร่งให้มาขนานกับแกนความโน้มถ่วงโลกและหมุนเซนเซอร์กลับ  
 ให้สวนทางกับแกนความโน้มถ่วงโลกสามครั้ง ของเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC  
 ที่ติดตั้งในเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย Pololu รุ่น MiniIMU-9 v2 สามารถแสดงในรูปที่ 3.26 ดังนี้



รูปที่ 3.26 ค่าข้อมูลสัญญาณดิบที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC ด้วยการ  
 เปรียบเทียบรอบอ้างอิงของเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย Pololu รุ่น MiniIMU-9 v2 ขนาน  
 กับแกนความเร่งโน้มถ่วงของโลกที่ละแนวแกน

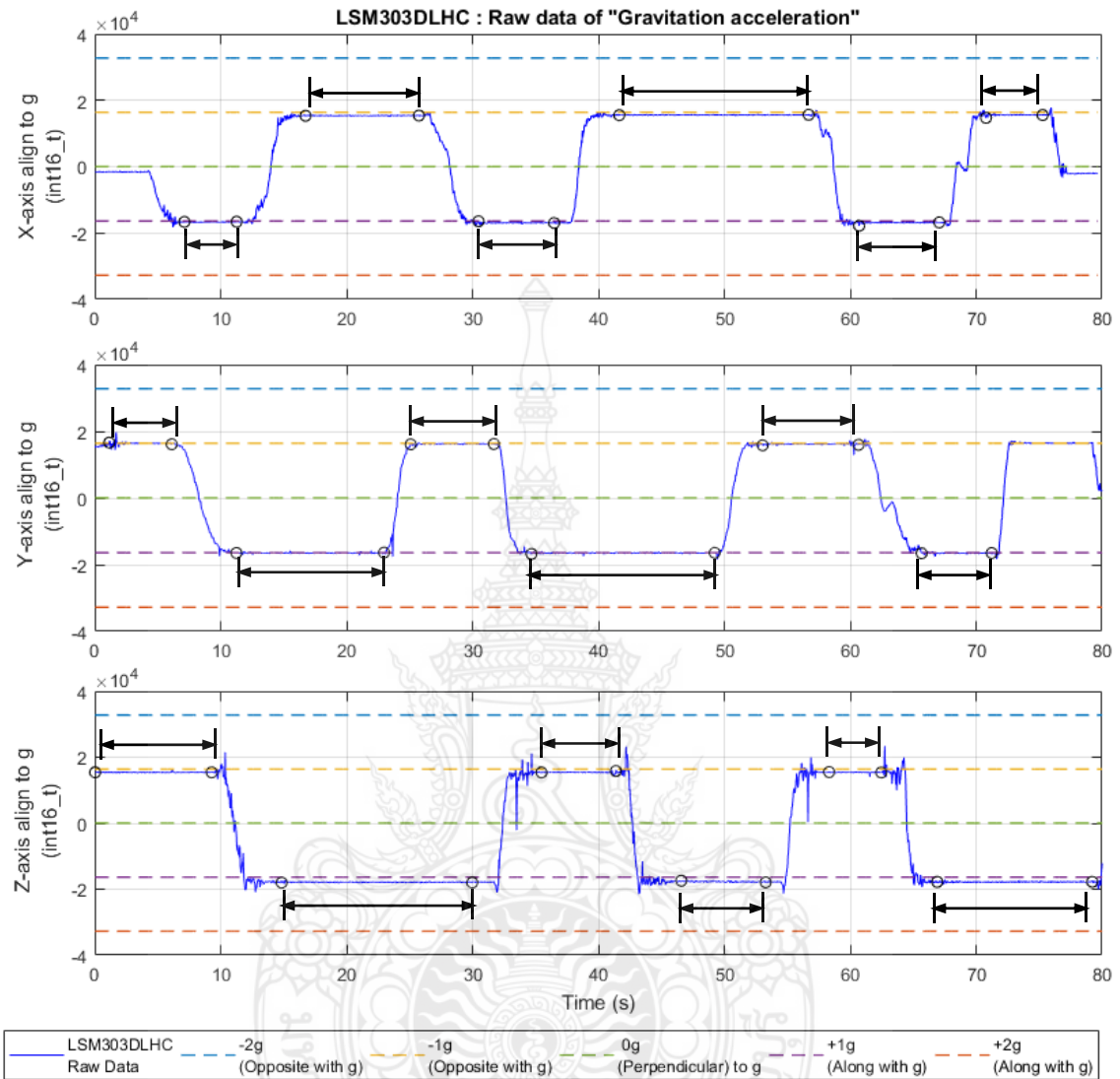
จากรูปที่ 3.26 แสดงการตรวจวัดค่าแวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งแบบเชิงเส้น LSM303DLHC ในเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย ของ Pololu รุ่น MiniIMU-9 v2 จากคุณสมบัติของผู้ผลิตในตารางที่ 3.11 และ 3.12 กำหนดให้เซนเซอร์สามารถตรวจวัดค่าความเร่งได้สูงสุดในช่วง  $-2g$  (หรือ  $-19.62 \text{ m/s}^2$ ) ถึง  $+2g$  (หรือ  $+19.62 \text{ m/s}^2$ ) โดยเซนเซอร์จะส่งข้อมูลเป็นข้อมูลชนิด int16\_t ซึ่งมีค่าจำนวนเต็มระหว่าง  $-32,768$  ถึง  $+32,767$  ดังนั้นการทดสอบวัดความเร่งจากความโน้มถ่วงโลกจะให้ค่า  $-1g$  เป็น  $-16,384$  และ  $+1g$  เป็น  $+16,383.5$  จากการทดลองนี้สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ผลจากการตรวจวัดค่าเฉลี่ยแวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกด้วยแต่ละแนวแกนของเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.27 และการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนในตารางที่ 3.11 , 3.13 และ 3.14 จะเห็นได้ว่าข้อมูลความเร่งจากเซนเซอร์วัดความเร่งแบบเชิงเส้น LSM303DLHC ที่ได้จากการทดสอบในตารางที่ 3.13 และ 3.14 นั้นมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าค่าศูนย์ลงมา อยู่ในช่วง 2.5-5% สำหรับแกน x และ อยู่ในช่วง 0.25-0.8% สำหรับแกน y และ อยู่ในช่วง 6-9% สำหรับแกน z ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ไม่มากนัก โดยที่มาของความผิดพลาดนี้อาจเกิดได้จากการใช้สายสัญญาณที่ยาวซึ่งเป็นข้อจำกัดของตำแหน่งที่ต้องติดตั้งเซนเซอร์ที่ห่างจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้แก่ตัวเซนเซอร์ลดต่ำลงอันเนื่องมาจากค่าความต้านทานรวมในสายไฟที่ยาวนั้นสูง

ตารางที่ 3.11 ตารางสรุปคุณสมบัติรายละเอียดของเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC จากผู้ผลิต

กรณีที่ทำการศึกษา	รูปแบบกรณีวิเคราะห์	ค่าที่อ่านได้
1. กรณีกรอบอ้างอิงเซนเซอร์ทิศทางเดียวกันกับ แวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก	ค่า $-2g$ ของตัวแปรชนิด Int16_t	-32,768.00
	ค่า $-1g$ ของตัวแปรชนิด Int16_t	-16,384.00
2. กรณีกรอบอ้างอิงเซนเซอร์ทิศทางตรงข้ามกับ แวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก	ค่า $+1g$ ของตัวแปรชนิด Int16_t	+16,383.50
	ค่า $+2g$ ของตัวแปรชนิด Int16_t	+32,767.00

ตารางที่ 3.12 คำอธิบายการตั้งค่าช่วงสูงสุดในการตรวจวัดค่าความเร่งในโปรแกรมจากผู้ผลิต ของเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC

1. BDU	Block data update. Default value : 0 (0: continuous update, 1: output registers not updated until MSB and LSB reading)
2. BLE	Big/little endian data section. Default value 0. (0: data LSB @ lower address, 1: data MSB @ lower address)
3. FS1-FS0	Fill-scale selection. Default Value: 00 (00: +/-2G, 01: +/-4G, 10: +/-8G, 11: +/-16G)



รูปที่ 3.27 การกำหนดช่วงข้อมูลเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งแบบเชิงเส้น LSM303DLHC ของแต่ละแนวแกนเมื่อปรับเทียบเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ตารางที่ 3.13 ตารางสรุปค่าเฉลี่ยของเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC จากค่าที่วัดได้จริงจากการทดลองปรับเทียบกรอบอ้างอิงเซนเซอร์มีทิศทางเดียวกันกับเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก

แกน	กรณีที่ทำการศึกษา	การคำนวณและการวิเคราะห์
	ค่าเฉลี่ยที่วัดได้เมื่อกรอบอ้างอิงเซนเซอร์มีทิศทางเดียวกันกับ g	-16,823.27
x	ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับ -1g	$(-16,823.27) - (-16,384) = -439.27$
	% ค่าความคลาดเคลื่อน	$(-439.27) / (-16384) \times 100 = +2.681\%$
	ค่าเฉลี่ยที่วัดได้เมื่อกรอบอ้างอิงเซนเซอร์มีทิศทางเดียวกันกับ g	-16,516.09
y	ค่าความผิดพลาดเปรียบเทียบกับ -1g	$(-16,516.09) - (-16,384) = -132.09$
	% ค่าความคลาดเคลื่อน	$(-132.09) / (-16384) \times 100 = +0.806\%$
	ค่าเฉลี่ยที่วัดได้เมื่อกรอบอ้างอิงเซนเซอร์มีทิศทางเดียวกันกับ g	-17,861.51
z	- ค่าความผิดพลาดเปรียบเทียบกับ -1g	$(-17,861.51) - (-16,384) = -1,477.51$
	% ค่าความคลาดเคลื่อน	$(-1,477.51) / (-16384) \times 100 = +9.018\%$

ตารางที่ 3.14 ตารางสรุปค่าเฉลี่ยของเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC จากค่าที่วัดได้จริงจากการทดลองปรับเทียบกรอบอ้างอิงเซนเซอร์มีทิศทางตรงข้ามกับเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก

แกน	กรณีที่ทำการศึกษา	การคำนวณและการวิเคราะห์
	ค่าที่วัดได้เมื่อกรอบอ้างอิงเซนเซอร์มีทิศทางตรงข้ามกับ g	+15,508.41
x	ค่าความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบกับ +1g	$15,508.41 - 16,383.5 = -875.09$
	% ค่าความคลาดเคลื่อน	$(-875.09) / 16,383.5 = -5.341\%$
	ค่าที่วัดได้เมื่อกรอบอ้างอิงเซนเซอร์มีทิศทางตรงข้ามกับ g	+16,343.38
y	ค่าความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบกับ +1g	$16,343.38 - 16,383.5 = -40.12$
	% ค่าความคลาดเคลื่อน	$(-40.12) / 16,383.5 = -0.245\%$
	ค่าที่วัดได้เมื่อกรอบอ้างอิงเซนเซอร์มีทิศทางตรงข้ามกับ g	+15,388.25
z	ค่าความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบกับ +1g	$15,388.25 - 16,383.5 = -995.25$
	% ค่าความคลาดเคลื่อน	$(-995.25) / 16383.5 = -6.075\%$



3.3.5.2 การประเมินข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 ที่ติดตั้งในเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย Razor รุ่น 6DOF IMU (เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งส่วนบนพื้นฐานเซนเซอร์เลเซอร์)

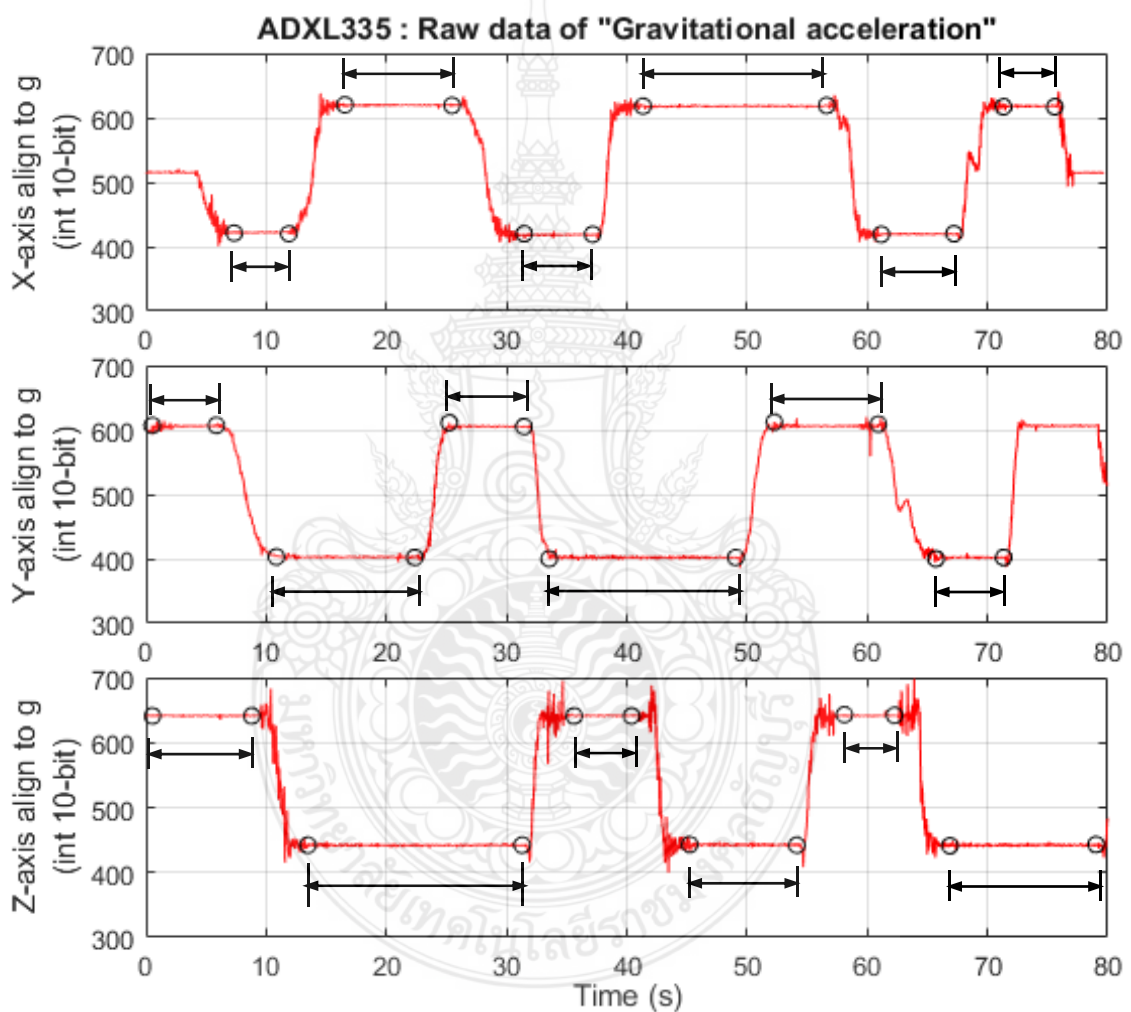
ในการตรวจวัดความเร่งการสั่นสะเทือนทางกลบริเวณฐานยึดเซนเซอร์เลเซอร์ จะใช้เซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 ซึ่งอยู่ในเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย Razor รุ่น 6DOF IMU จากคุณสมบัติของเซนเซอร์จากผู้ผลิตในตารางที่ 3.15 เซนเซอร์จะทำการตรวจวัดค่าความเร่งในแต่ละแนวแกนและส่งผลการตรวจวัดความเร่งออกมาในรูปแบบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออกตามค่าปริมาณความเร่งที่ตรวจวัดได้ด้วยออสซิลอโคป เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 3 โวลต์ ที่ความเร่งเท่ากับ  $0 \text{ m/s}^2$  สำหรับแกน x และ y จะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 1.35-1.65 V และแกน z จะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 1.2-1.8 V โดยที่ทั้ง 3 แนวแกนจะมีค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลง 270-330 mV ต่อ  $9.81 \text{ m/s}^2$  (หรือ 1g)

ตารางที่ 3.15 ตารางสรุปคุณสมบัติรายละเอียดของเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 จากผู้ผลิต

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
<b>SENSOR INPUT</b> Measurement Range	Each axis	±3	±3.6		g
<b>SENSITIVITY (RATIOMETRIC)<sup>2</sup></b> Sensitivity at X <sub>OUT</sub> , Y <sub>OUT</sub> , Z <sub>OUT</sub> Sensitivity Change Due to Temperature <sup>3</sup>	Each axis V <sub>S</sub> = 3 V V <sub>S</sub> = 3 V	270	300 ±0.01	330	mV/g %/°C
<b>ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)</b> 0 g Voltage at X <sub>OUT</sub> , Y <sub>OUT</sub> 0 g Voltage at Z <sub>OUT</sub> 0 g Offset vs. Temperature	V <sub>S</sub> = 3 V V <sub>S</sub> = 3 V	1.35 1.2	1.5 1.5 ±1	1.65 1.8	V V mg/°C
<b>POWER SUPPLY</b> Operating Voltage Range Supply Current Turn-On Time <sup>7</sup>	V <sub>S</sub> = 3 V No external filter	1.8	350 1	3.6	V µA ms


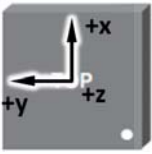
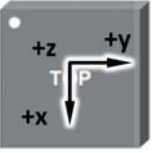
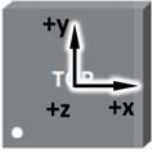
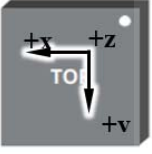
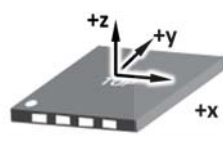
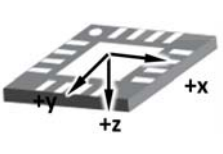
อย่างไรก็ตาม ปริมาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออกจากการตรวจวัดค่าความเร่งจะสัมพันธ์กับปริมาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้าจากแหล่งจ่าย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการทดลองเปรียบเทียบเบื้องต้น โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due ซึ่งสามารถตรวจวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้เท่ากับ 3.4 V และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due รับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเซนเซอร์วัดความเร่งทั้ง 3 แนวแกน เพื่อทำการแปรผลค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแต่ละในแกนให้เป็นรูปแบบเลขจำนวนจริงโดยใช้ฟังก์ชัน analogRead() ที่ความละเอียด 10 บิต ซึ่งจะให้ค่าตัวเลขแบบอนาล็อกอยู่ระหว่าง 0-1023 จากผลการทดลองเปรียบเทียบกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์ตาม

แนวเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกและตรงข้ามกับตามแนวเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 ที่ติดตั้งในเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย Razor รุ่น 6DOF IMU โดยการหมุนเซนเซอร์วัดความเร่งให้มาขนานกับเวกเตอร์ความโน้มถ่วงโลก และหมุนเซนเซอร์กลับให้สวนทางกับเวกเตอร์ความโน้มถ่วงโลกสามครั้ง สามารถแสดงข้อมูลดิบจากการตรวจวัดค่าสัญญาณอนาล็อกดังรูปที่ 3.28 และการสรุปหาความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเซนเซอร์และค่าสัญญาณอนาล็อก ดังแสดงในตารางที่ 3.16 และ 3.17 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.28 ค่าข้อมูลสัญญาณดิบที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 ด้วยการปรับเทียบกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย Razor รุ่น 6DOF IMU ขนานกับเวกเตอร์แรงโน้มถ่วงของโลกทีละแนวแกน และการกำหนดช่วงเพื่อหาค่าเฉลี่ยแต่ละช่วง

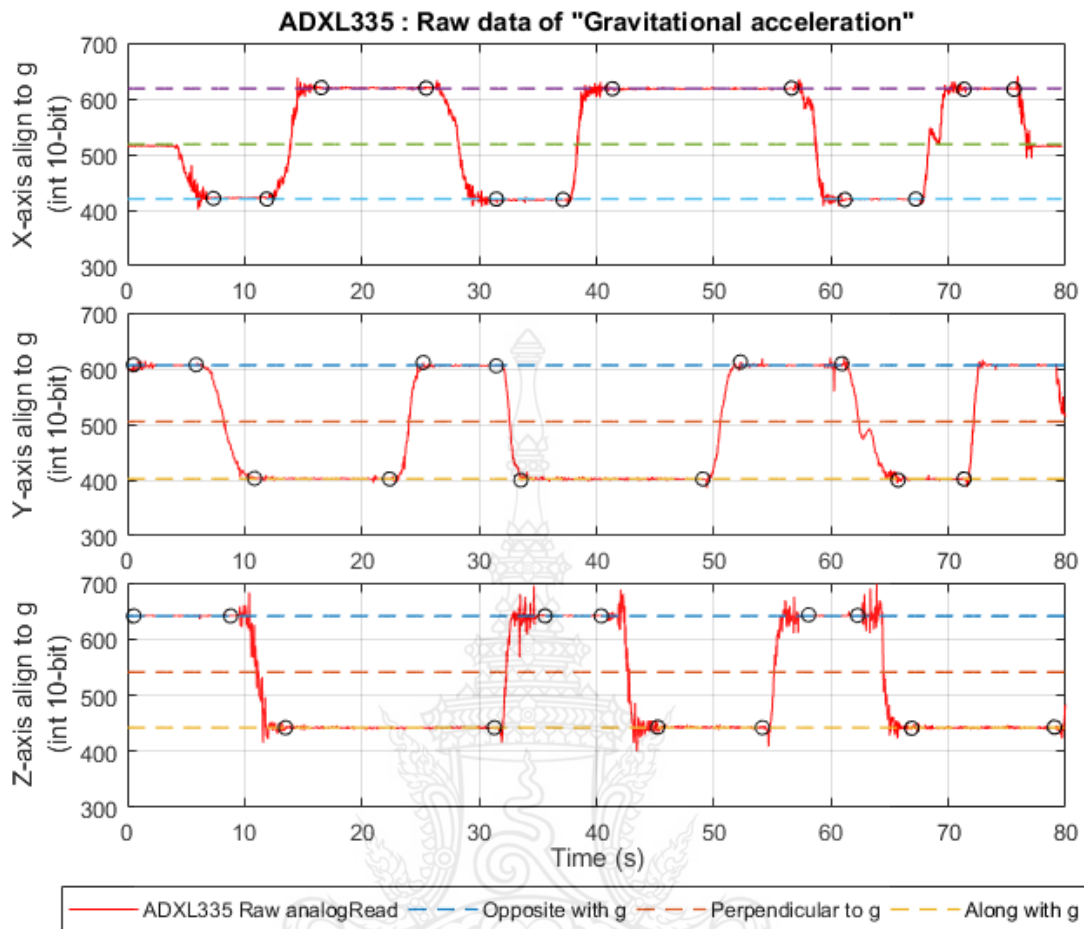
ตารางที่ 3.16 รูปแบบการทดลองเปรียบเทียบทิศทางการวางตัวของเซนเซอร์วัดค่าความเร่งเชิงเส้น ADXL335 กับเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) ที่สัมพันธ์กับสัญญาณข้อมูลขาออกรูปแบบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่าสัญญาณอนาล็อก

รูปแบบทิศทางการวางตัว (Orientation) ของเซนเซอร์วัดค่าความเร่งเชิงเส้น ADXL335	แนวแกน	ลักษณะการวางตัว	ค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก จากเซนเซอร์ (mV)	analog Read() 10 บิต
 เวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) มีทิศทางพุ่งลงในแนวดิ่ง มีค่าเท่ากับ $9.81 \text{ m/s}^2$ หรือแทนด้วยเวกเตอร์ g				
 $X_{OUT} = -1g$ $Y_{OUT} = 0g$ $Z_{OUT} = 0g$	x	ตรงข้ามกับเวกเตอร์ g	2.04	618
	y	ตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.64	496
	z	ตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.79	540
 $X_{OUT} = -1g$ $Y_{OUT} = 0g$ $Z_{OUT} = 0g$	x	ตามแนวเวกเตอร์ g	1.40	420
	y	ตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.72	521
	z	ตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.80	542
 $X_{OUT} = 0g$ $Y_{OUT} = 1g$ $Z_{OUT} = 0g$	x	ตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.71	515
	y	ตรงข้ามกับเวกเตอร์ g	2.00	606
	z	ตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.79	541
 $X_{OUT} = 0g$ $Y_{OUT} = -1g$ $Z_{OUT} = 0g$	x	ตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.70	512
	y	ตามแนวเวกเตอร์ g	1.34	402
	z	ตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.80	543
 $X_{OUT} = 0g$ $Y_{OUT} = 0g$ $Z_{OUT} = 1g$	x	ตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.72	516
	y	ตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.67	503
	z	ตรงข้ามกับเวกเตอร์ g	2.11	641
 $X_{OUT} = 0g$ $Y_{OUT} = 0g$ $Z_{OUT} = -1g$	x	ตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.75	529
	y	ตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.66	501
	z	ตามแนวเวกเตอร์ g	1.47	442

ตารางที่ 3.17 การสรุปหาค่าเฉลี่ยการทดลองเปรียบเทียบทิศทางการวางตัวของเซนเซอร์วัดค่าความเร่งเชิงเส้น ADXL335 กับเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) ที่สัมพันธ์กับสัญญาณข้อมูลขาออกในรูปแบบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่าสัญญาณอนาล็อกในตารางที่ 3.15

แนวแกนเซนเซอร์	x-axis		y-axis		z-axis	
	Output Voltage (V)	analogRead (10 bit)	Output Voltage (V)	analogRead (10 bit)	Output Voltage (V)	analogRead (10 bit)
1) กรณีตรงข้ามกับเวกเตอร์ g	2.04	618	2.00	606	2.11	641
2) กรณีตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	1.72	518	1.67	505	1.79	541
3) กรณีตามแนวเวกเตอร์ g	1.40	420	1.34	402	1.47	442

การสรุปผลการอ่านค่าสัญญาณอนาล็อกด้วยการทดลองเปรียบเทียบทิศทางการวางตัวของกรอบอ้างอิงเซนเซอร์วัดค่าความเร่งเชิงเส้น ADXL335 กับเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) ในตารางที่ 3.17 ทำให้สามารถวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยสัญญาณอนาล็อกในกรณีแนวแกนมีทิศทางตั้งฉากกับเวกเตอร์ g ในแกน x และ y เป็น 1.67-1.72 V ซึ่งใกล้เคียงกับค่า 0g สำหรับแกน x และ y ในตารางที่ 3.15 ที่มีค่าในช่วงได้เป็น 1.35-1.65 V และ ในแกน z เป็น 1.79 V ซึ่งใกล้เคียงกับค่า 0g สำหรับแกน z ในตารางที่ 3.15 ที่มีค่าในช่วงได้เป็น 1.2-1.8 V ค่าความศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้นั้นสูงกว่า เนื่องมาจากไฟเลี้ยงที่ป้อนให้กับเซนเซอร์นั้นมีค่ามากกว่าในตารางที่ 3.15 ที่ได้ทดสอบจากผู้ผลิต สำหรับกรณีแนวแกนมีทิศทางตรงข้ามกับเวกเตอร์ g , และ และกรณีแนวแกนมีทิศทางตามแนวเวกเตอร์ g ของแต่ละแนวแกนของเซนเซอร์จะต้องมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 0.3 V หรือ ลดลง 0.3 V ตามลำดับ ซึ่งก็ตรงกับค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากเซนเซอร์ โดยแสดงผลการเปรียบเทียบค่าสัญญาณอนาล็อกจากการเปรียบเทียบกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.29 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.29 การเปรียบเทียบค่าสัญญาณอนาล็อกจากการปรับเทียบกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 กับเวกเตอร์ความโน้มถ่วงของโลกต่อค่าเฉลี่ยสัญญาณอนาล็อกในกรณีแนวแกนมีทิศทางตรงข้ามเวกเตอร์  $g$  , กรณีแนวแกนมีทิศทางตั้งฉากเวกเตอร์  $g$  และ และกรณีแนวแกนมีทิศทางตามแนวเวกเตอร์  $g$

จากการทดลองปรับเทียบกรอบอ้างอิงเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้นตามแนวเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกทั้งสองชนิดพบว่า เซนเซอร์ LSM303DLHC ในเซนเซอร์ที่ใช้วัดความเฉื่อย Pololu รุ่น MiniIMU-9 v2 และเซนเซอร์ ADXL335 ในเซนเซอร์ที่ใช้วัดความเฉื่อย Razor รุ่น 6DOF IMU พบว่ามีค่า เซนเซอร์วัดความเร่งทั้งสองชนิดอ่านค่าได้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลดิบที่คล้ายคลึงกัน แต่ช่วงของค่าข้อมูลดิบที่อ่านค่าได้นั้นแตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาค่าตัวประกอบในการแปลง (scaling factor) จากข้อมูลดิบให้เป็นค่าความเร่งของเซนเซอร์แต่ละตัวเพื่อไปใช้ในการวิเคราะห์ทางความถี่ของค่าความเร่งการสั่นสะเทือนทางกลจากข้อมูลที่ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้นทั้งสองตัวในลำดับขั้นถัดไป

### 3.3.6 การคำนวณหาค่าตัวประกอบการแปลงข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร่งเป็นค่าความเร่งเชิงเส้น

จากการเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้นสำหรับตรวจวัดการสั่นสะเทือนทางกลในหัวข้อก่อนหน้า ทำให้สามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยผลต่างจากการตรวจวัดเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกในกรณีที่แต่ละแนวแกนกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์วัดความเร่งมีทิศทางตรงข้าม ( $-g = -9.81 \text{ m/s}^2$ ), ตั้งฉาก ( $g = 0 \text{ m/s}^2$ ) และตามแนวเวกเตอร์ความเร่งแรงโน้มถ่วงของโลก ( $+g = +9.81 \text{ m/s}^2$ ) จากเซนเซอร์ทั้งสองตัว ดังนี้

ตารางที่ 3.18 การคำนวณหาค่าตัวประกอบการแปลงข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร่งเป็นค่าความเร่งเชิงเส้นเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335

กรณีศึกษา	แนวแกน	Int16_t=g	การคำนวณหาค่าตัวประกอบการแปลงของแต่ละแนวแกน (Int16_t/g)
การเปรียบเทียบกรณีแนวแกนมีทิศทางตรงข้ามกับเวกเตอร์ g และตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	x y z	16,383.5	16,383.5/9.81 = 1670.081549
การเปรียบเทียบกรณีแนวแกนมีทิศทางตามแนวเวกเตอร์ g และตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	x y z	(-16,384)	(-16,384)/9.81 = -1670.132518 1670.082

ตารางที่ 3.19 การคำนวณหาค่าตัวประกอบการแปลงข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร่งเป็นค่าความเร่งเชิงเส้นเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335

กรณีศึกษา	แนวแกน	analogRead (10 bit)	analogRead (10 bit) = g	การคำนวณหาค่าตัวประกอบการแปลงของแต่ละแนวแกน (bit)/g
การเปรียบเทียบกรณีแนวแกนมีทิศทางตรงข้ามกับเวกเตอร์ g และตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	x y z	618 606 641	618-518 = +100 606-505 = +101 641-541 = +100	+100/9.81 = 10.19367992 +101/9.81 = 10.29561672 +100/9.81 = 10.19367992
การเปรียบเทียบกรณีแนวแกนมีทิศทางตามแนวเวกเตอร์ g และตั้งฉากกับเวกเตอร์ g	x y z	420 402 442	420-518 = -98 402-505 = -103 442-541 = -99	-98/9.81 = -9.98980632 -103/9.81 = -10.49949032 -99/9.81 = -10.09174312

3.3.7 การวิเคราะห์หาค่าความเร่งการสั่นสะเทือนทางกลจากข้อมูลที่ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้นทั้งสองตัว

ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยทดลองวางเซนเซอร์วัดความเร่งทั้งสองตัวในแนวระดับโดยให้แนวแกน z ของเซนเซอร์ทั้งสองขนานกับเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $g$ ) และบันทึกผลการทดลอง โดยที่ส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $g$ ) คือ

$$\mathbf{g} = [0 \ 0 \ 9.81]^T \text{ m/s}^2 \quad (3.3)$$

และกำหนดให้ค่าข้อมูลดิบความเร่งที่เซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้นทั้งสองตัวตรวจวัดได้ คือ

$$\mathbf{a} = \left[ \frac{a_x}{\text{ScaleFactor}(a_x)} \quad \frac{a_y}{\text{ScaleFactor}(a_y)} \quad \frac{a_z}{\text{ScaleFactor}(a_z)} \right]^T \quad (3.4)$$

จากการทดลองพบว่า ในกรณีที่กรอบอ้างอิงแนวแกน z ของเซนเซอร์วัดความเร่งไม่ขนานกับเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกหรือเกิดค่ามุมองศาการก้มและองศาการเอียง ( $\phi, \theta$ ) จะส่งผลให้แกน x และ y สามารถตรวจวัดส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงได้ ดังนั้นในการขจัดเวกเตอร์ความโน้มถ่วงโลกออกจากข้อมูลความเร่งที่วัดได้เพื่อหาค่าความเร่งที่แท้จริงจากการสั่นสะเทือนทั้ง 3 แนวแกนโดยใช้เมทริกซ์การหมุนของเวกเตอร์ความโน้มถ่วงโลกจากเซนเซอร์วัดความเร่งใน 2 องศาอิสระ เพื่อให้ได้ ( $g_{xyz}$ ) เพื่อนำไปลบออกจากความเร่งที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง คือ

$$\mathbf{g}_{xyz} = \mathbf{R}_{xyz}(\phi, \theta) \cdot \mathbf{g} \quad (3.5)$$

หรือ

$$\mathbf{g}_{xyz} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi - c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi + c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 9.81 \end{bmatrix}$$

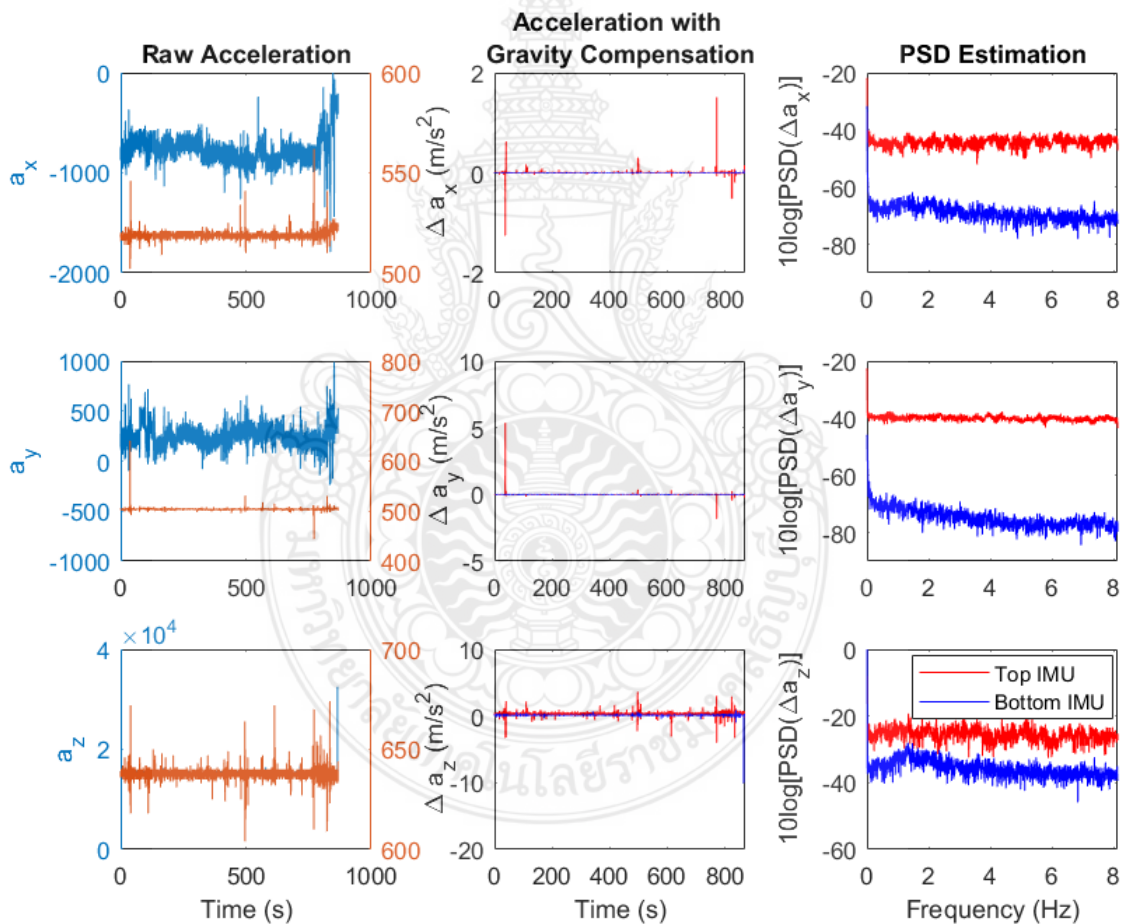
และการประมาณค่ามุมองศาการก้มและองศาการเอียง ( $\phi, \theta$ ) จากส่วนประกอบของความเร่งที่วัดได้จากเซนเซอร์ คือ

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right), \quad \theta = \tan^{-1} \left( \frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right) \quad (3.6)$$

จากการคำนวณนี้จะสามารถหาส่วนประกอบเวกเตอร์ความโน้มถ่วงโลกแต่ละแนวแกน คือ  $\mathbf{g}_{xyz} = [g_x \ g_y \ g_z]^T$  และนำมาลบออกจากค่าความเร่งที่เซนเซอร์วัดได้ จึงจะได้รับค่าความเร่งในการสั่นสะเทือนที่แท้จริงใน 3 แนวแกนคือ  $\Delta \mathbf{a} = [\Delta a_x \ \Delta a_y \ \Delta a_z]^T$  ดังแสดงในสมการ 3.7 และจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลดิบของเซนเซอร์วัดความเร่งทั้งสองตัวสามารถแสดงในรูปแบบที่ 3.30 ดังต่อไปนี้

$$\Delta \mathbf{a} = \mathbf{a} - \mathbf{g}_{xyz} \quad \left. \begin{array}{l} \Delta a_x \\ \Delta a_y \\ \Delta a_z \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta a_x \\ \Delta a_y \\ \Delta a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x / \text{ScaleFactor}(a_x) \\ a_y / \text{ScaleFactor}(a_y) \\ a_z / \text{ScaleFactor}(a_z) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix}$$



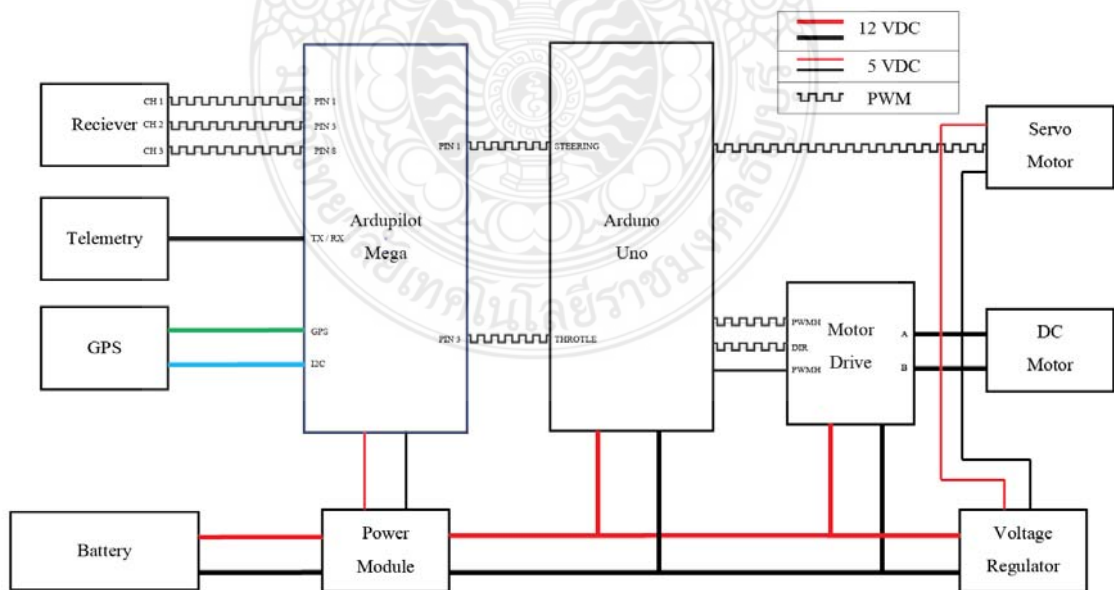
รูปที่ 3.30 การตรวจสอบและการหาค่าความเร่งที่แท้จริงใน 3 แนวแกนจากข้อมูลที่ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์วัดความเร่ง



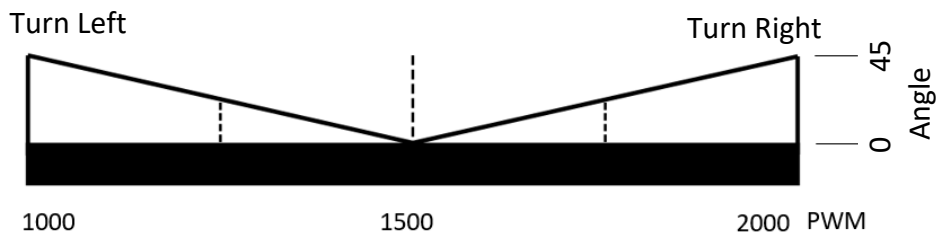
จากรูปที่ 3.30 แสดงการตรวจสอบค่าความเร่งที่แท้จริงใน 3 แนวแกน ที่ตรวจวัดได้ เซนเซอร์วัดความเร่งทั้งสองตัวในลักษณะถูกวางนิ่งตามแนวนอน โดยได้แบ่งออกเป็น ค่าข้อมูลดิบ จากเซนเซอร์วัดความเร่งที่รวมความเร่งที่แท้จริงกับเวกเตอร์  $g$  ในหลักซ้าย , ค่าความเร่งในการ สั่นสะเทือนที่แท้จริงที่ผ่านการขจัดเวกเตอร์  $g$  ออกไปแล้ว ในหลักกลาง และ การประมาณค่า PSD ของ ค่าข้อมูลความเร่งในการสั่นสะเทือนที่แท้จริง ในหลักขวา

### 3.3.8 การติดตั้งหน่วยควบคุมการนำทางในหุ่นยนต์รถบังคับวิทยุแบบสี่ล้อและหุ่นยนต์เรือ สองหุ่นขนาดเล็กบังคับวิทยุภาคพื้นผิวน้ำ

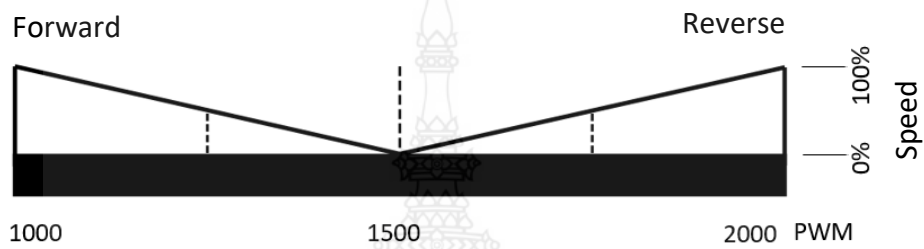
การติดตั้งหน่วยนำทางอัตโนมัติ Ardupilot Mega และอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นสำหรับการเคลื่อนที่อัตโนมัติเข้ากับรถบังคับวิทยุแบบสี่ล้อ Weight Grade V.2 สามารถอธิบายแผนผังการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 3.31 โดยข้อมูลขาออกจากหน่วยนำทางอัตโนมัติ Ardupilot Mega จะส่งคำสั่งการควบคุมโดยตรงด้วยเทคนิค Pulse-Width Modulation (PWM) เพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ (servo motor) ที่เชื่อมต่อกับกลไกบังคับเลี้ยวล้อหน้า และสำหรับการควบคุมล้อหลังด้วยมอเตอร์ กระแสตรงที่มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง จะต้องส่งคำสั่งการเคลื่อนที่ไปยังอุปกรณ์ควบคุม มอเตอร์ (motor drive) ก่อนเพื่อควบคุมปริมาณการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงไปยังมอเตอร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแปลงค่าสัญญาณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno เพื่อควบคุมความเร็วล้อ หลังด้วยเทคนิค %Duty cycle รูปแบบ 8 บิต และทิศทางการหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 3.31 แผนภาพวงจรไฟฟ้าของหุ่นยนต์รถบังคับวิทยุแบบสี่ล้อ



รูปที่ 3.32 แผนภาพการควบคุมการบังคับเลี้ยวล้อหน้าของรถบังคับวิทยุแบบสี่ล้อ



1000	1500	2000	PWM
255	0	255	AnalogWrite 8 bit
100%	0	100%	%Duty Cycle

รูปที่ 3.33 แผนภาพการควบคุมทิศทางและความเร็วของล้อหลังของรถบังคับวิทยุแบบสี่ล้อ



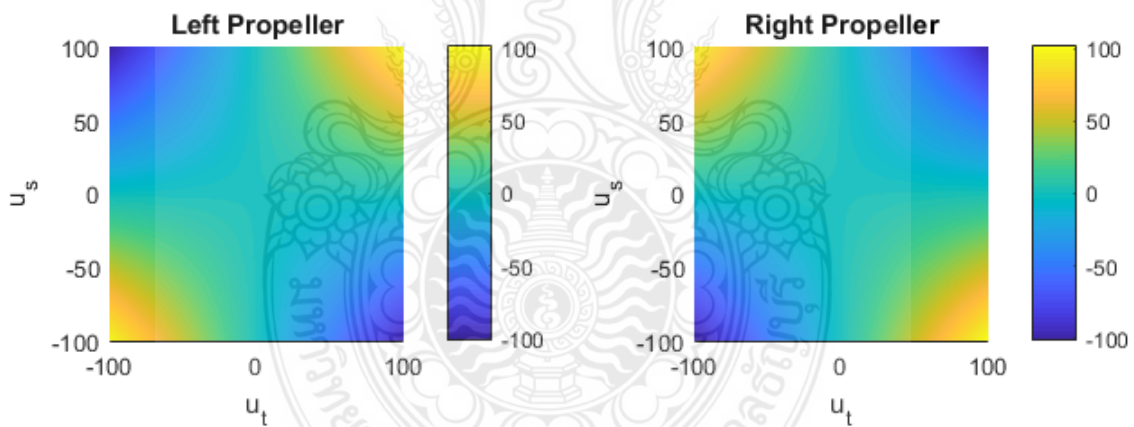
รูปที่ 3.34 อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมรถบังคับวิทยุแบบสี่ล้อ

สำหรับการติดตั้งหน่วยนำทางอัตโนมัติ Ardupilot Mega และอุปกรณ์ต่างๆเข้ากับเรือสองท่อนขนาดเล็กจะมีข้อแตกต่างจากรถบังคับวิทยุแบบสี่ล้อ ในด้านการควบคุมการเคลื่อนที่ กล่าวคือ หุ่นยนต์รถแบบสี่ล้อจะบังคับเลี้ยวด้วยล้อหน้าและขับเคลื่อนด้วยล้อหลัง ซึ่งแตกต่างจาก

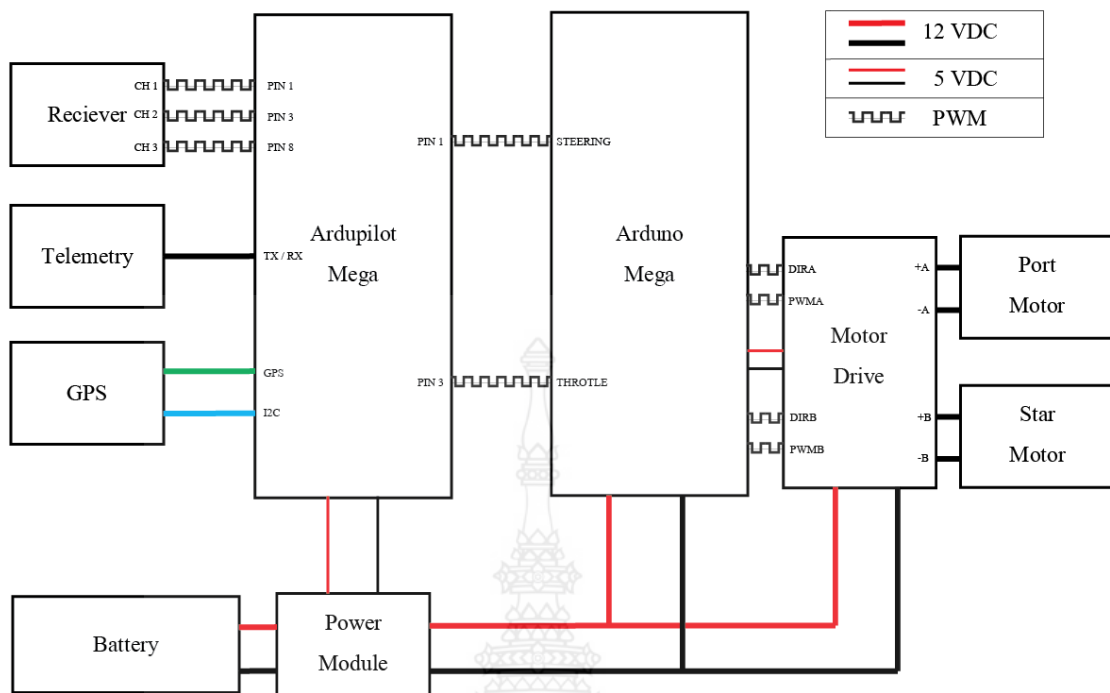
หุ่นยนต์เรือแบบสองท่อนที่ใช้การควบคุมใบพัดสองใบที่ติดตั้งอยู่กึ่งกลางลำเรือของแต่ละท่อน เพื่อใช้สร้างแรงผลักที่เท่ากัน ทำให้เคลื่อนที่ในแนวตรง (เดินหน้า-ถอยหลัง) หรือ สร้างแรงผลักที่แตกต่างกันเพื่อบังคับเลี้ยว (หรือเรียกว่า Differential-drive) ดังนั้นสัญญาณขาออกจากหน่วยนำทางอัตโนมัติ Ardupilot Mega ที่มี 2 ค่า ได้แก่ การบังคับเลี้ยวและทิศทางของความเร็ว จะต้องนำมาแปลงเป็นทิศทางและความเร็วสำหรับการขับเคลื่อนการหมุนของใบพัดทั้ง 2 ใบ ดังสมการ

$$\left. \begin{aligned} u_{pL} &= u_t + 0.5u_s u_t + 0.3u_s \\ u_{pR} &= u_t - 0.5u_s u_t - 0.3u_s \end{aligned} \right\} (3.8)$$

เมื่อ  $u_{pL}$  และ  $u_{pR}$  คือ ความเร็วและทิศทางของใบพัดซ้ายและใบพัดขวา ตามลำดับ,  $u_s$  และ  $u_t$  คือ สัญญาณขาออกจากจากหน่วยควบคุมการนำทาง Ardupilot Mega เพื่อการบังคับเลี้ยวและควบคุมทิศทางความเร็ว ตามลำดับ รูปแบบความเร็วและทิศทางสำหรับควบคุมใบพัดเรือแบบสองท่อนที่มีการขับเคลื่อนที่ Differential-drive ดังแสดงในรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 รูปแบบความเร็วและทิศทางสำหรับควบคุมใบพัดเรือทั้งสองด้าน ที่มีการขับเคลื่อนแบบ Differential-drive



รูปที่ 3.36 แผนภาพการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าของหุ่นยนต์เรือสองท่อนขนาดเล็ก

### 3.3.9 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดข้อมูลต่างๆบนหุ่นยนต์เรือสองท่อนเพื่อเก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์

ในการเก็บข้อมูลอุทกศาสตร์ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้หุ่นยนต์เรือแบบสองท่อนขนาดเล็ก ที่บังคับด้วยคลื่นวิทยุภาคพื้นผิวน้ำแทนการใช้หุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่นที่มีขนาดใหญ่กว่า เพราะนอกจากจะมีความสะดวกในการขนย้ายแล้วนั้น รูปแบบการติดตั้งและการเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ต่างๆสำหรับการเก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์ ซึ่งจะแยกออกจากระบบการขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติโดยสิ้นเชิง ทำให้การปฏิบัติงานเก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์ด้วยหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อนขนาดเล็กบังคับวิทยุภาคพื้นผิวน้ำเป็นไปได้อย่างสะดวกมากยิ่งขึ้น

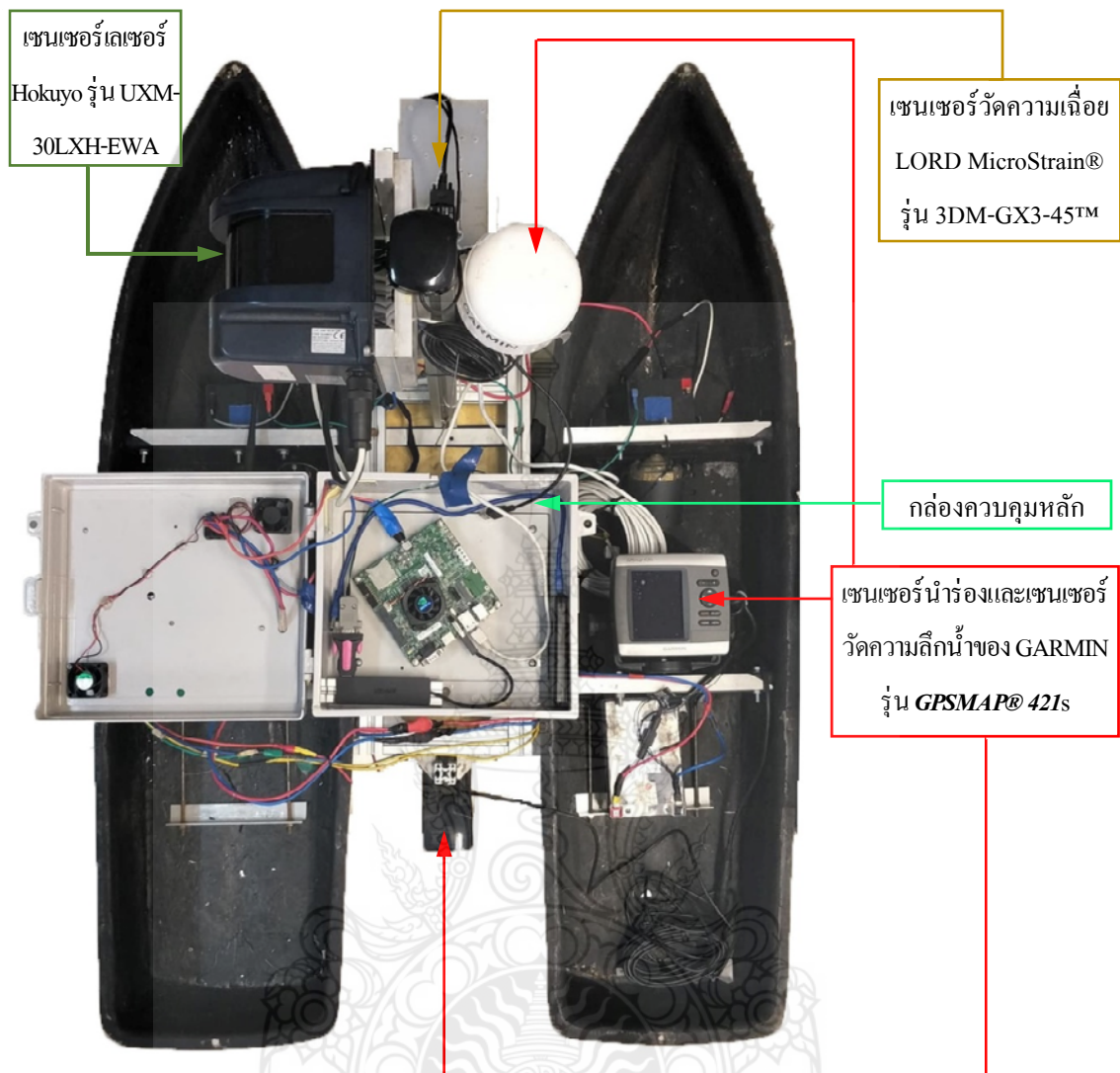
สำหรับอุปกรณ์และเซนเซอร์ต่างๆตรวจวัดข้อมูลทางอุทกศาสตร์ที่ติดตั้งในหุ่นยนต์แบบเรือสองท่อนขนาดเล็กบังคับวิทยุภาคพื้นผิวน้ำ ประกอบไปด้วย เซนเซอร์เลเซอร์ Hokuyo รุ่น UXM-30LXH-EWA, เซนเซอร์วัดความเค็ม LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™, เซนเซอร์นำร่องและวัดความลึกน้ำของ GARMIN รุ่น **GPSMAP® 421s** โดยเชื่อมต่อกับโมดูลระบบสมองกลฝังตัวขนาดเล็ก NVIDIA Jetson TK1 ประมวลผลด้วยระบบปฏิบัติการ Linux Ubuntu 14 LTS ซึ่งถูกติดตั้งไว้ในกล่องควบคุมหลัก รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์ต่างๆ เพื่อตรวจวัดข้อมูลทางอุทกศาสตร์ มีดังต่อไปนี้

1) เซนเซอร์เลเซอร์ Hokuyo รุ่น UXM-30LXH-EWA ติดตั้งอยู่บริเวณกึ่งกลางลำเรือ ส่วนหน้า ซึ่งอยู่บนเสาอลูมิเนียมที่มีความสูงจากระดับผิวน้ำอ้างอิงขึ้นมา 68 เซนติเมตร และกำหนดให้ระนาบการตรวจวัดระยะทางของวัตถุทางฝั่งด้านซ้าย (Port) ของลำเรือ และระนาบการวัด จะทำมุมตั้งฉากกับผิวน้ำตรวจวัดตั้งฉากกับผิวน้ำ

2) เซนเซอร์วัดความเครียด LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ ติดตั้งที่บริเวณ ใกล้เคียงกับเซนเซอร์เลเซอร์ โดยกำหนดให้กรอบอ้างอิงของเซนเซอร์มีทิศทางดังนี้ : +x มีทิศทางพุ่งไปด้านหน้าตามแนวยาวของตัวเรือ, +y มีทิศทางพุ่งออกทางด้านซ้าย (port) และ +z มีทิศทางพุ่งขึ้นตั้งฉากกับผิวน้ำ โดยในส่วนของเซนเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสจะติดตั้งอยู่ที่ยอดเสายึดเซนเซอร์เลเซอร์

3) เซนเซอร์นำร่องและวัดความลึกน้ำของ GARMIN รุ่น **GPSMAP® 421s** ติดตั้งเซนเซอร์คลื่นเสียงสะท้อน (echo sounder) ที่บริเวณกึ่งกลางส่วนท้ายของลำเรือ โดยที่เซนเซอร์คลื่นเสียงสะท้อนจะอยู่ต่ำกว่าผิวน้ำไม่เกิน 10 เซนติเมตร และในส่วนของเซนเซอร์รับสัญญาณจีพีเอส จะติดตั้งอยู่บริเวณส่วนบนยอดเสายึดเซนเซอร์เลเซอร์

4) กล่องควบคุมหลักสำหรับการติดตั้ง โมดูลระบบสมองกลฝังตัวขนาดเล็ก NVIDIA Jetson TK1 และ หน่วยนำทางอัตโนมัติ Ardupilot Mega รวมถึงอุปกรณ์เสริมต่างๆ โดยจะติดตั้งกล่องควบคุมที่บริเวณกึ่งกลางลำเรือ

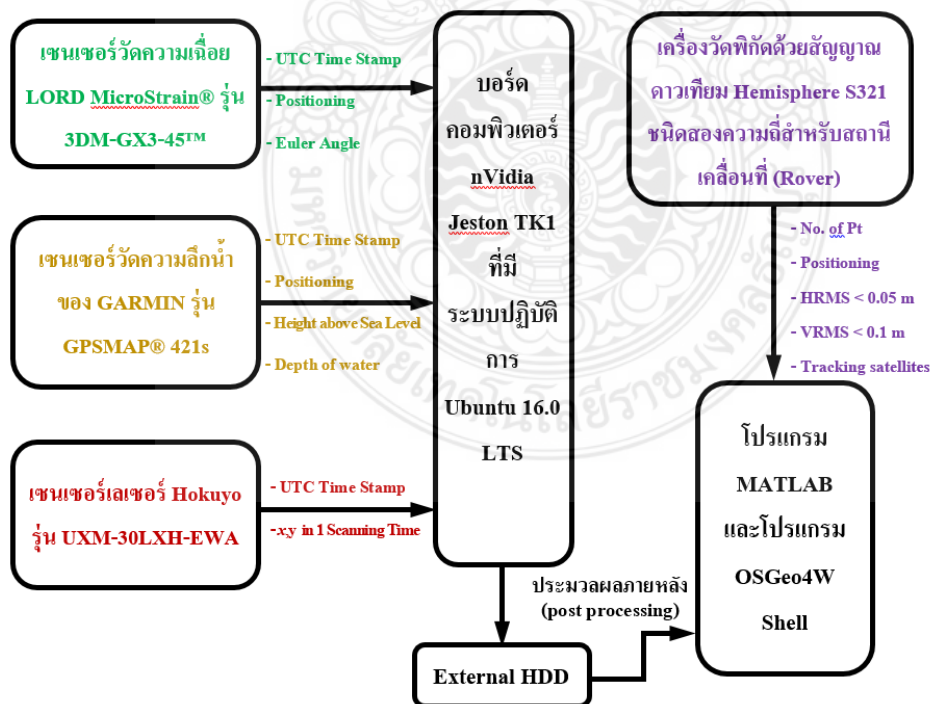


รูปที่ 3.37 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับตรวจวัดข้อมูลทางอุทกศาสตร์

ดังนั้น ระบบต่างๆที่ถูกติดตั้งในหุ่นยนต์เรือสองท่อนขนาดเล็กจะสามารถแบ่งออกเป็นสอง ระบบหลัก ได้แก่ 1) ระบบการควบคุมการขับเคลื่อนโดยผู้ใช้หรือแบบติดตามเส้นวิถีโคจรอัตโนมัติ โดยใช้หน่วยควบคุมการนำทาง อาคูไฟลิต เมกะ และเซนเซอร์ต่างๆเพื่อควบคุมความเร็วและทิศทางของใบพัดทั้งสอง และ 2) ระบบตรวจวัดและจัดเก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์ด้วยเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันโดยใช้โมดูลระบบสมองกลฝังตัวขนาดเล็ก NVIDIA Jetson TK1 ที่ติดตั้งระบบปฏิบัติการ Robot Operation System (ROS) สำหรับเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจวัดและจัดเก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์เพื่อนำไปใช้ประมวลผลในขั้นถัดไป

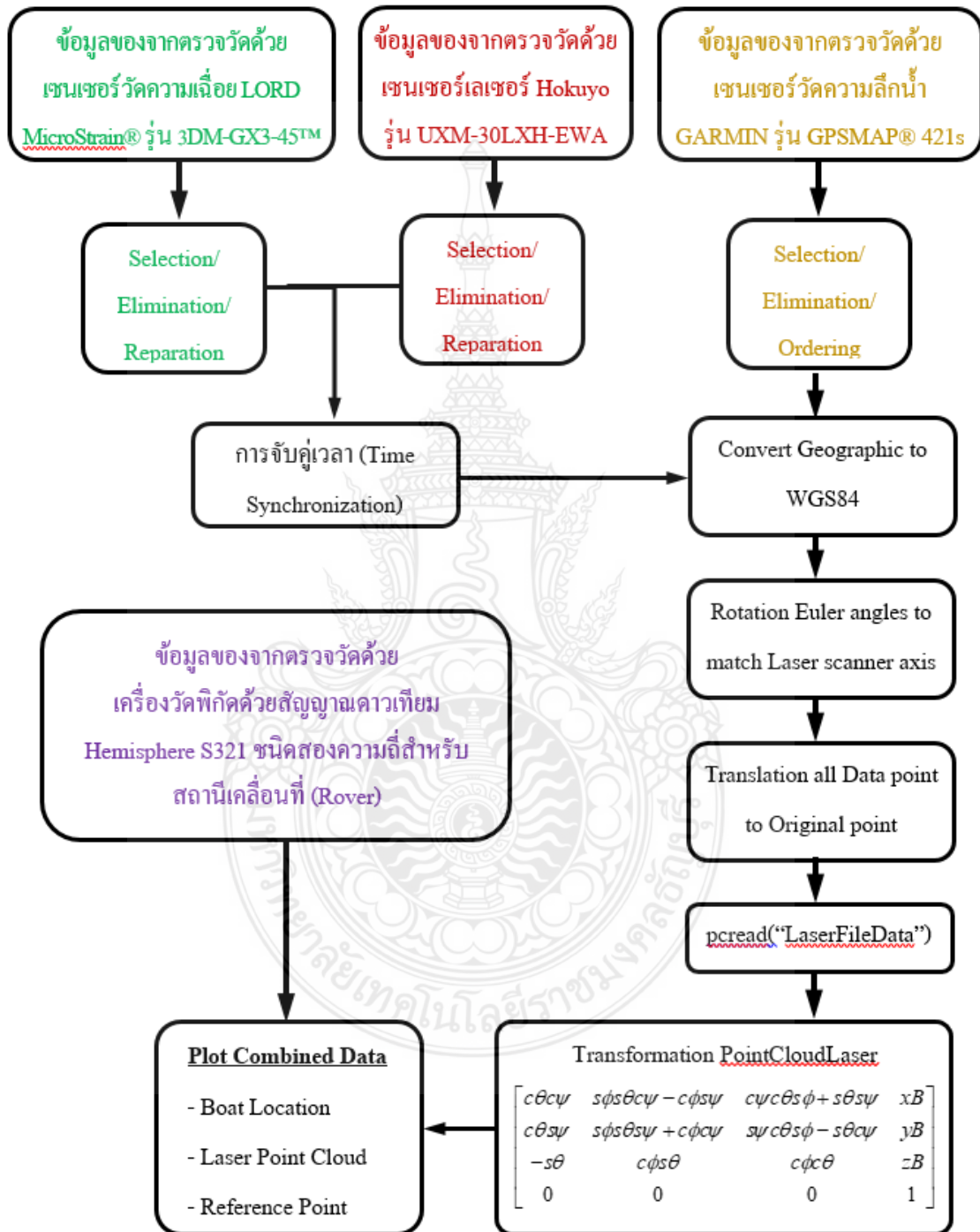
### 3.3.10 กระบวนการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน

สำหรับข้อมูลทางอุทกศาสตร์ต่างๆหลังจากการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ที่ถูกติดตั้งบนหุ่นยนต์เรือสองหุ่นจะถูกจัดเก็บลงในฮาร์ดดิสก์โดยผ่าน โมดูลระบบสมองกลฝังตัวขนาดเล็ก NVIDIA Jetson TK1 ด้วยระบบปฏิบัติการ Robot Operation System (ROS) โดยเซนเซอร์แต่ละชนิดจะทำหน้าที่ตรวจวัดข้อมูลต่างๆที่มีความถี่ต่างกัน ได้แก่ 1) เซนเซอร์วัดความเค้น LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ ที่สามารถตรวจวัดข้อมูลการระบุตำแหน่งค่าพิคคของตัวเรือในระบบพิกัดแบบค่าตัวเลขทศนิยม (Decimal Degree : DD) และค่ามุมออยเลอร์ซึ่งเป็นลักษณะการวางตัว (Orientation) ของลำเรือใน 3 แนวแกน (มุมโคลง, มุมก้มเงย และมุมหันเห) ด้วยความถี่ 40 เฮิรซ์ 2) เซนเซอร์วัดความลึกน้ำของ GARMIN รุ่น GPSMAP® 421s สามารถเก็บข้อมูลค่าความลึกของน้ำที่พิกัดต่างๆด้วยการระบุตำแหน่งตัวเรือซึ่งแสดงค่าพิคคในระบบพิกัดภูมิศาสตร์แบบที่เรียกว่า องศา ลิปดา ฟลิปดา (Degrees Minutes Seconds : DMS) ด้วยความถี่ 1 เฮิรซ์ โดยข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเค้นและเซนเซอร์วัดความลึกน้ำนั้นจะถูกอ่านและเก็บข้อมูลโดยภาษาซี ส่วน 3) เซนเซอร์เลเซอร์ Hokuyo รุ่น UXM-30LXH-EWA สามารถตรวจวัดและส่งข้อมูลตรวจวัดรายละเอียดที่อยู่เหนือผิวน้ำในระบบพิกัดเชิงขั้วที่มีความถี่ 2 เฮิรซ์ โดยข้อมูลจะถูกแปลงให้อยู่ในระบบเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันสำเร็จรูปในระบบปฏิบัติการ ROS โดยแผนภาพการเชื่อมต่อและส่งถ่ายข้อมูลการตรวจวัดจากเซนเซอร์ต่างๆเข้ากับคอมพิวเตอร์ สามารถแสดงในรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 แผนภาพรูปแบบการเชื่อมต่อและส่งถ่ายข้อมูลการตรวจวัดจากเซนเซอร์ต่างๆเข้ากับคอมพิวเตอร์

ในการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันเพื่อแสดงคุณลักษณะของน้ำและรายละเอียดต่างๆเหนือผิวน้ำในรูปแบบสามมิติ สามารถแสดงขั้นตอนการบูรณาการได้ดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 แผนภาพการบูรณาการข้อมูลการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน



ข้อมูลอุทกศาสตร์จากตรวจวัดด้วยเซนเซอร์จากรูปที่ 3.44 ในขั้นแรกต้องทำการตรวจสอบไฟล์ข้อมูลโดยการเลือกช่วงข้อมูลที่ใช้งานหรือการจัดลำดับข้อมูลให้ถูกต้องก่อนนำไปประมวลผล ในขั้นถัดมา การประมวลผลข้อมูลของจากตรวจวัดด้วยเซนเซอร์เลเซอร์ Hokuyo รุ่น UXM-30LXH-EWA และเซนเซอร์วัดความเคี้ยว LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ ที่มีความถี่ในการส่งถ่ายข้อมูลที่แตกต่างกัน สามารถจับคู่เวลา (Time Synchronization) ของข้อมูลได้โดยใช้ข้อมูลเวลาสากลเชิงพิกัด (Coordinated Universal Time : UTC) ของเซนเซอร์แต่ละตัว ในขั้นถัดมา จะทำการแปลงตำแหน่งข้อมูลค่าพิกัดจากเซนเซอร์ทั้งหมดในระบบพิกัดภูมิศาสตร์ไปเป็นระบบพิกัด WGS84 แล้วจึงทำการอ่านข้อมูลของเลเซอร์เพื่อบอกตำแหน่งรายละเอียดของวัตถุที่อยู่เหนือผิวน้ำในแนวรัศมีครึ่งละ 1 ไฟล์ ด้วยฟังก์ชันสำเร็จรูป pcread() ด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นทำการเปลี่ยนกรอบอ้างอิงของเซนเซอร์เลเซอร์ให้อยู่ในระบบพิกัดเดียวกันกับกรอบอ้างอิงของลำเรือ โดยข้อมูลตำแหน่งรายละเอียดเหนือผิวน้ำในแนวรัศมีจะถูกบูรณาการร่วมกับมุมออยเลอร์ 3 แนวแกน ( $\phi, \theta, \psi$ ) และตำแหน่งของหุ่นยนต์เรือ  $[x_B \ y_B \ z_B]^T$  ด้วยเมทริกซ์การแปลง (Transformation Matrix) และทำการวางตำแหน่งข้อมูลรายละเอียดของผิวน้ำและตำแหน่งของหุ่นยนต์เรือในรูปแบบกราฟ 3 มิติ นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังใช้ข้อมูลของจากตรวจวัดด้วยเครื่องวัดพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม Hemisphere S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ที่มีความผิดพลาดในแนวระนาบที่น้อยกว่า 5 เซนติเมตร และความผิดพลาดในแนวตั้งฉากน้อยกว่า 10 เซนติเมตร สำหรับตรวจวัดคลื่นในการอ้างอิงความถูกต้องกับการบูรณาการข้อมูลอีกด้วย

### 3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1.1 การทดลองใช้คนในขั้นต้นเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงโดยการประมาณค่าจากการทดลอง

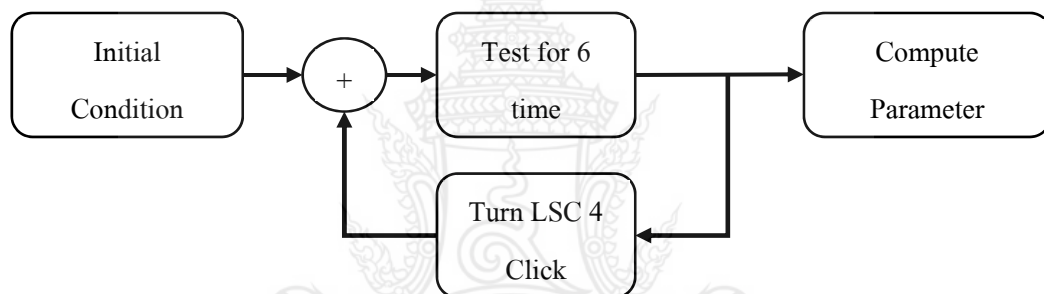
การทดลองนี้เป็นการทดลองใช้คนแก้สรวมน้ำมันที่ถูกติดตั้งบนฐานทดลองและปรับตั้งวาล์ว 2 ตัว ได้แก่ High Speed Compression หรือ HSC และ Low Speed Compression หรือ LSC ให้อยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น จากนั้นทดลองใส่แรงที่มีค่าคงที่โดยใช้มวล 15 กิโลกรัม จำนวน 6 ครั้ง และบันทึกผลการทดลอง จากนั้นทำการปรับตั้งวาล์วที่การทดลองถัดไป ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ติดตั้งอุปกรณ์ทดลองใช้คนแก้ส CaneCreek รุ่น DBAir
- 2) คลายน็อตปรับตั้ง Low Speed Compression (LSC) และ High Speed Compression (HSC) จนสุดเกลียว
- 3) บันทึกวิดีโอ

- 4) ค่อยๆวางมวลลงบนอุปกรณ์ทดลองจนกระทั่งมวลหยุดเคลื่อนที่
- 5) ยกมวลขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมวลหยุดเคลื่อนที่
- 6) ทำซ้ำในขั้นตอน 4 - 5 จำนวน 6 ครั้ง
- 7) หยุดบันทึกวิดีโอ
- 8) ขั้นนี้ขอปรับตั้งตามตารางผลการทดลองรูปแบบที่ 1 - 4
- 9) ทำซ้ำในขั้นตอน 3 - 8

การกำหนดรูปแบบการทดลองมีดังนี้

รูปแบบที่ 1 : กรณีที่ตำแหน่งเริ่มต้นคือ  $HSC = 0, LSC = 0$  จากนั้นปรับตั้ง  
มวล LSC ขึ้นละ 4 คลิก

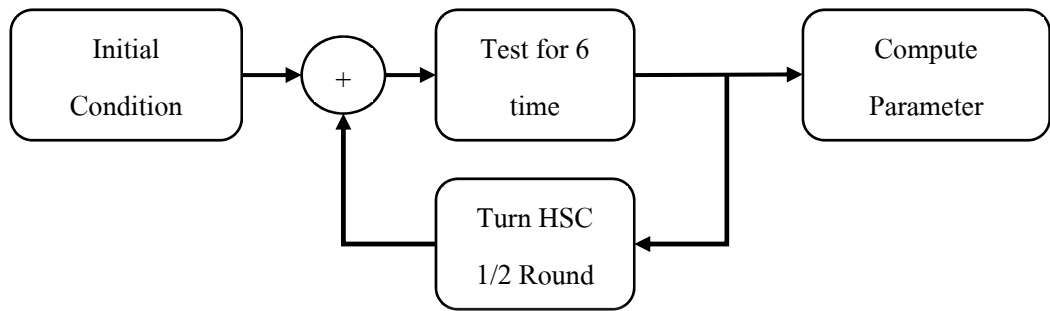


รูปที่ 3.40 แสดงขั้นตอนการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของโศกในกรณีที่ 1

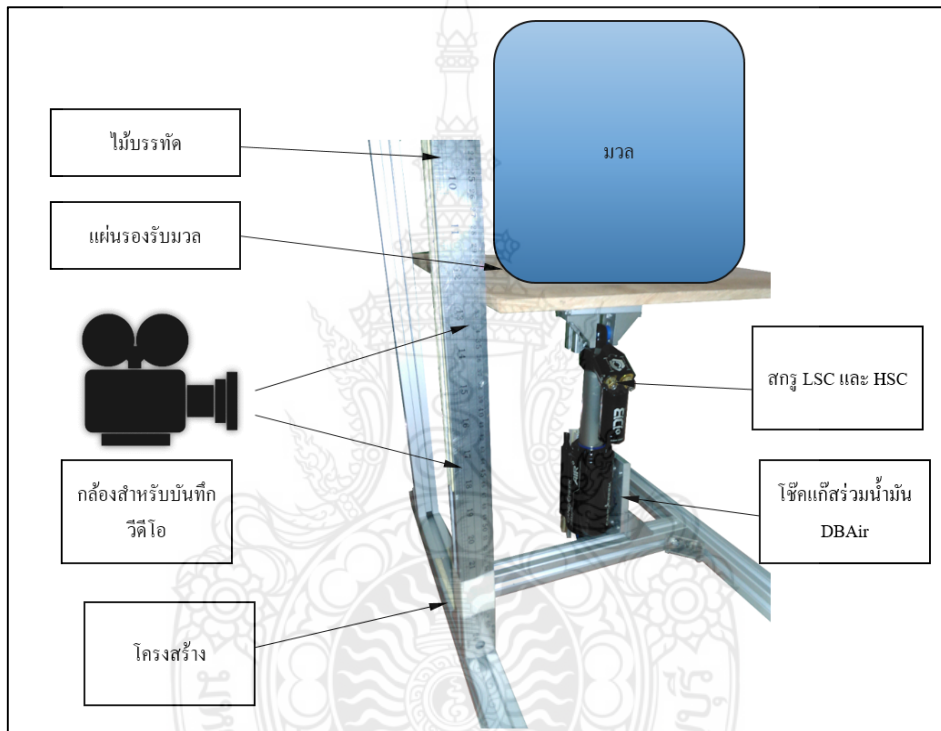
รูปแบบที่ 2 : กรณีที่ตำแหน่งเริ่มต้นคือ  $HSC = 0, LSC = 0$  จากนั้นปรับ  
HSC ขึ้นละ 1/2 รอบ

รูปแบบที่ 3 : กรณีที่ตำแหน่งเริ่มต้นคือ  $HSC = 0, LSC = 2.5$  จากนั้นปรับ  
HSC ขึ้นละ 1/2 รอบ

รูปแบบที่ 4 : กรณีที่ตำแหน่งเริ่มต้นคือ  $HSC = 0, LSC = 5$  จากนั้นปรับ  
HSC ขึ้นละ 1/2 รอบ



รูปที่ 3.41 แสดงขั้นตอนการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของโช๊คในกรณีนี้ที่ 2-4



รูปที่ 3.42 แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ทดลองโช๊ค

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงจากการทดลองเบื้องต้น จากสมการ

$$\left. \begin{aligned}
 k &= \frac{mg}{y_{Upper} - y_{Lower}} \\
 c &= \frac{mg(\Delta t)}{y_{Upper} - y_{Lower}}
 \end{aligned} \right\} (3.9)$$

โดยที่ **k** คือ ค่าสัมประสิทธิ์สปริง (N/m)

**c** คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (N · s/m)

- m** คือ มวล (kg)
- y<sub>Upper</sub>** คือ ระยะที่โซ่ยกยึดออกสุด (m)
- y<sub>Lower</sub>** คือ ระยะที่โซ่ยกหยุดนิ่ง (m)
- Δt** คือ ระยะเวลาที่โซ่ยกเคลื่อนที่จาก y<sub>Upper</sub> สู่ y<sub>Lower</sub> (sec)

การคำนวณหาระยะเวลาที่โซ่ยกเคลื่อนที่จาก y<sub>Upper</sub> สู่ y<sub>Lower</sub> (Δt, sec) ดังนี้

$$\Delta t = \left| \frac{StartFrame - StopFrame}{FrameRate} \right| \quad (3.10)$$

- โดยที่ **StartFrame** = เฟรมที่โซ่ยกเริ่มเคลื่อนที่
- StopFrame** = เฟรมที่โซ่ยกหยุดเคลื่อนที่
- FrameRate** = อัตราภาพต่อวินาที (FPS)

3.4.1.2 การทดลองระบบสันสะเทือนทางกลของหุ่นยนต์เรือสองหุ่นแบบปรับตัวตามคลื่นในกรณีต่างๆ

ในการทดลองระบบสันสะเทือนทางกลในหุ่นยนต์เรือสองหุ่นแบบปรับตัวตามคลื่น สามารถแบ่งการทดลองวัดการสันสะเทือนออกเป็นกรณีที่ไม่เพิ่มมวล และเพิ่มมวลขนาด 8.7 กิโลกรัมซึ่งเสมือนว่าเป็นน้ำหนักของมวลรวมฐานยึดและเซนเซอร์เลเซอร์ โดยข้อมูลผลการตรวจวัดความเร่งในการสันสะเทือนจะใช้ข้อมูลค่าความเร่งแท้จริงที่ผ่านการกำจัดเวกเตอร์ g ออกไปแล้วนำมาวิเคราะห์ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลัง ในการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 4 กรณีดังต่อไปนี้

- 1) การทดลองการสันสะเทือนทางกลบนแท่นทดลอง เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำด้วยความถี่ต่ำกว่า 1 เฮิรตซ์
- 2) การทดลองการสันสะเทือนทางกลบนแท่นทดลอง เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำด้วยความถี่สูงกว่า 2 เฮิรตซ์
- 3) ทดลองการสันสะเทือนทางกล เนื่องจากคลื่นอุทกพลศาสตร์ที่มากระทำทางด้านข้าง
- 4) การทดลองการสันสะเทือนทางกลจากแรงอุทกพลศาสตร์ในกรณีหุ่นยนต์เรือสองหุ่นปฏิบัติงานแบบอัตโนมัติ

### 3.4.2 การทดลองหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามเส้นทางวิถีโคจรแบบอัตโนมัติ

ในการทดลองหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามเส้นทางวิถีโคจรแบบอัตโนมัติจำเป็นต้องแบ่งการศึกษาออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ การทดลองความน่าเชื่อถือของข้อมูลพิกัดตำแหน่งของตัวรับสัญญาณจีพีเอสที่ใช้กับหน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติ อาวุโสไฟล็ดต เมกะ อีกทั้งทำการศึกษาศาสามารถการทำซ้ำเดิมในกรณีเคลื่อนที่อัตโนมัติจากการใช้หน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติ อาวุโสไฟล็ดต เมกะ และการศึกษาพฤติกรรมของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามเส้นทางวิถีโคจรแบบอัตโนมัติจากการทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

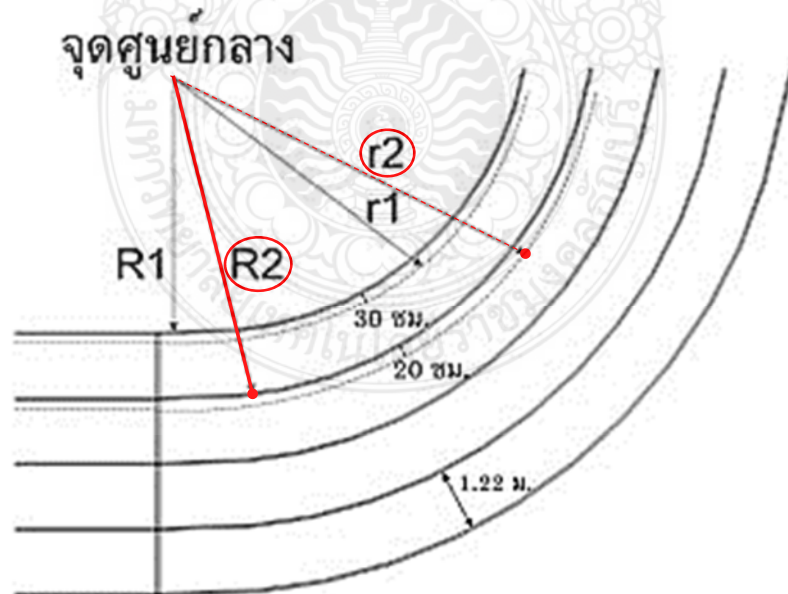
#### 3.4.2.1 การทดลองความแม่นยำและความเที่ยงตรงของข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอส Ublox รุ่น NEO-6M

ในการตรวจสอบและพิสูจน์ความน่าเชื่อถือของข้อมูลการระบุตำแหน่งในด้านความแม่นยำ (Accuracy) ของข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากตัวรับสัญญาณจีพีเอส Ublox รุ่น NEO-6M ซึ่งใช้กับหน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติ อาวุโสไฟล็ดต เมกะ ผู้วิจัยจึงทำการทดลองเปรียบเทียบกับข้อมูลการระบุตำแหน่งจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสที่มีคุณภาพสูงกว่า โดยเลือกใช้ตัวรับสัญญาณจีพีเอสที่ใช้กับเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ และ **เครื่องวัดพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม Hemisphere S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover)** ในการทดลอง ผู้วิจัยติดตั้งตัวรับสัญญาณจีพีเอส Ublox และ LORD MicroStrain ทั้งสองไว้ในกล่องทดลอง จึงถือว่าเป็นหน่วยเดียวกัน จากนั้นผู้วิจัยถือกล่องทดลองและเดินบนเส้นแบ่งลู่วิ่ง r2 และ R2 ในสนามกรีฑามาตรฐาน 400 เมตร ดังในรูปที่ 3.43-3.44 จำนวน 1 รอบสนามและบันทึกผลการทดลอง จำนวน 2 ครั้ง

ในขั้นถัดมา การตรวจสอบและพิสูจน์ความน่าเชื่อถือของข้อมูลการระบุตำแหน่งในด้านความเที่ยงตรง (Precision) ของตัวรับสัญญาณจีพีเอส Ublox รุ่น NEO-6M โดยทำการเดินบนเส้นแบ่งลู่วิ่ง r2 และ R2 ในสนามกรีฑามาตรฐานเช่นเดียวกันกับการทดลองในด้านความแม่นยำ (Accuracy) โดยทำการเดินรอบสนามกรีฑาจำนวน 2 รอบแบบต่อเนื่อง จากนั้นทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลอง



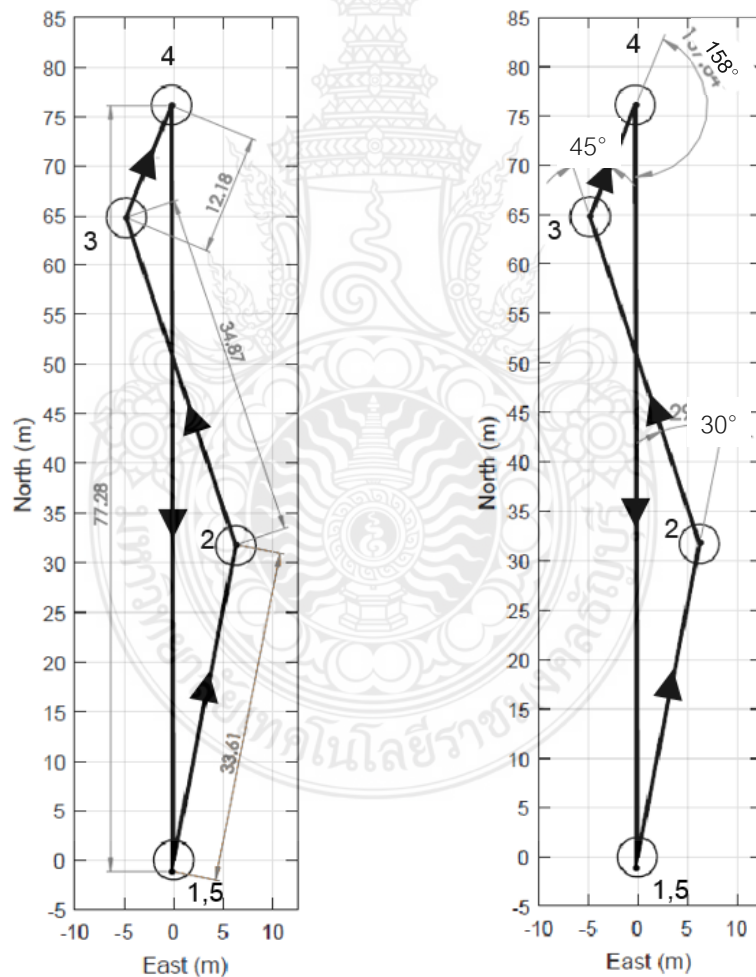
รูปที่ 3.43 สนามกรีฑามาตรฐาน 400 เมตร



รูปที่ 3.44 ตำแหน่งที่ทำการทดลองเดินบนเส้นแบ่งลู่วิ่ง  $r_2$  และ  $R_2$  ในสนามกรีฑามาตรฐาน 400 เมตร

3.4.2.2 การทดลองความสามารถทำซ้ำเดิมของจากการใช้หน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติอาคูไฟลีดอต เมกะ ด้วยหุ่นยนต์รถสี่ล้อ

ผู้วิจัยสังเกตเห็นว่า ความสามารถในการนำทางสำหรับหุ่นยนต์เรืออัตโนมัติที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง หุ่นยนต์เรืออัตโนมัตินั้นจะต้องมีความแม่นยำและเที่ยงตรงในการระบุตำแหน่งและนอกจากนี้ยังต้องมีความสามารถซ้ำจุดเดิมเพื่อเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลพารามิเตอร์ของน้ำที่ได้รับตรวจวัด สำหรับหน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติอาคูไฟลีดอต เมกะ จะใช้ตรรกะการนำทางที่มีชื่อว่า  $L_1$  Controller ซึ่งมีความสามารถในการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบตรง ดังนั้น ผู้วิจัยติดตั้งหน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติอาคูไฟลีดอต เมกะ และอุปกรณ์ต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.27 เข้ากับรถบังคับวิทยุแบบสี่ล้อ เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ โดยมีแผนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.45



รูปที่ 3.45 การออกแบบการทดลองความสามารถทำซ้ำเดิมของจากการใช้หน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติอาคูไฟลีดอต เมกะ ด้วยหุ่นยนต์รถสี่ล้อ โดยแสดงระยะทางในภาพซ้าย และมุมหันเหในภาพขวา

เพื่อทดสอบความสามารถการทำซ้ำเดิมในการเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรจากการใช้หน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติจากคู่มือคู่มือเมกะ ด้วยหุ่นยนต์รถสี่ล้อ โดยการทดลองนี้ผู้วิจัยออกแบบเส้นวิถีโคจรให้มีลักษณะเป็นแบบสลับฟันปลาและกำหนดให้รัศมีเป้าหมายรอบจุดพิกัดที่ต้องการทั้งหมดนั้นมีค่าเท่ากับ 2 เมตร โดยแบ่งเป็นกรณีที่เส้นวิถีโคจรทำมุมน้อยกว่าข้อจำกัดของมุมหันเหในหุ่นยนต์รถสี่ล้อหรือน้อยกว่า 45 องศา , กรณีที่เส้นวิถีโคจรเท่ากับข้อจำกัดของมุมหันเหในหุ่นยนต์รถสี่ล้อหรือเท่ากับ 45 องศา และในกรณีที่เส้นวิถีโคจรมุมมากกว่าข้อจำกัดของมุมหันเหในหุ่นยนต์รถสี่ล้อหรือมากกว่า 45 องศา โดยที่กรณีที่เส้นวิถีโคจรทำมุมน้อยกว่าข้อจำกัดของมุมหันเหในหุ่นยนต์รถสี่ล้อจะเกิดขึ้นที่เส้นวิถีโคจรช่วงจากจุดที่ 2 ถึง 3 ทำมุม 30 องศา กับเส้นวิถีโคจรช่วงจากจุดที่ 1 ถึง 2 และกรณีที่เส้นวิถีโคจรเท่ากับข้อจำกัดของมุมหันเหในหุ่นยนต์รถสี่ล้อจะเกิดขึ้นในช่วงเส้นวิถีโคจรช่วงจากจุด 3 ถึง 4 ทำมุม 45 องศา กับเส้นวิถีโคจรช่วงจุด 2 ถึง 3 และสำหรับกรณีที่เส้นวิถีโคจรมุมมากกว่าข้อจำกัดของมุมหันเหในหุ่นยนต์รถสี่ล้อจะเกิดขึ้นที่เส้นวิถีโคจรช่วงจากจุดที่ 4 ถึง 5 ทำมุม 158 องศา กับเส้นวิถีโคจรช่วงจากจุดที่ 3 ถึง 4 โดยทำการทดลองวิ่งรถตามเส้นทางที่สร้างขึ้นทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อประเมินผลพฤติกรรมเคลื่อนที่ในแต่ละการทดลอง

ตารางที่ 3.20 การออกแบบเส้นวิถีโคจรสำหรับทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ซ้ำเดิมสำหรับการเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติจากการใช้หน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติจากคู่มือคู่มือเมกะ ด้วยหุ่นยนต์รถสี่ล้อ

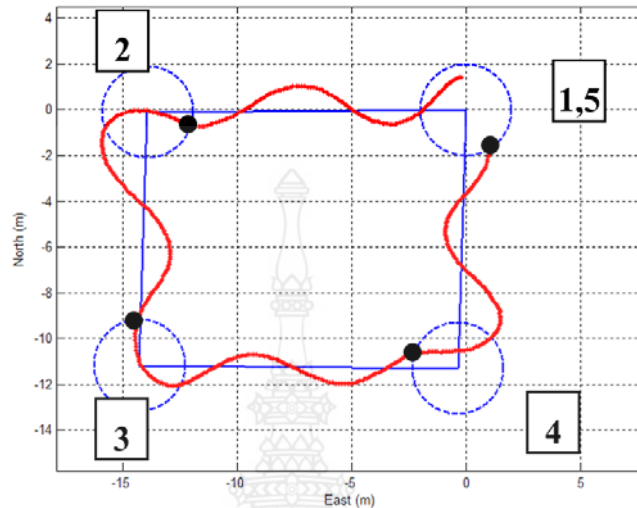
กรณีศึกษา	เส้นวิถีโคจร
1. เส้นวิถีโคจรทำมุมน้อยกว่าข้อจำกัดของมุมหันเห	เส้น 23 ไปยัง $12 = 30^\circ < 45$
2. เส้นวิถีโคจรทำมุมเท่ากับข้อจำกัดของมุมหันเห	เส้น 34 ไปยัง $23 = 45^\circ$
3. เส้นวิถีโคจรทำมุมมากกว่าข้อจำกัดของมุมหันเห	เส้น 45 ไปยัง $34 = 158^\circ > 45$

3.4.2.3 การทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติ

ในการทดลอง ผู้วิจัยได้กำหนดจุดพิกัดเป้าหมายไว้ทั้ง 5 จุด ที่ให้เส้นวิถีโคจรเป็นแบบเส้นตรงจำนวน 4 เส้นที่วนกลับมาที่จุดเริ่มต้น หรือจุดพิกัดที่ 1 และ 5 เป็นจุดเดียวกัน และกำหนดให้ขนาดรัศมีของวงกลมรอบจุดพิกัดเป้าหมายที่กำหนดมีค่าเป็น 2 เมตร (ที่แสดงด้วยวงกลมเส้นประ) ตอนเริ่มต้นหุ่นยนต์จะอยู่ในวงกลมรอบตำแหน่งที่ 1 และมีจุดพิกัดเป้าหมายเป็นจุดที่ 2 และ หุ่นยนต์จะพยายามติดตามเส้นวิถีโคจรที่ 1 เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าไปสู่ภายในวงกลมรอบจุดพิกัดตำแหน่งที่ 2 ระบบตรรกะการควบคุมจะเปลี่ยนจุดพิกัดเป้าหมายเป็นจุดที่ 3 และหุ่นยนต์



จะติดตามเส้นวิถีโคจรที่ 2 จนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าสู่วงกลมรอบตำแหน่งจุดพิกัดที่ 5 จึงเป็นการสิ้นสุดโปรแกรมการควบคุมแบบอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 3.46



รูปที่ 3.46 การกำหนดรูปแบบการทดลองหุ่นยนต์ติดตามเส้นวิถีโคจรด้วยตัวควบคุม  $L_1$

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ตัวแปรของตัวควบคุมแบบ  $L_1$  ดังต่อไปนี้

- 1) การทดลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าระยะการขจัด  $L_1$  โดยกำหนดให้  $L_1 = [17, 19, 20, 21]$  เมื่อ  $\xi = 0.8$  และ  $K_{ps} = 1$  เป็นค่าคงที่
- 2) การทดลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า Damping ( $\xi$ ) โดยกำหนดให้  $\xi = [0.6, 0.7, 0.75]$  เมื่อ  $L_1 = 17$  และ  $K_{ps} = 1$  เป็นค่าคงที่
- 3) การทดลองผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า KP-Steering ( $K_{ps}$ ) โดยกำหนดให้  $K_{ps} = [0.8, 1.0, 1.2, 1.4]$  ของตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) เมื่อ  $L_1 = 17$  และ  $\xi = 0.8$  เป็นค่าคงที่

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของเรือแบบสองหุ่นนั้นจะพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของตรรกะการควบคุมแบบ  $L_1$  ได้จากค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดของระยะการขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ  $\bar{d}$ ) และ ค่าสูงสุดโดยเฉลี่ยของค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ  $\bar{d}_{\max}$ ) ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (3.11) และ (3.12) ตามลำดับ

$$\bar{d}_i = \left( \sum_{j=2}^4 |GPS_{ij}(x,y) - WP\_CMD_{ij}(x,y)| \right) / 3 \quad (3.11)$$

$$\overline{\max(d)}_i = \left( \sum_{j=2}^4 \max(GPS_{ij}(x,y) - WP\_CMD_{ij}(x,y)) \right) / 3 \quad (3.12)$$

เมื่อ  $GPS_{ij}(x,y)$  คือ ค่าข้อมูลพิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์ในระบบพิกัด UTM [10],  $WP\_CMD_{ij}(x,y)$  คือ ตำแหน่งบนเส้นวิถีโคจรแบบตรงสำหรับอ้างอิงค่าความผิดพลาดจากการติดตามเส้นวิถีโคจร,  $i$  แทน การทดลองครั้งที่  $i$  และ  $j$  แทน เส้นวิถีโคจรอ้างอิงจากจุดพิกัดเริ่มต้นที่ 2 ถึง 4 โดยกำหนดให้ เส้นจากจุดเป้าหมายที่ 2 ไปยังเป้าหมายที่ 3 คือ เส้นวิถีโคจรอ้างอิงที่ 2 เป็นต้น โดยผู้วิจัยจะไม่ พิจารณาการเคลื่อนที่จากการติดตามเส้นวิถีโคจรที่ 1 เนื่องจากสภาพแวดล้อมทางอุทกศาสตร์สำหรับ เก็บผลการทดลองส่งผลให้ไม่สามารถกำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์เรือได้เท่ากันในทุกการ ทดลองได้ ดังนั้น จึงพิจารณาหาค่าเฉลี่ยเฉพาะจากเส้นวิถีโคจรที่ 2-4 เท่านั้น

### 3.3.3 การทดลองการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน

#### 3.3.3.1 การบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันบนพื้นเรียบ

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองการเก็บบันทึกและบูรณาการข้อมูลจาก เซนเซอร์ต่างๆจากสถานที่ที่ทราบรูปร่างและขนาดแน่ชัดจากเครื่องวัดพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม Hemisphere S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ร่วมกับเครื่องมือวัดทั่วไป เช่น ตลับเมตร โดยที่หุ่นยนต์เรือติดตั้งบนรถเข็นที่เคลื่อนที่ไปบนพื้นเรียบทำให้สามารถควบคุมการ เคลื่อนที่ได้แม่นยำและหุ่นยนต์เรือจะไม่ได้รับผลจากอุทกศาสตร์ ทำให้สามารถประเมินความถูกต้อง ของข้อมูลรายละเอียดวัดจากการบูรณาการเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันได้

#### 3.3.3.2 การบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันจากสภาพแวดล้อมจริงในน้ำ

ในการทดลองนี้เป็นการนำหุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กบังคับด้วยวิทยุภาค พื้นผิวน้ำที่ติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดต่างๆ เก็บบันทึกและบูรณาการข้อมูลรายละเอียดวัดต่างๆเหนือผิวน้ำพร้อมกับเก็บบันทึกผลค่าความลึกของน้ำตามจุดพิกัด โดยใช้เครื่องวัดพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม Hemisphere S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) สำหรับตรวจวัดค่าระดับน้ำอ้างอิง และความสูงขอบตลิ่งอ้างอิง โดยเปรียบเทียบกับผลจากการบูรณาการข้อมูลที่เซนเซอร์ต่างๆตรวจวัด ได้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

สำหรับผลการดำเนินงานและการอภิปรายผลในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 หัวข้อใหญ่ ซึ่งประกอบด้วย 4.1) ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองระบบรองรับสันสะพานทางกล, 4.2) ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติ และ 4.3) ผลการทดลองและการอภิปรายผลการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน

#### 4.1 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองระบบรองรับสันสะพานทางกล

ในการวิเคราะห์ระบบสันสะพานทางกลในหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่นน้ำสามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 รูปแบบ สำหรับส่วนแรก คือ การทดลองขึ้นต้นเพื่อหาคุณสมบัติของโซ่ค้ำเสริมน้ำมัน CaneCreek DBAir ด้วยการติดตั้งบนฐานยึดแบบตั้งฉากและทดลองใส่แรงคงที่เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สปริงจากอากาศและค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงจากน้ำมันที่ได้รับผลกระทบจากการปรับตั้งสกรู High Speed Compression หรือ HSC และนัตปรับตั้ง Low Speed Compression หรือ LSC โดยแสดงในหัวข้อที่ 4.1.1 และการวิเคราะห์ในส่วนที่สอง คือ การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังการสันสะพานทางกลในหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่นน้ำในแต่ละกรณีซึ่งได้ทำการอภิปรายผลทดลองในหัวข้อที่ 4.1.2

##### 4.1.1 ผลการทดลองขึ้นต้นเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สปริงและค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของโซ่ค้ำ

จากการทดลองขึ้นต้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของระบบรองรับสันสะพานทางกลด้วยวิธีการทดลองวางมวล 15 กิโลกรัมบนแท่นทดสอบแบบโซ่ค้ำตั้งฉากกับแนวระนาบ ผลการทดลองในรูปแบบที่ 1 – 4 ซึ่งแสดงตารางที่ 4.1 – 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองรูปแบบที่ 1 การปรับตั้งเฉพาะสกรู Low Speed Compression (LSC) ครั้งละ 4 คลิกโดยที่ปรับตั้ง High Speed Compression อยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น

การทดลองครั้งที่	การปรับ Low Speed Compression , LSC (คลิก)	การปรับ High Speed Compression , HSC (รอบ)	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สปริง (N/m)	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (N · s/m)
1	0	0	5510.5	8299.4
2	4	0	6029.5	9357.9
3	8	0	5568.6	8947.2
4	12	0	5325.8	8522.9
5	16	0	5402.2	10192.2
6	20	0	5621.8	9207.8
7	24	0	5055.0	8533.6
8	28	0	5717.7	18219.2
9	32	0	4962.3	18050.0

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองรูปแบบที่ 2 การปรับตั้งเฉพาะสกรู Low Speed Compression (LSC) โดยที่ปรับตั้ง High Speed Compression อยู่ที่ตำแหน่ง 2.5 รอบ

การทดลองครั้งที่	การปรับ Low Speed Compression , LSC (คลิก)	การปรับ High Speed Compression , HSC (รอบ)	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สปริง (N/m)	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (N · s/m)
1	0	2.5	5462.8	16219.7
2	4	2.5	5663.5	24578.2
3	8	2.5	5559.0	20332.9
4	12	2.5	5832.3	22671.9
5	16	2.5	5815.8	26873.6

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองรูปแบบที่ 2 การปรับตั้งเฉพาะสกรู Low Speed Compression (LSC) โดยที่ปรับตั้ง High Speed Compression อยู่ที่ตำแหน่ง 2.5 รอบ (ต่อ)

การทดลองครั้งที่	การปรับ Low Speed Compression , LSC (คลิก)	การปรับ High Speed Compression , HSC (รอบ)	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สปริง (N/m)	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (N·s/m)
6	20	2.5	5812.6	29530.0
7	24	2.5	5748.2	31466.0
8	28	2.5	5735.2	30492.4

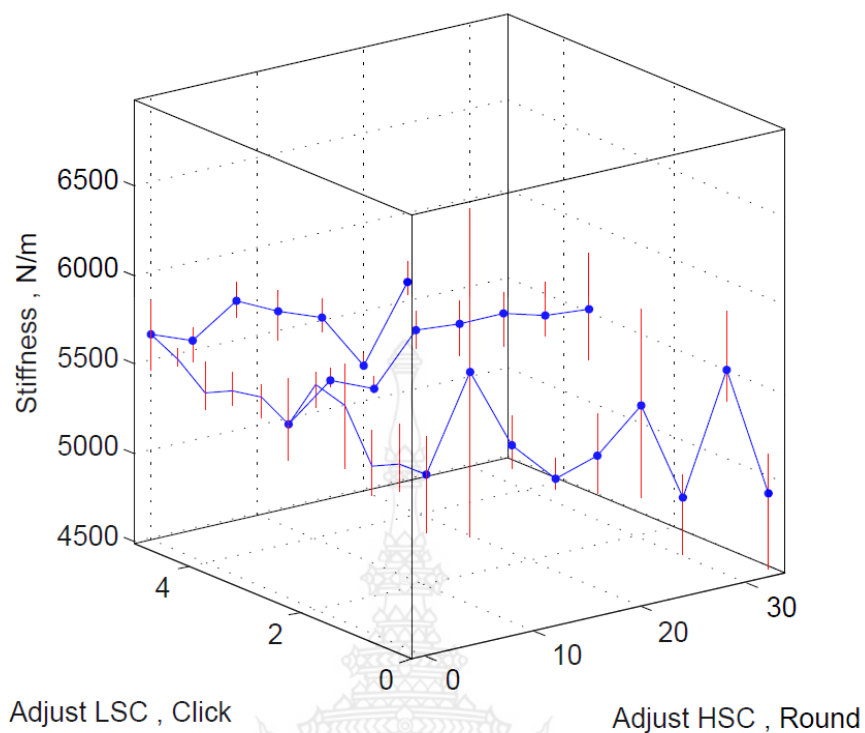
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองรูปแบบที่ 3 การปรับตั้งเฉพาะสกรู Low Speed Compression (LSC) โดยที่ปรับตั้ง High Speed Compression อยู่ที่ตำแหน่งสุดท้าย

การทดลองครั้งที่	การปรับ Low Speed Compression , LSC (คลิก)	การปรับ High Speed Compression , HSC (รอบ)	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สปริง (N/m)	การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (N·s/m)
1	0	5.0	5649.86	61461.1
2	4	5.0	5554.89	88276.9
3	8	5.0	5730.56	67976.5
4	12	5.0	5616.34	66029.2
5	16	5.0	5520.85	63955.7
6	20	5.0	5197.66	57527.1
7	24	5.0	5615.25	61455.2

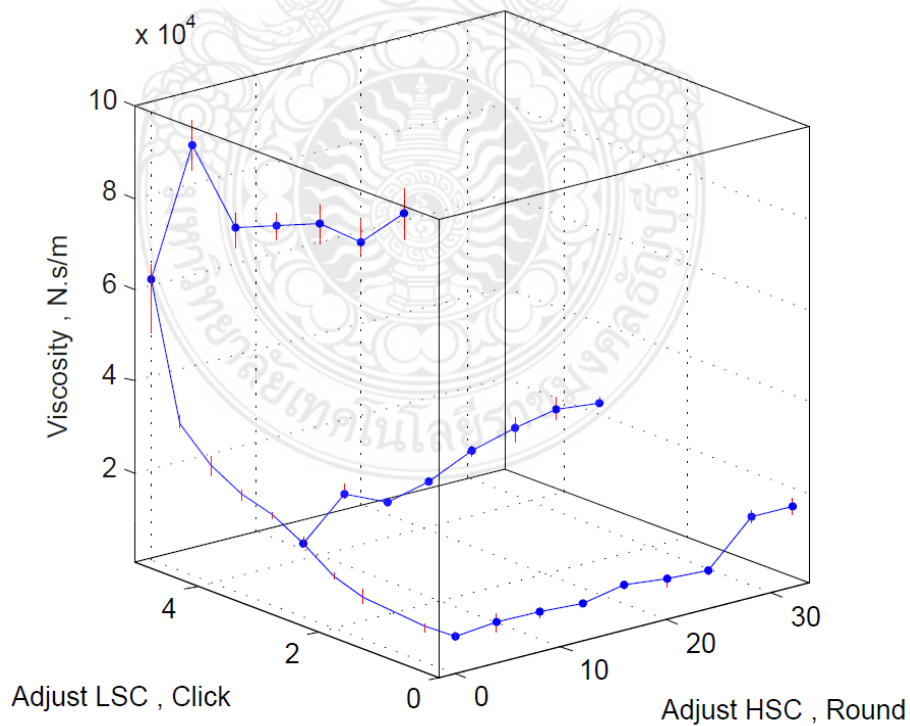
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองรูปแบบที่ 4 การปรับตั้งเฉพาะนัด High Speed Compression (HSC) โดยที่  
สกรูปรับตั้ง Low Speed Compression อยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น

การ ทดลอง ครั้งที่	การปรับ Low Speed Compression , LSC (คลิก)	การปรับ High Speed Compression , HSC (รอบ)	การประมาณค่า สัมประสิทธิ์สปริง (N/m)	การประมาณค่า สัมประสิทธิ์ ความหน่วง (N · s/m)
1	0	0.0	5510.6	8299.4
2	0	0.5	5507.6	8179.8
3	0	1.0	5431.0	8791.6
4	0	1.5	5703.8	9541.1
5	0	2.0	5755.8	11532.4
6	0	2.5	5462.9	16219.7
7	0	3.0	5551.6	19914.2
8	0	3.5	5520.9	22034.4
9	0	4.0	5445.0	25907.4
10	0	4.5	5573.3	32475.4
11	0	5.0	5649.9	61461.1

จากตารางที่ 4.1-4.4 แสดงผลการทดลองในขั้นต้นเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สปริง (k) และค่า  
สัมประสิทธิ์ความหน่วง (c) ที่เปลี่ยนแปลงจากการปรับตั้งวาล์ว HSC และ LSC จากข้อมูลในตาราง  
สามารถแสดงความสัมพันธ์ด้วยรูปแบบกราฟสามมิติได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สปริง ( $k$ ) ในการปรับตั้ง LSC และ HSC



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง ( $c$ ) ในการปรับตั้ง LSC และ HSC

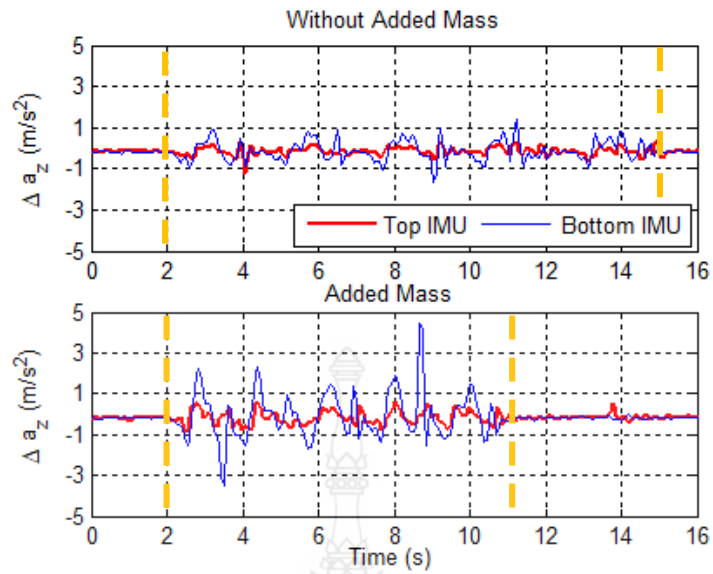
#### 4.1.2 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองการวิเคราะห์สเปกตรัมการสั่นสะเทือนแต่ละกรณี

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมการสั่นสะเทือนทางกลในหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่นน้ำ สามารถแบ่งการวิเคราะห์แต่ละกรณีออกเป็นการทดลองการสั่นสะเทือนทางกลบนแท่นทดลอง เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำด้วยความถี่ต่ำและความถี่สูง และยังสามารถแบ่งการวิเคราะห์เป็นกรณีไม่เพิ่มมวลและกรณีเพิ่มมวลเทียบเท่าน้ำหนักรวมของฐานยึดเซนเซอร์เลเซอร์ที่มีขนาด 8.7 กิโลกรัม และสำหรับในส่วนการทดลองการสั่นสะเทือนทางกลขณะที่หุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่นน้ำทำการทดลองในน้ำ โดยการสร้างคลื่นจากท่อนด้านตรงข้ามกับท่อนที่ติดตั้งเซนเซอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์กำลังความหนาแน่นสเปกตรัมเปรียบเทียบกับผลการทดลองบนแท่นทดลอง และในส่วนสุดท้ายคือผลการทดลองการสั่นสะเทือนในสภาพแวดล้อมจริงขณะที่หุ่นยนต์เรือเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ

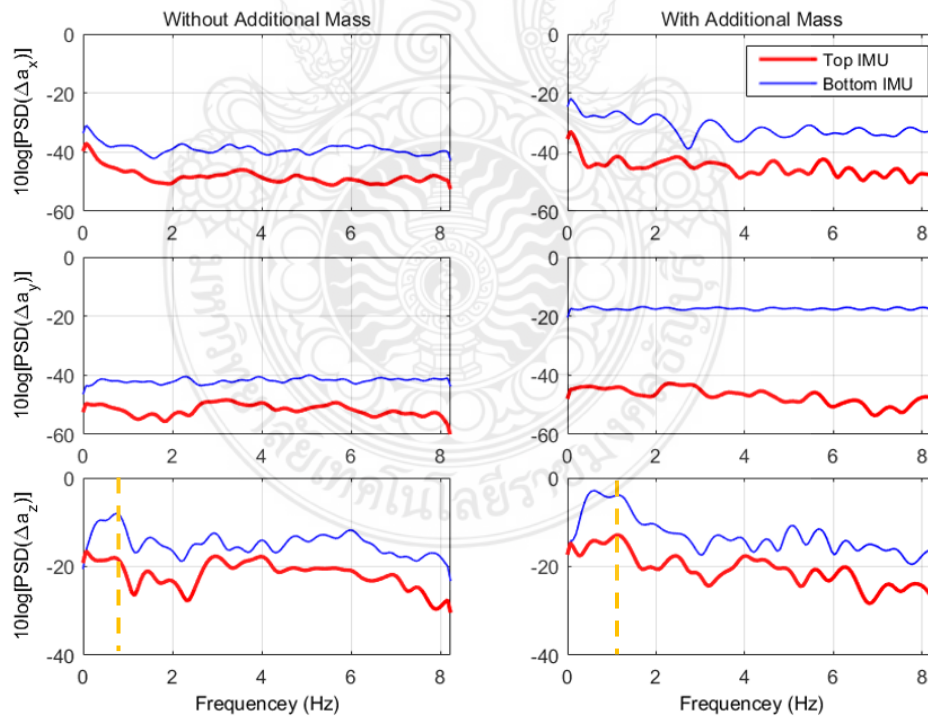
##### 4.1.2.1 การทดลองการสั่นสะเทือนทางกลบนแท่นทดลองเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำด้วยความถี่ต่ำ

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังสำหรับขนาดการสั่นสะเทือนที่แท้จริง เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำที่ท่อนที่อยู่ในอากาศแล้วส่งผ่านการสั่นสะเทือนไปยังฐานยึดเซนเซอร์เลเซอร์ด้านบน ผู้วิจัยทำการสร้างอินพุตแรงที่มีความถี่ต่ำที่น้อยกว่า 1 Hz ให้กระทำต่อท่อนด้านซ้าย และ ทดลองวัดการสั่นสะเทือนทั้งกรณีที่ไม่เพิ่มมวล และเพิ่มมวลขนาด 8.7 กิโลกรัม ผลการตรวจวัดความถี่ในการสั่นสะเทือนแท้จริงที่ผ่านการขจัดเวกเตอร์  $g$  ออกไปแล้ว โดยช่วงข้อมูลทางเวลาที่นำมาวิเคราะห์อยู่ระหว่างเส้นสีเหลือง แสดงในรูปที่ 4.3 และสามารถประมาณค่า PSD ของสัญญาณความถี่ที่สนใจทั้ง 3 แนวแกน โดยความถี่สูงสุดในการสั่นในแนวตั้งแสดงด้วยแนวเส้นสีเหลือง ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4





รูปที่ 4.3 ค่าความเร่งในการสั่นสะเทือนแท้จริงที่ผ่านการจัดเวกเตอร์  $\mathbf{g}$  ออกไปแล้ว ในแนวแกน z จากเซนเซอร์วัดความเร่งตัวล่าง (สีน้ำเงิน) และ จากเซนเซอร์วัดความเร่งตัวบน (สีแดง) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อระบบด้วยความถี่ต่ำทั้งในกรณีไม่เพิ่มมวล (บน) และเพิ่มมวล 8.7 กิโลกรัม (ล่าง)



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์  $10\log[\text{PSD}]$  ของค่าความเร่งในการสั่นสะเทือนที่แท้จริงทั้ง 3 แนวแกน เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อระบบด้วยความถี่ต่ำในกรณีที่เพิ่มมวล 8.7 กิโลกรัม (หลักซ้าย) และ กรณีไม่เพิ่มมวล (หลักขวา)

ตารางที่ 4.5 สรุปผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นความถี่สูงสุดและค่า Power Spectrum Density ที่ความถี่สูงสุดในกรณีไม่เพิ่มมวลและเพิ่มมวล 8.7 กิโลกรัม ที่ได้รับจากเซนเซอร์วัดความเร่งทั้งสองตัวเมื่อมีแรงภายนอกกระทำด้วยความถี่ต่ำ

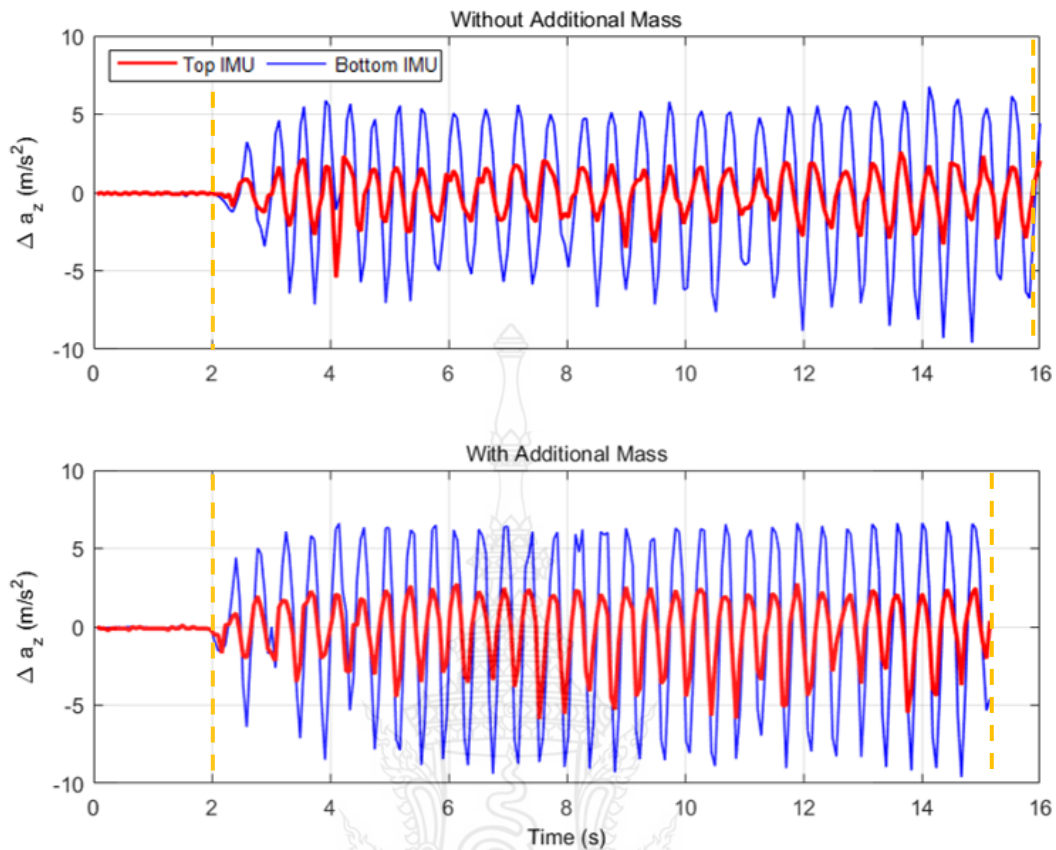
	กรณีไม่เพิ่มมวล		กรณีเพิ่มมวล 8.7 kg	
	Peak Frequency $\Delta a_z$	$10\log[\text{PSD } \Delta a_z]$	Peak Frequency $\Delta a_z$	$10\log[\text{PSD } \Delta a_z]$
1. Top IMU	0.77 Hz	-18.25	1.17 Hz	-12.95
2. Bottom IMU	or 4.84 rad/s	-8.08	or 7.35 rad/s	-3.86
$10\log\left[\frac{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Top}}}{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Bot}}}\right]$		-10.17		-9.09
$\log\left[\frac{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Top}}}{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Bot}}}\right]$		$\frac{-10.17}{10} = -1.017$		$\frac{-9.09}{10} = -0.909$
$\left[\frac{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Top}}}{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Bot}}}\right]$		$10^{(-1.017)} = 0.09616$		$10^{(-0.909)} = 0.12331$
<u>อัตราการส่งผ่าน</u>		<u>9.616 %</u>		<u>12.331 %</u>

จากรูปที่ 4.3 ในการทดลองสั้นสะเทือนทางกลด้วยการใส่แรงที่มีความถี่ต่ำกว่า 1 Hz ซึ่งเริ่มที่เวลา 2 วินาที จำนวน 5 คาบ โดยเปรียบเทียบความเร่งการสั้นสะเทือนทางกลจากการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC ที่ติดตั้งส่วนล่างของโซ่อยู่ที่หุ่นเรือ โดยเปรียบเทียบกับผลตอบสนองความเร่งการสั้นสะเทือนทางกลที่ส่งผลต่อฐานยึดเซนเซอร์เลเซอร์ที่ส่วนบนของโซ่ซึ่งตรวจวัดด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 ผลการวิเคราะห์การสั้นสะเทือนทางกลด้วยวิธีการประมาณค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังจากรูปที่ 4.4 ค่าขนาดความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังในรูปแบบ  $10\log[\text{PSD}]$  ของค่าความเร่งในการสั้นสะเทือนที่แท้จริงทั้ง 3 แนวแกนจากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC สูงกว่าค่าขนาดความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังจากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความเร่งที่แท้จริงในแนวแกน z ( $\Delta a_z$ ) จากกรณีที่ไม่เพิ่มมวล ค่าความถี่ที่มีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังสูงสุดของ  $\Delta a_z$  จากเซนเซอร์วัดความเร่งทั้งสองเกิดขึ้นที่ความถี่เท่ากัน คือ 0.77 Hz (หรือ 4.84 rad/s) โดยที่ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังจากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC มีค่า  $10\log[\text{PSD}]$  เท่ากับ  $-8.08 \text{ m}^2\text{s}^{-4} / \text{Hz}$  และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังจากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 มีค่าเท่ากับ  $-18.25 \text{ m}^2\text{s}^{-4} / \text{Hz}$  จากการวิเคราะห์อัตราการส่งผ่านพบว่า ความเร่งการสั้นสะเทือนทางกลที่กระทำต่อหุ่นเรือจะส่งผลต่อโครงสร้างส่วนบนในอัตราร้อยละ 0.09616 หรือ 9.616% และในกรณีมีการเพิ่ม

มวล 8.7 กิโลกรัม เสมือนติดตั้งฐานเซนเซอร์เลเซอร์ที่โครงสร้างด้านบนจะส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติของระบบลดต่ำลง โดยที่ค่าความถี่ที่มีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังสูงสุดของ  $\Delta a_z$  จากเซนเซอร์วัดความเร่งทั้งสองเกิดขึ้นที่ความถี่เท่ากัน คือ 1.17 Hz (หรือ 7.35 rad/s) โดยที่ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังจากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC มีค่า  $10\log[\text{PSD}]$  เท่ากับ  $-3.86 \text{ m}^2\text{s}^{-4}/\text{Hz}$  และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังจากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 มีค่าเท่ากับ  $-12.95 \text{ m}^2\text{s}^{-4}/\text{Hz}$  จากการวิเคราะห์หัตถการส่งผ่านพบว่า ความเร่งการสั่นสะเทือนทางกลที่กระทำต่อหุ่นเรือจะส่งผลต่อโครงสร้างส่วนบนในอัตราร้อยละ 0.12331 หรือ 12.331% ดังนั้น การทดลองการสั่นสะเทือนทางกลบนแท่นทดลองเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำด้วยความถี่ต่ำทั้งในกรณีเพิ่มมวลและไม่เพิ่มมวลพบว่าระบบรองรับการสั่นสะเทือนทางกลสามารถลดความเร่งจากการสั่นสะเทือนทางกลลงได้

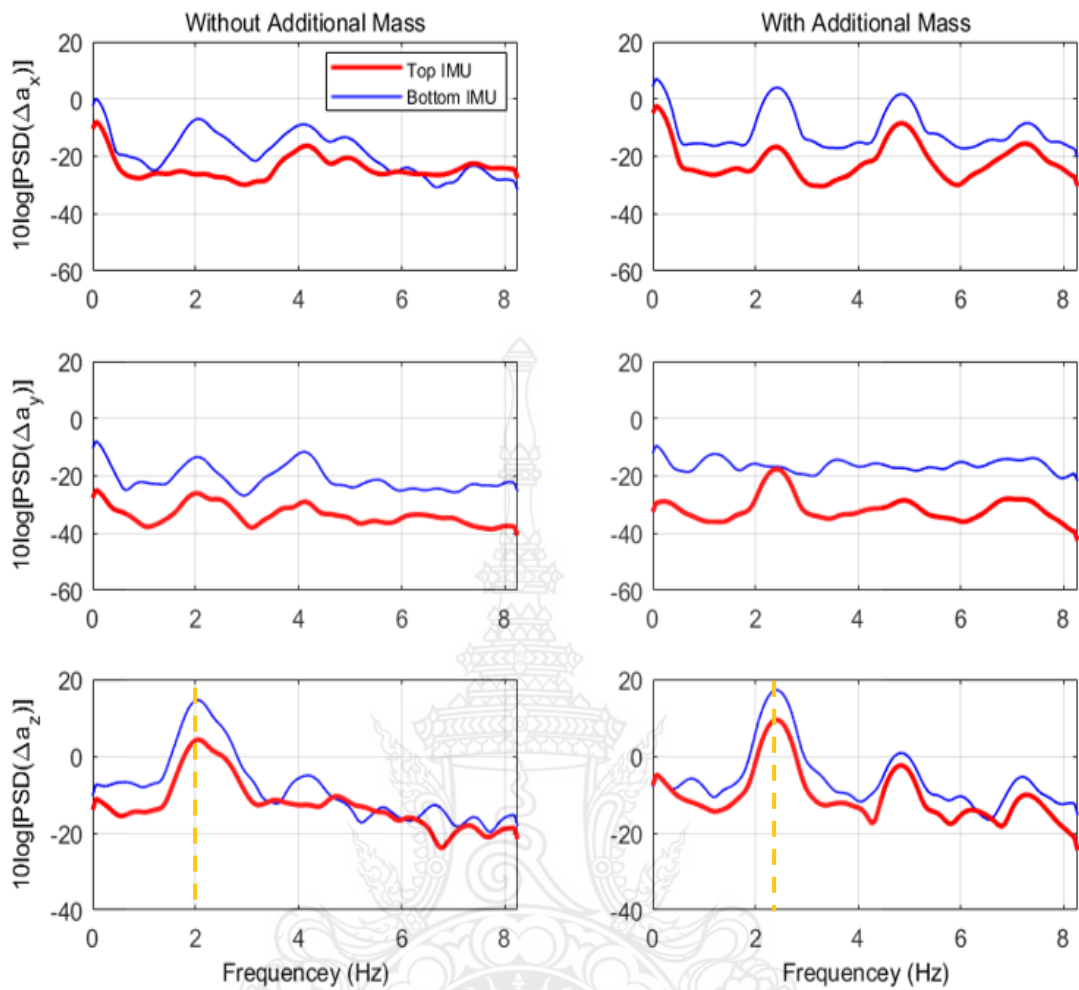
#### 4.1.2.2 การทดลองการสั่นสะเทือนทางกลบนแท่นทดลองเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำด้วยความถี่สูง

ในการทดลองนี้จะมีความคล้ายคลึงกับการทดลองในกรณีที่มีแรงภายนอกมากระทำด้วยความถี่ต่ำกว่า 1 Hz โดยผู้วิจัยสร้างอินพุตแรงที่กระตุ้นหุ่นเรือด้านซ้ายด้วยความถี่ที่สูงและตรวจวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนทางกลด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้นทั้งสองตัวทั้งในกรณีไม่เพิ่มมวลและเพิ่มมวล โดยช่วงข้อมูลทางเวลาที่นำมาวิเคราะห์อยู่ระหว่างเส้นสีเหลือง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และสำหรับการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยการประมาณค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังจากสัญญาณความเร่งในการสั่นสะเทือนแท้จริงที่สนใจทั้ง 3 แนวแกน โดยความถี่สูงสุดในการสั่นในแนวตั้งแสดงด้วยแนวเส้นสีเหลือง ดังรูปที่ 4.6 ดังนี้



รูปที่ 4.5 ความเร่งในการสั่นสะเทือนแท้จริงที่ผ่านการขจัดเวกเตอร์  $g$  ออกไปแล้วในแนวแกน  $z$  จากเซนเซอร์วัดความเร่งตัวล่าง (สีน้ำเงิน) และ จากเซนเซอร์วัดความเร่งตัวบน (สีแดง) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อระบบด้วยความถี่สูงทั้งในกรณีไม่เพิ่มมวล (บน) และเพิ่มมวล 8.7 กิโลกรัม (ล่าง)

จากรูปที่ 4.5 ผลการทดลองการสั่นสะเทือนทางกลบนแท่นทดลองเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำด้วยความถี่สูงบนแท่นทดลองทั้งในกรณีเพิ่มมวลและไม่เพิ่มมวล จะทำการเริ่มใส่แรงกระตุ้นที่ฐานโซลด์ส่วนล่างที่ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC ซึ่งแสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน โดยใส่เริ่มแรงกระตุ้นมีความถี่สูงกว่า 2 Hz ที่ 2 วินาที จำนวน 30 คาบ และตรวจวัดผลตอบสนองการสั่นสะเทือนทางกลที่ฐานยึดเซนเซอร์เลเซอร์ส่วนบนด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 ซึ่งแสดงด้วยเส้นสีแดง จากการทดลองสามารถวิเคราะห์ผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนทางกลด้วยวิธีการประมาณค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์  $10\log[\text{PSD}]$  ของค่าความถี่ในการสั่นสะเทือนที่แท้จริงทั้ง 3 แนวแกน เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อระบบด้วยควมถี่ต่ำในกรณีเพิ่มมวล 8.7 กิโลกรัม (หลักซ้าย) และ กรณีไม่เพิ่มมวล (หลักขวา)

จากผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของความถี่จากการสั่นสะเทือนทางกลทั้ง 3 แนวแกนจากเซนเซอร์วัดความถี่เชิงเส้นทั้งสองตัวทั้งในกรณีเพิ่มมวลและไม่เพิ่มมวลในรูปที่ 4.6 พบว่าค่าขนาดความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังรูปแบบ  $10\log[\text{PSD}]$  ของค่าความถี่ในการสั่นสะเทือนที่แท้จริงทั้ง 3 แนวแกนจากเซนเซอร์วัดความถี่เชิงเส้น LSM303DLHC (เส้นสีน้ำเงิน) ที่ติดตั้งอยู่ที่ฐานโซ่ส่วนล่างมีค่ากำลังสเปกตรัมสูงกว่าค่าสเปกตรัมกำลังจากเซนเซอร์วัดความถี่เชิงเส้น ADXL335 (เส้นสีแดง) เช่นเดียวกับการทดลองสั่นสะเทือนทางกลด้วยการใส่แรงที่มีความถี่ต่ำกว่า 1 Hz จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของความถี่ที่แท้จริงในแนวแกน z ( $\Delta a_z$ ) ในกรณีที่ไม่มีเพิ่มมวล ค่าความถี่ที่มีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังสูงสุดของ  $\Delta a_z$  จากเซนเซอร์วัด

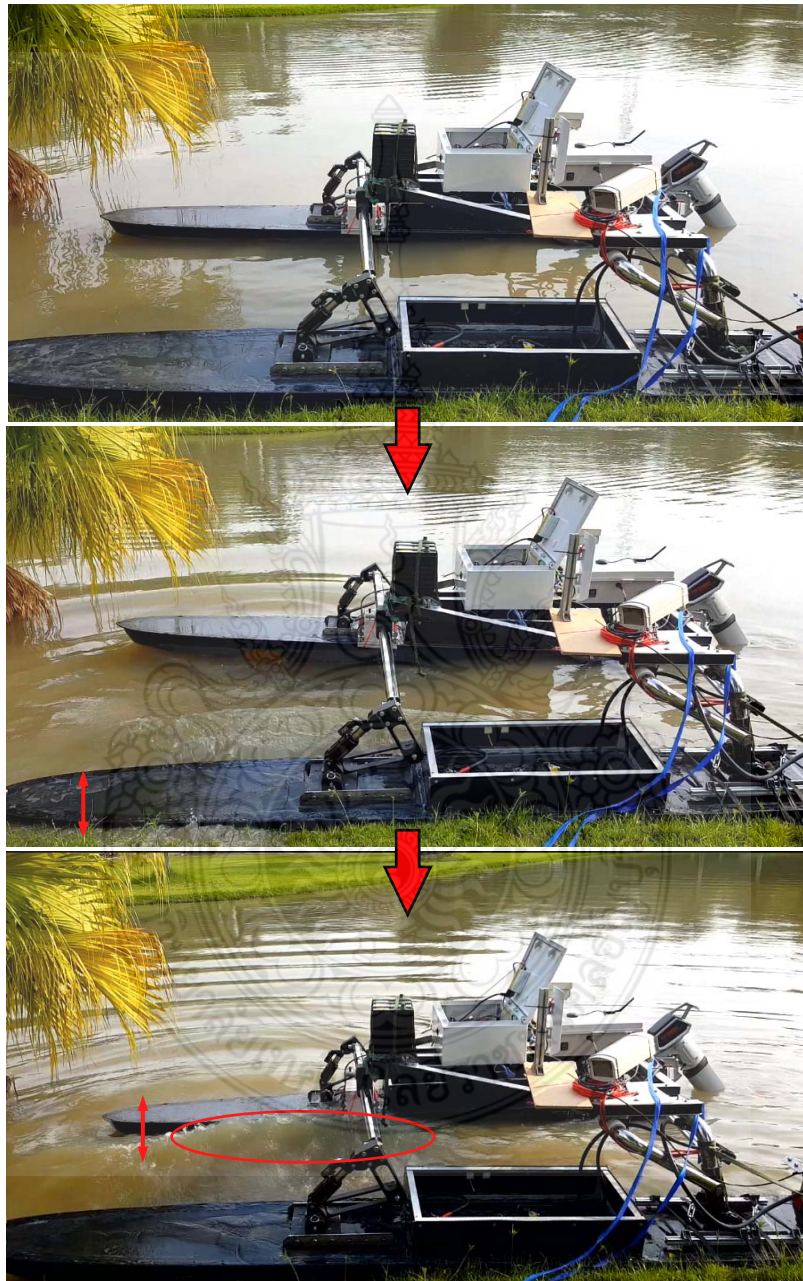
ความเร่งทั้งสองเกิดขึ้นที่ความถี่เท่ากันที่ 2 Hz (หรือ 12.57 rad/s) และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลัง จากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC ในรูปแบบ 10log [PSD] เท่ากับ  $14.61 \text{ m}^2\text{s}^{-4}/\text{Hz}$  และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังจากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 มีค่าเท่ากับ  $4.14 \text{ m}^2\text{s}^{-4}/\text{Hz}$  จากการวิเคราะห์อัตราการส่งผ่านพบว่า ความเร่งการสั่นสะเทือนทางกลที่กระทำต่อหุ่นเรือจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างส่วนบนในอัตราร้อยละ 0.8974 หรือ 8.974% และในกรณีที่มีการเพิ่มมวล 8.7 กิโลกรัม ค่าความถี่ที่มีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังสูงสุดของ  $\Delta a_z$  จากเซนเซอร์วัดความเร่งทั้งสองเกิดขึ้นที่ความถี่เท่ากัน คือ 2.4 Hz (หรือ 15.08 rad/s) โดยที่ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังจากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC มีค่า 10log [PSD] เท่ากับ  $9.4 \text{ m}^2\text{s}^{-4}/\text{Hz}$  และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังจากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 มีค่าเท่ากับ  $17.10 \text{ m}^2\text{s}^{-4}/\text{Hz}$  จากการวิเคราะห์อัตราการส่งผ่านพบว่า ความเร่งการสั่นสะเทือนทางกลที่กระทำต่อหุ่นเรือจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างส่วนบนในอัตราร้อยละ 0.16982 หรือ 16.982 % ดังนั้น การทดลองการสั่นสะเทือนทางกลบนแท่นทดลองเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำด้วยความถี่สูงทั้งในกรณีเพิ่มมวลและไม่เพิ่มมวลพบว่าระบบรองรับการสั่นสะเทือนทางกลสามารถลดความเร่งจากการสั่นสะเทือนทางกลลงได้เช่นเดียวกันกับการทดลองการสั่นสะเทือนทางกลบนแท่นทดลองเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำด้วยความถี่ต่ำ

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นความถี่สูงสุดและค่า Power Spectrum Density ที่ความถี่สูงสุดในกรณีไม่เพิ่มมวลและเพิ่มมวล 8.7 กิโลกรัม ที่ได้รับจากเซนเซอร์วัดความเร่งทั้งสองตัวเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำที่ความถี่สูง

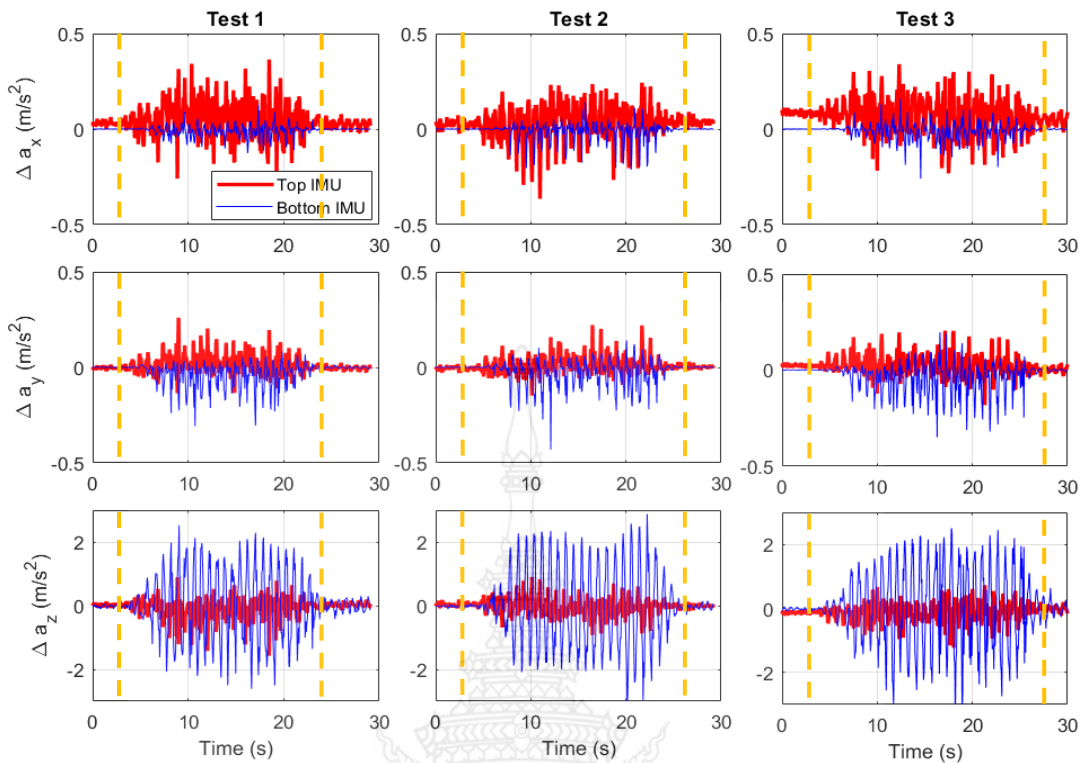
	กรณีไม่เพิ่มมวล		กรณีเพิ่มมวล 8.7 kg	
	Peak Frequency $\Delta a_z$	10log[PSD $\Delta a_z$ ]	Peak Frequency $\Delta a_z$	10log[PSD $\Delta a_z$ ]
1. Top IMU	2 Hz	4.14	2.4 Hz	9.4
2. Bottom IMU	or 12.57 rad/s	14.61	or 15.08 rad/s	17.10
$10 \log \left[ \frac{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Top}}}{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Bot}}} \right]$	-10.47		-7.7	
$\log \left[ \frac{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Top}}}{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Bot}}} \right]$	$\frac{-10.47}{10} = -1.047$		$\frac{-7.7}{10} = -0.77$	
$\left[ \frac{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Top}}}{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Bot}}} \right]$	$10^{(-1.047)} = 0.08974$		$10^{(-0.77)} = 0.16982$	
<b>อัตราการส่งผ่าน</b>	<b>8.974 %</b>		<b>16.982 %</b>	

4.1.2.3 การทดลองการสั่นสะเทือนทางกลเนื่องจากคลื่นอุทกพลศาสตร์ที่มากกระทำทางด้านข้าง

สำหรับการทดลองนี้ ผู้วิจัยติดตั้งมวล 8.7 กิโลกรัม ไว้บนฐานยึดเซนเซอร์  
เลเซอร์และทำการสร้างคลื่นน้ำจากท่อนฝั่งซ้ายของเรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น เพื่อให้คลื่นไป  
กระทบกับท่อนฝั่งขวาทางด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.7



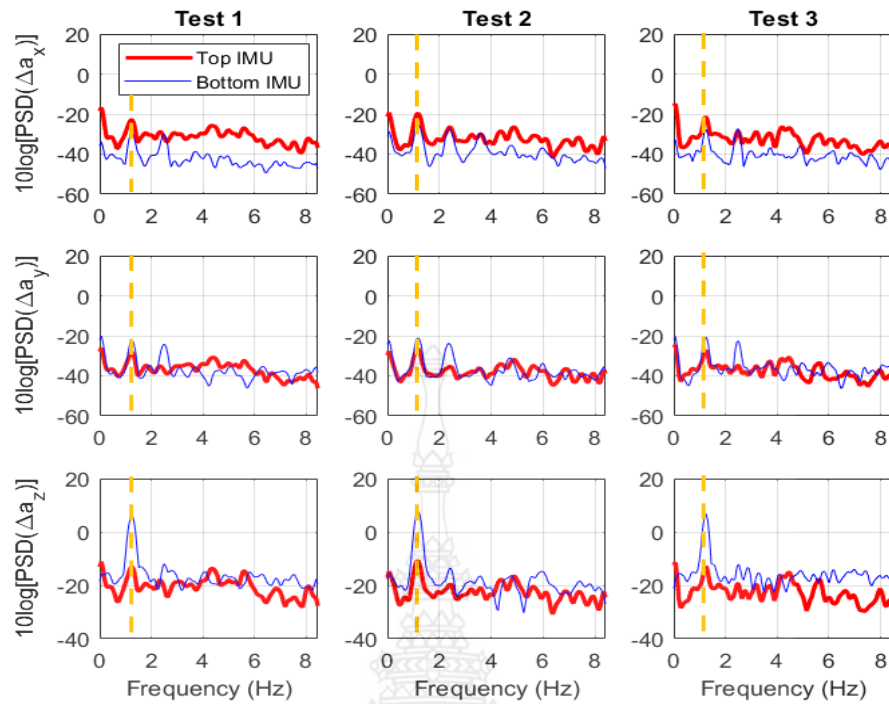
รูปที่ 4.7 การทดลองการสั่นสะเทือนทางกลโดยสร้างคลื่นน้ำจากท่อนฝั่งขวาของเรือสองท่อนแบบ  
ปรับตัวตามคลื่น เพื่อให้คลื่นไปกระทบกับท่อนฝั่งซ้ายทางด้านข้าง



รูปที่ 4.8 ค่าสัญญาณความเร่งในการสั่นสะเทือนที่แท้จริง ( $\Delta a$ ) ในแนวแกน xyz จากการตรวจวัดของ เซนเซอร์วัดความเร่งตัวล่าง (เส้นสีน้ำเงิน) และเซนเซอร์วัดความเร่งตัวบน (เส้นสีแดง) เมื่อ ทุ่นฝั่งด้านซ้ายมีการสั่นสะเทือนทางกลเนื่องจากคลื่นอุทกพลศาสตร์ที่ไปกระทำทางด้านข้าง

จากการทดลองในรูปที่ 4.7 ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนทางกลที่ทุ่นเรือ ด้านขวาโดยการตรวจวัดค่าความเร่งในการสั่นสะเทือนที่แท้จริงในแกน xyz ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัด ความเร่งด้านล่างที่ฐาน โข้วค โดยใช้เซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC (เส้นสีน้ำเงิน) และจาก เซนเซอร์วัดความเร่งตัวบนที่ฐานยึดเซนเซอร์เลเซอร์ โดยใช้เซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 (เส้นสีแดง) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.8 จากการทดลองจำนวน 3 ครั้ง โดยเริ่มไต้แรงกระตุ้นที่ทุ่นซ้ายที่ 3 วินาที ผู้วิจัยพบว่าค่าข้อมูลดิบของความเร่งใน 3 แนวแกนที่วัดได้จากเซนเซอร์ด้านบนของทุ่นเรือ การทดลองจะมีขนาดของค่าความเร่งการสั่นสะเทือนทางกลที่ลดลงอย่างชัดเจน ดังนั้น ในการวิเคราะห์เพื่อ หาอัตราการส่งผ่านความเร่งจากการสั่นสะเทือนทางกลจากทุ่นเรือไปยังฐานเซนเซอร์เลเซอร์ด้วยการ วิเคราะห์จากการประมาณค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของข้อมูลค่าความเร่งจากเซนเซอร์วัด ความเร่งทั้งสองตัวดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยทำการสรุปผลการวิเคราะห์อัตราการส่งผ่านดังตารางที่ 4.7





รูปที่ 4.9 ค่า  $10\log[\text{PSD}]$  จากค่าข้อมูลความถี่ในการสั่นสะเทือนที่แท้จริงใน 3 แนวแกน จากการทดลองการสั่นสะเทือนทางกลเนื่องจากการสร้างคลื่นอุทกพลศาสตร์ที่ไปกระทำทางด้านข้างของทุ่นเรือฝั่งซ้าย จากข้อมูลความถี่ในการสั่นสะเทือนที่แท้จริงที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความถี่ตัวล่าง (เส้นสีน้ำเงิน) และ จากเซนเซอร์วัดความถี่ตัวบน (เส้นสีแดง)

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นความถี่สูงสุดและค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังที่ความถี่สูงสุดในทดลองการสั่นสะเทือนทางกลเนื่องจากการคลื่นอุทกพลศาสตร์ที่มากระทำทางด้านข้าง

IMUs	Top/Bottom					
Experiment	1		2		3	
Peak Frequency	1.25		1.18		1.25	
$10\log[\text{PSD}(\mathbf{a}_i)]$	-13.1	5.9	-10.8	7.6	-12.9	6.8
$10\log\left[\frac{\text{PSD } \Delta a_{z,\text{Top}}}{\text{PSD } \Delta a_{z,\text{Bot}}}\right]$	-19.0		-18.4		-19.7	
$\log\left[\frac{\text{PSD } \Delta a_{z,\text{Top}}}{\text{PSD } \Delta a_{z,\text{Bot}}}\right]$	$\frac{-19}{10} = -1.9$		$\frac{-18.4}{10} = -1.84$		$\frac{-19.7}{10} = -1.97$	
$\left[\frac{\text{PSD } \Delta a_{z,\text{Top}}}{\text{PSD } \Delta a_{z,\text{Bot}}}\right]$	$10^{(-1.9)} = 0.01258$		$10^{(-1.84)} = 0.01445$		$10^{(-1.97)} = 0.01071$	
<u>อัตราการส่งผ่าน</u>	<u>1.258 %</u>		<u>1.445 %</u>		<u>1.071 %</u>	

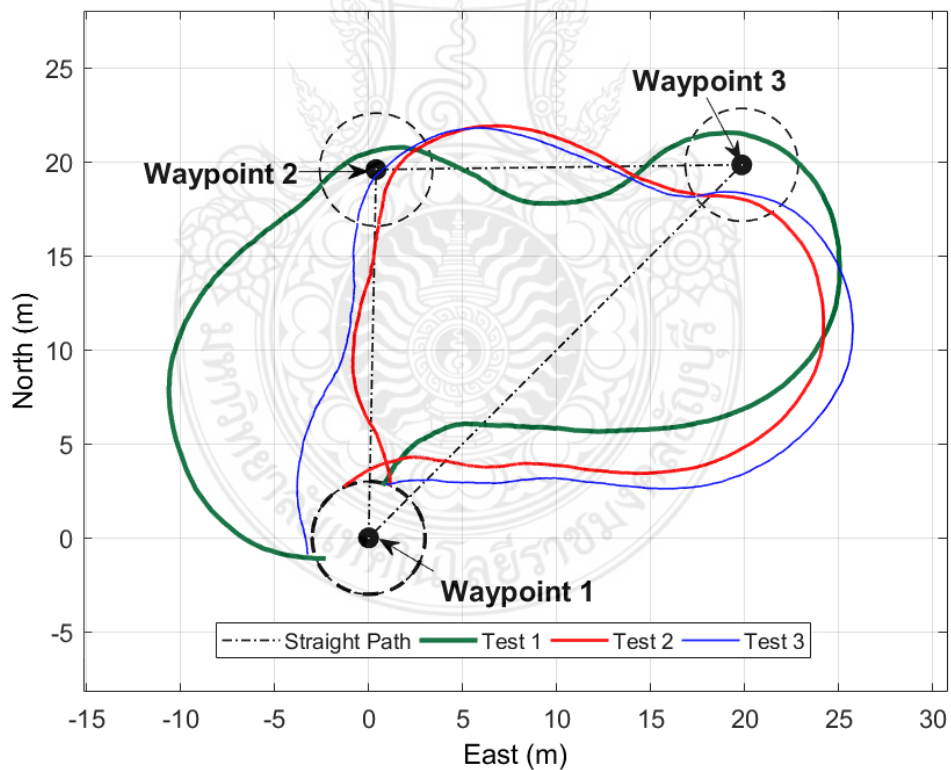
จากรูปที่ 4.9 ผลการประมาณค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังของข้อมูลความเร่งการสั่นสะเทือนทางกลจากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้นทั้งสองตัวใน 3 แนวแกนด้วยการทดลอง 3 ครั้ง จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.7 พบว่า ขนาดของค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังรูปแบบ  $10\log [PSD]$  ในแนวแกน  $z$  ที่บันทึกผลได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC ซึ่งติดตั้งที่ฐานโซ้คด้านล่าง (สีน้ำเงิน) และเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 ซึ่งติดตั้งที่ฐานเซนเซอร์เลเซอร์ด้านบน (สีแดง) ผู้วิจัยพบว่าทั้ง 3 การทดลอง เซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้นทั้งสองตัวมีค่าความถี่ที่มีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังสูงสุดเกิดขึ้นที่ความถี่เท่ากัน คือ  $[1.25, 1.18, 1.25]$  Hz โดยที่ความเร่งจากการสั่นสะเทือนทางกลที่ฐานโซ้คจากการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC มีขนาดของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังรูปแบบ  $10\log [PSD]$  มีค่าเท่ากับ  $[5.9, 7.6, 6.8] \text{ m}^2 \text{ s}^{-4}/\text{Hz}$  ส่งผลให้เกิดผลตอบสนองความเร่งจากการสั่นสะเทือนทางกลที่ฐานเซนเซอร์เลเซอร์ด้านบนซึ่งตรวจวัดด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 มีขนาดของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังเท่ากับ  $[-13.1, -10.79, -12.9] \text{ m}^2 \text{ s}^{-4}/\text{Hz}$  จากการวิเคราะห์พบว่า ระบบรองรับการสั่นสะเทือนทางกลสามารถลดการสั่นสะเทือนลงได้ร้อยละ  $[1.258, 1.445, 1.071] \times 10^{-2}$  หรือ  $[1.258, 1.445, 1.071] \%$  ซึ่งเกิดขึ้นจากข้อดีของความเป็นอิสระกันระหว่างท่อนที่มีโครงสร้างของจุดหมุนที่ส่วนหน้าที่จะช่วยลดการสั่นสะเทือนของโครงสร้างด้านบนขณะลำเรือลอยอยู่ในน้ำ อย่างไรก็ตามการกระตุ้นด้วยคลื่นอุทกพลศาสตร์นั้นมีอิทธิพลน้อยมากต่อการประมาณค่าการสั่นสะเทือนหรือจากค่า  $10\log [PSD]$  ในแกน  $x$  และ  $y$  ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายพลังงานเนื่องจากการสั่นสะเทือนของท่อนเรือ จะถูกกระจายไปยังโซ้ค DBAir ทั้งสองข้างและการสูญเสียพลังงานในแรงเสียดทานจากข้อต่อและแบร์ริง จากโครงสร้างของระบบรองรับการสั่นสะเทือนทางกลอีกด้วย

#### 4.1.2.4 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนทางกลจากแรงอุทกพลศาสตร์ในกรณีหุ่นยนต์เรือสองท่อนปฏิบัติงานแบบอัตโนมัติ

ในการทดลองนี้เป็นการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนทางกลจากแรงอุทกพลศาสตร์ขณะที่หุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น เคลื่อนที่ติดตามเส้นทางวิถีโคจรแบบอัตโนมัติ (Autonomous trajectory-tracking) โดยกำหนดจุดพิกัดการนำทางแบบอัตโนมัติและรายงานผลการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.10

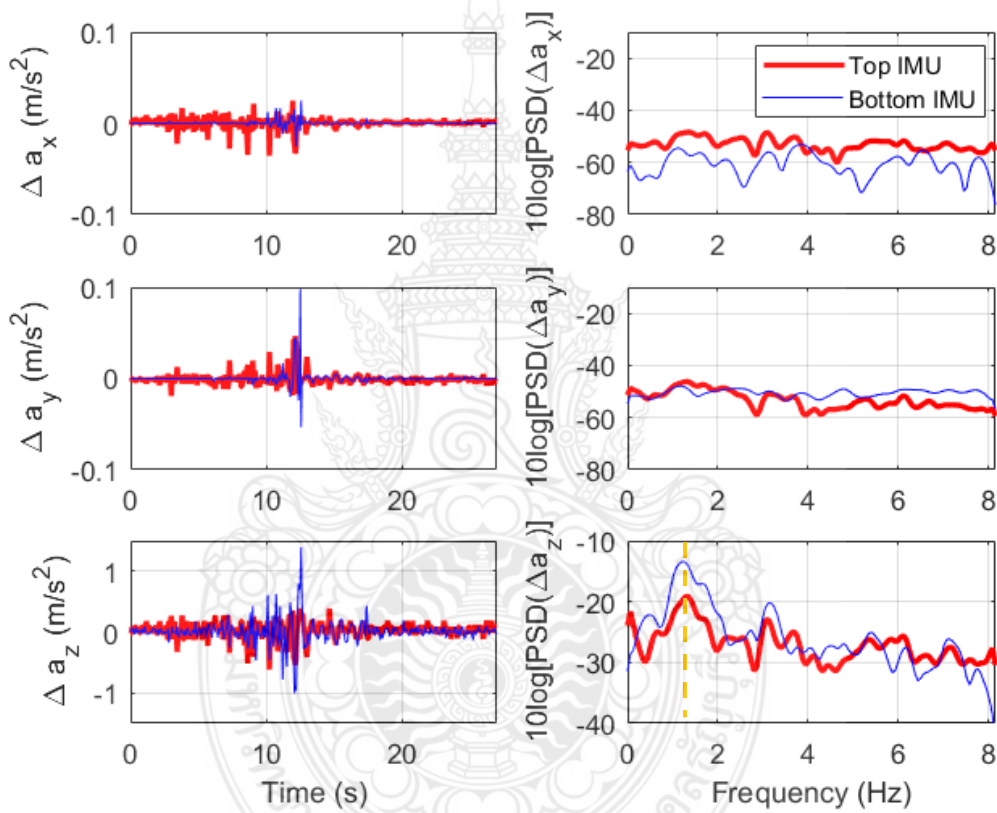


รูปที่ 4.10 โปรแกรม Mission Planner ที่ใช้เชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน (Interface) สำหรับการติดตามและวางแผนจุดพิกัดการควบคุมหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น อย่างอัตโนมัติ



รูปที่ 4.11 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรรูปแบบสามเหลี่ยมแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น จากการทดลอง 3 ครั้งที่มีองศาหันเหของหัวเรือตอนเริ่มต้นที่แตกต่างกัน

ในการทดลองติดตามเส้นวิถีโคจรอัตโนมัติซึ่งแสดงในรูปที่ 4.11 ผู้วิจัยได้กำหนดจุดพิกัดสามจุดเพื่อให้ได้เส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรง 3 เส้น จากตำแหน่งที่ 1-2 และ 2-3 ที่มีระยะห่าง 20 เมตร เชื่อมต่อกันเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉาก โดยกำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นอยู่ที่ตำแหน่ง [0,0] และกำหนดให้รัศมีรอบจุดพิกัดเป้าหมายเท่ากับ 3 เมตร จากการทดลอง 3 ครั้ง โดยมุมหันของหัวเรือตอนเริ่มต้นแตกต่างกันในช่วง 90 ถึง 0 องศา จากการทดลองนี้แสดงสมรรถนะด้านรัศมีวงเลี้ยวของหุ่นยนต์เรือสองหุ่นแบบปรับตัวตามคลื่น มีค่ารัศมีประมาณ 10 เมตร



รูปที่ 4.12 ผลการตรวจวัดข้อมูลความเร่งในการสั่นสะเทือนที่แท้จริงใน 3 แนวแกนสำหรับการทดลองติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติ จากการทดลองครั้งที่ 2 ในช่วงการเคลื่อนที่จากเป้าหมายที่ 1 ไปยังเป้าหมายที่ 2 ภายใน 28 วินาที (หลักซ้าย) และค่า  $10\log[\text{PSD}]$  จากข้อมูลความเร่งในการสั่นสะเทือนที่แท้จริงใน 3 แนวแกน (หลักขวา) โดยข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร่งตัวล่าง (เส้นสีน้ำเงิน) และ ข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร่งตัวบน (เส้นสีแดง)

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นความถี่สูงสุดและค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังที่ความถี่สูงสุดในทดลองการสั่นสะเทือนทางกลจากแรงอุทกพลศาสตร์ในกรณีหุ่นยนต์เรือสองท่อนปฏิบัติงานแบบอัตโนมัติ

	Peak Frequency $\Delta a_z$	$10\log[\text{PSD } \Delta a_z]$
1. Top IMU	1.3 Hz	-19.2
2. Bottom IMU	or 8.17 rad/s	-13.4
$10\log\left[\frac{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Top}}}{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Bot}}}\right]$		-5.8
$\log\left[\frac{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Top}}}{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Bot}}}\right]$		$\frac{-5.8}{10} = -0.58$
$\left[\frac{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Top}}}{\text{PSD } \Delta a_{z, \text{Bot}}}\right]$		$10^{(-0.58)} = 0.26302$
<u>อัตราการส่งผ่าน</u>		<u>26.302 %</u>

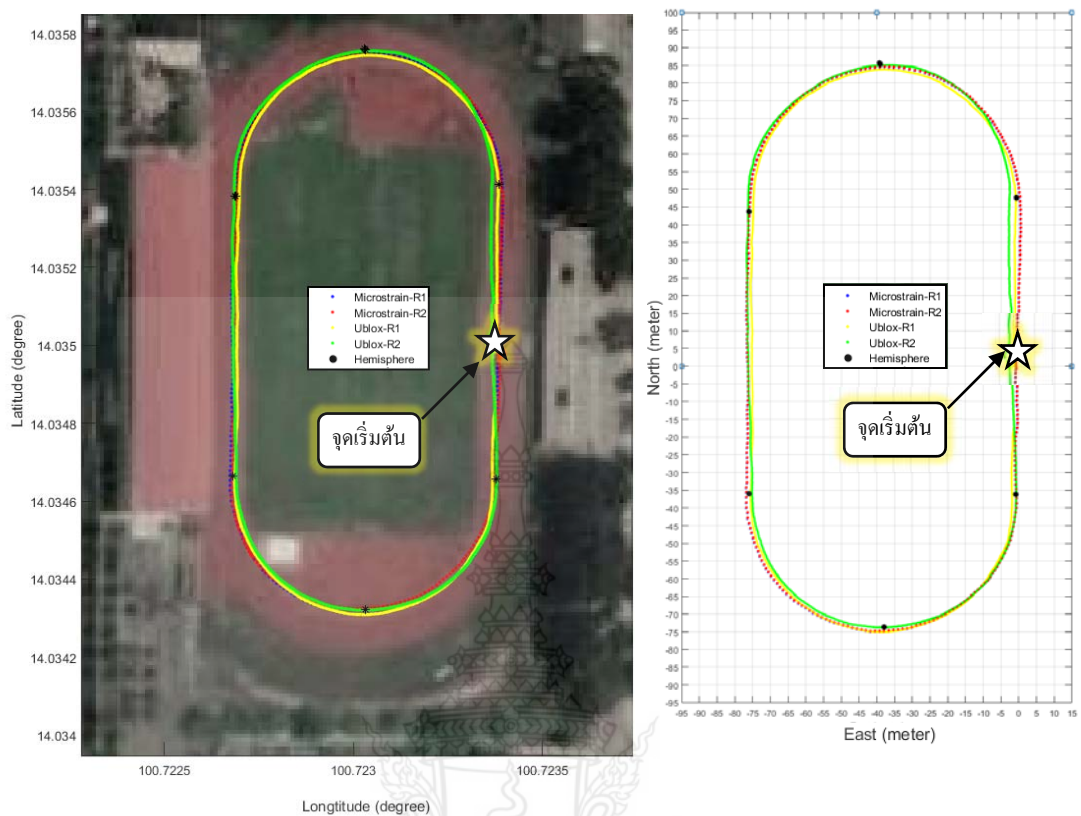
จากรูปที่ 4.12 การประมาณค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลความเร่งในการสั่นสะเทือนที่แท้จริงใน 3 แนวแกน ผู้วิจัยพบว่าจากการทดลองครั้งที่ 2 ในช่วงเป้าหมายที่ 1 ไปยังเป้าหมายที่ 2 ภายใน 28 วินาที ซึ่งเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น LSM303DLHC สามารถตรวจวัดค่าความเร่งในแนวแกน z ได้ในช่วง -1 ถึง +1  $\text{m/s}^2$  เป็นผลมาจากอุทกพลศาสตร์ของคลื่นที่มากกระทำต่อหุ่นเรือขณะเริ่มเคลื่อนที่ออกจากเป้าหมายที่ 1 ดังนั้นขนาดของค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังในรูปแบบ  $10\log[\text{PSD}]$  ในแนวแกน z มีค่าเท่ากับ  $-13.4 \text{ m}^2\text{s}^{-4}/\text{Hz}$  ที่ความถี่สูงสุด 1.3 Hz ซึ่งส่งผลกระทบต่อฐานเซนเซอร์เท่ากับ  $-19.2 \text{ m}^2\text{s}^{-4}/\text{Hz}$  ซึ่งตรวจวัดเซนเซอร์วัดความเร่งเชิงเส้น ADXL335 จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังพบว่าสามารถลดอัตราการส่งผ่านความเร่งจากการสั่นสะเทือนได้ถึงร้อยละ 0.26302 หรือ 26.302% ซึ่งจะช่วยยืนยันการลดการสั่นสะเทือนโดยใช้โซ่ DBAir และ โครงสร้างเรือแบบคานหมุนอิสระ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่แบบโคลงและแบบก้มเงยระหว่างหุ่นด้วยจุดหมุนระหว่างกึ่งกลางที่เชื่อมต่อไปยังโครงสร้างด้านบนสำหรับฐานยึดเซนเซอร์เลเซอร์

## 4.2 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติ

สำหรับผลการทดลองหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติ สามารถแบ่งผลการทดลองออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ 1) การอภิปรายผลการทดลองความแม่นยำและความเที่ยงตรงของข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอส Ublox รุ่น NEO-6M ที่ใช้กับ อาดูไฟลีสต์ เมกะ เปรียบเทียบกับข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอสเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ และข้อมูลตำแหน่งพิกัดแบบจุดด้วยเครื่องวัดพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม Hemisphere S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) และ 2) การอภิปรายผลการทดลองความสามารถในการทำซ้ำเดิมของหน่วยควบคุมการนำทาง อาดูไฟลีสต์ เมกะ ที่ติดตั้งในหุ่นยนต์รถสี่ล้อ และ 3) การอภิปรายผลการทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าระยะการขจัด  $L_1$ , ค่าอัตราส่วนความหน่วง ( $\xi$ ) และค่าอัตราขยายมุมหันเห ( $K_p$ ) ที่มีผลต่อพฤติกรรม การติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติทั้งในหุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กและหุ่นยนต์รถสี่ล้อ

### 4.2.1 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองความแม่นยำและความเที่ยงตรงของข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอส Ublox รุ่น NEO-6M

สำหรับผลการตรวจสอบและพิสูจน์ความน่าเชื่อถือของข้อมูลการระบุตำแหน่งในด้านความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ของข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M ที่ใช้กับหน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติอาดูไฟลีสต์ เมกะ เปรียบเทียบกับข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสที่ใช้กับเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อยของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ และข้อมูลพิกัดตำแหน่งแบบจุด จากเครื่องวัดพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียมของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ในการทดลองเดินบนเส้นแบ่งลู่วิ่ง r2 และ R2 ในสนามกรีฑามาตรฐาน 400 เมตร จำนวน 2 รอบสนาม ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.13

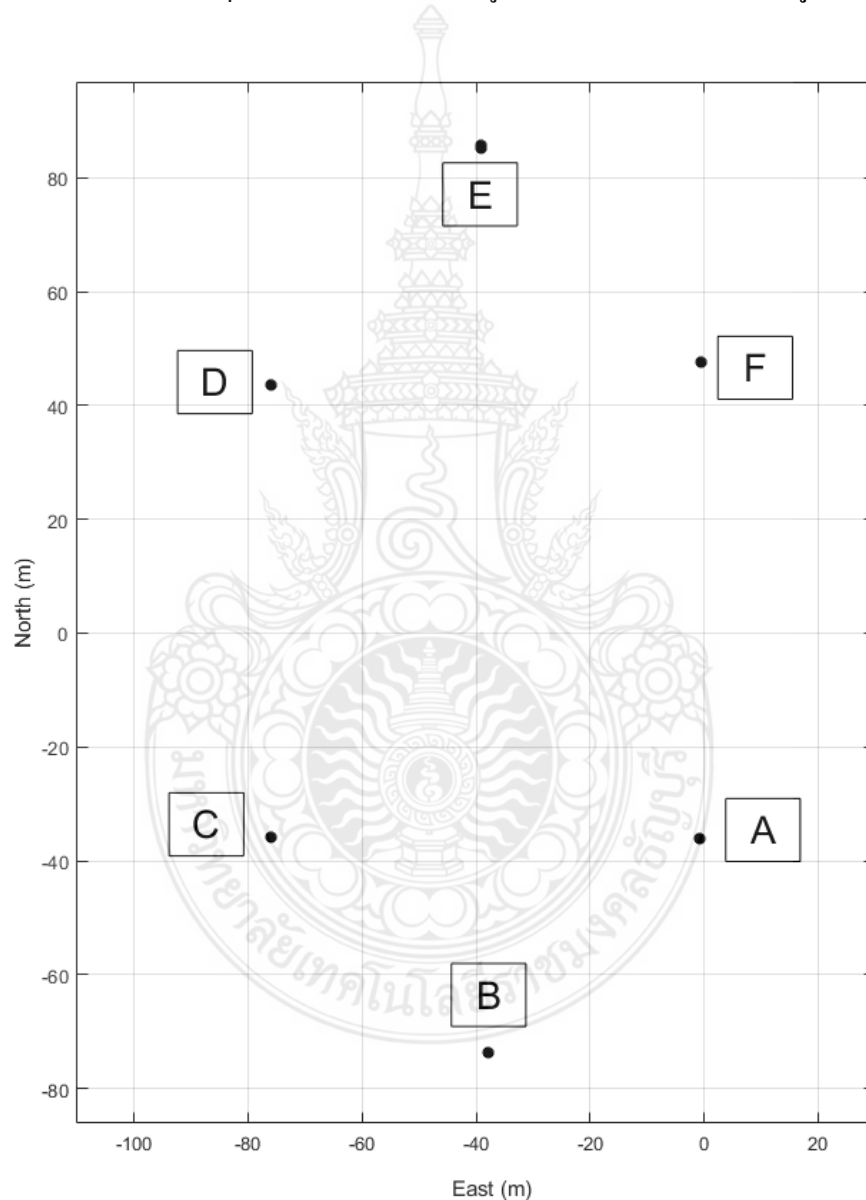


รูปที่ 4.13 ข้อมูลพิกัดตำแหน่งการเคลื่อนที่บนเส้นแบ่งคู่วิ่ง r2, R2 ที่ได้รับจากตัวรับสัญญาณจีพีเอส LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ และ Ublox รุ่น NEO-6M และตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอส Hemisphere S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ในรูปแบบภาพถ่ายดาวเทียมและตำแหน่งในระบบพิกัด UTM

จากรูปที่ 4.13 ภาพซ้าย แสดงข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสทั้งสามชนิดในระบบพิกัดภูมิศาสตร์ โดยแบ่งออกเป็น 1) ข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ รอบที่ 1 และ 2 ที่แสดงด้วยจุดสีน้ำเงินและสีแดงตามลำดับ และ 2) ข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M รอบที่ 1 และ 2 ที่แสดงด้วยจุดสีเหลืองและสีเขียวตามลำดับ และ 3) กลุ่มตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ทั้งหมด 6 กลุ่มพิกัด อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ความแม่นยำและความแม่นยำตรงของข้อมูลพิกัดตำแหน่งในระบบพิกัดภูมิศาสตร์จะสามารถทำความเข้าใจได้ยากเนื่องจากข้อมูลพิกัดตำแหน่งแสดงเป็นหน่วยองศา ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงทำการแปลงข้อมูลระบบพิกัดตำแหน่งทั้งหมดในระบบพิกัดภูมิศาสตร์ (Geographic coordinate) ให้อยู่ในระบบพิกัดกริดแบบยูทีเอ็ม (Universal Transverse Mercator coordinate หรือ

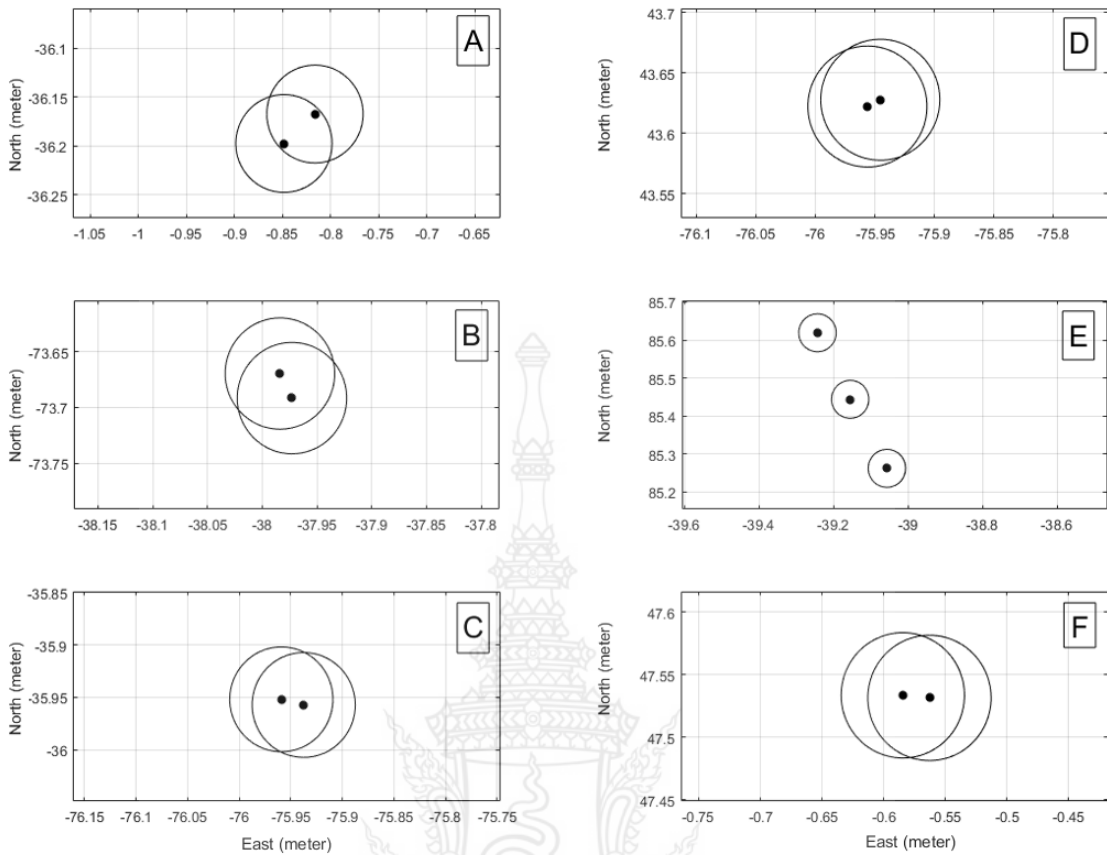
UTM) ที่แสดงข้อมูลพิกัดตำแหน่งในหน่วยเมตร และยังทำการเลื่อนข้อมูลทุกๆจุดทั้งแนวแกนทิศตะวันออก (East) และทิศเหนือ (North) โดยอ้างอิงกับตำแหน่งจากจุดเริ่มต้นที่ [0,0] ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์และแปลผลพิกัดตำแหน่งจากการทดลองได้เข้าใจมากยิ่งขึ้น

ในขั้นต้น ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อมูลความแม่นยำและความเที่ยงตรงจากข้อมูลกลุ่มตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ทั้งหมด 6 กลุ่มตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และส่วนขยายในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 ผลการตรวจวัดข้อมูลพิกัดตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ทั้งหมด 6 กลุ่มตำแหน่ง

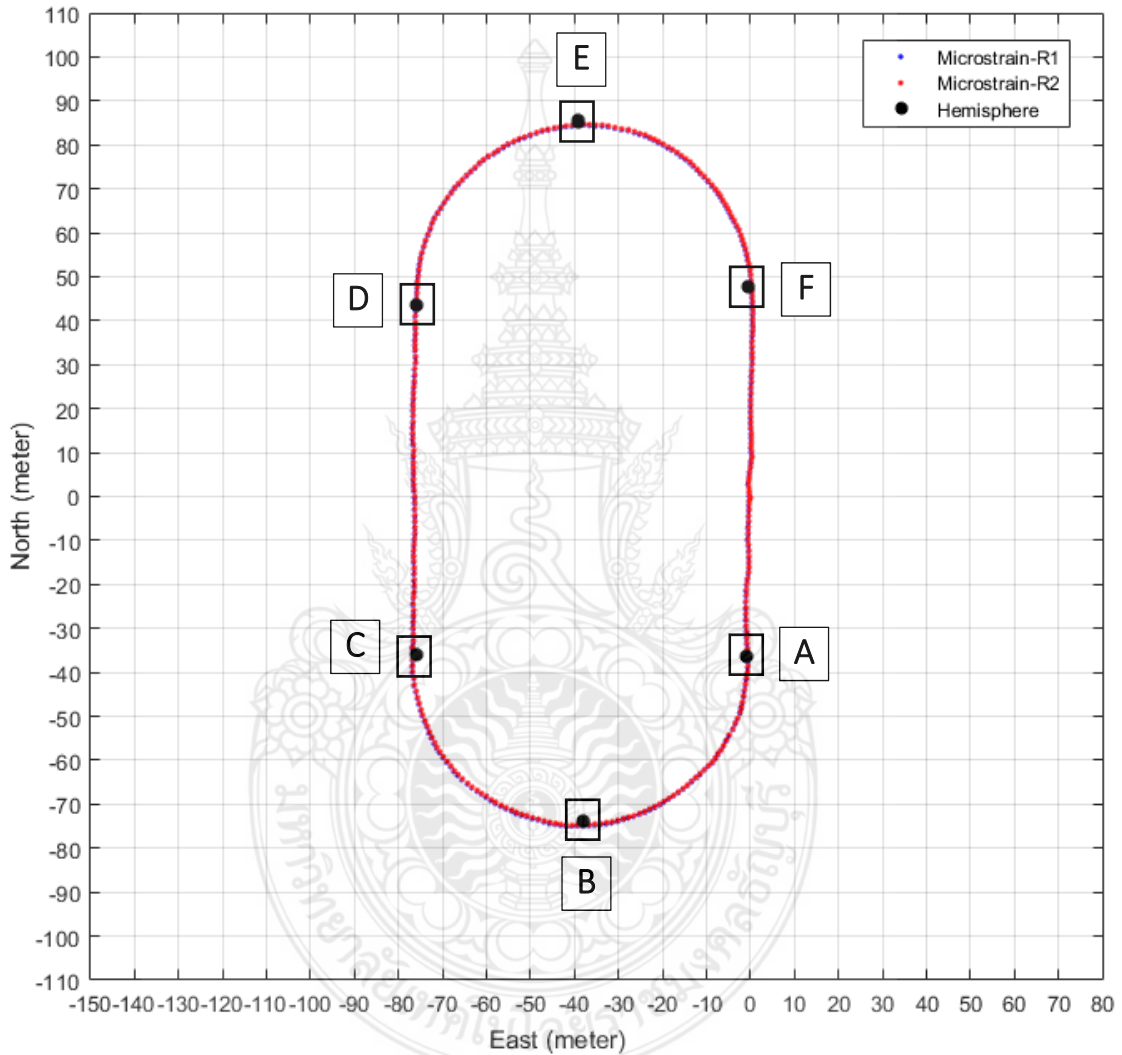




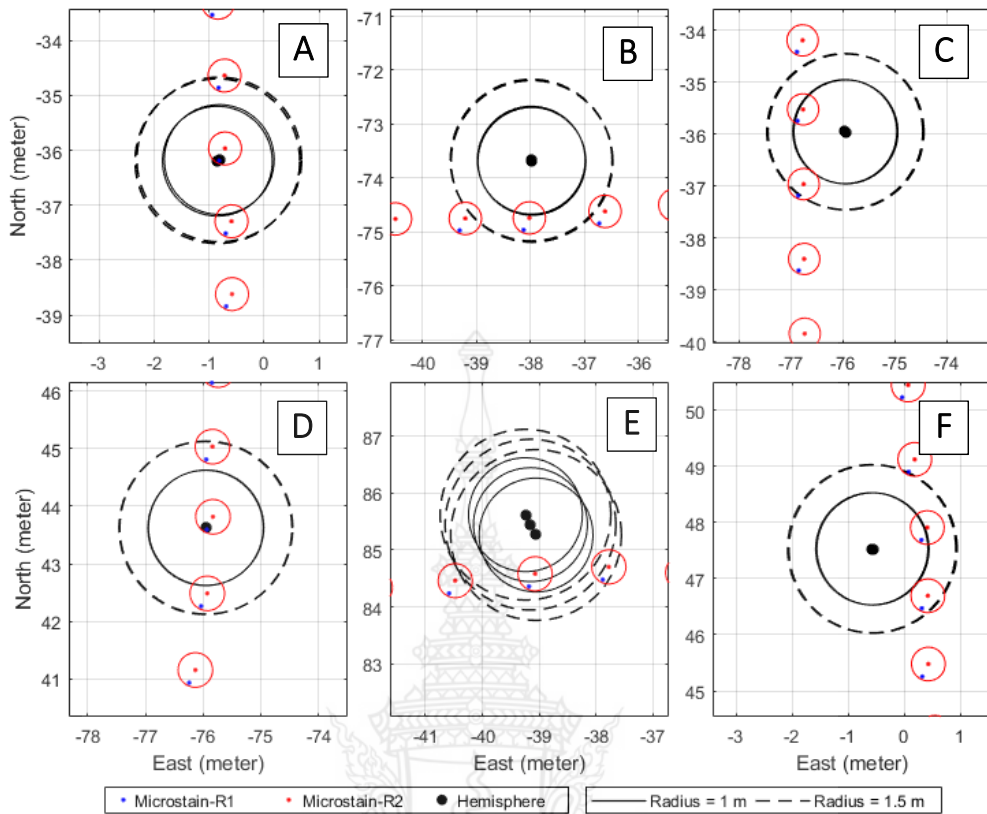
รูปที่ 4.15 ส่วนขยายของผลการตรวจวัดข้อมูลพิกัดตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ทั้งหมด 6 กลุ่ม ตำแหน่ง ที่มีรัศมี 5 เซนติเมตร

ผลการทดสอบความแม่นยำและความเที่ยงตรงของข้อมูลพิกัดตำแหน่งของเส้นแบ่ง ลู่วิ่ง r2 และ R2 จำนวน 6 กลุ่มจุด ซึ่งตรวจวัดด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) โดยที่ทุกๆกลุ่มจุดมีการระบุตำแหน่งน้อยกว่าในรัศมี แนวระนาบ 5 เซนติเมตร โดยที่ยกเว้นกลุ่มจุด E ที่มีการระบุตำแหน่งมากกว่ารัศมีแนวระนาบ 5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น จำนวนและตำแหน่งดาวเทียม ที่รับสัญญาณได้, สิ่งกีดขวางรอบๆบริเวณการตรวจวัด, สภาพอากาศที่ไม่แน่นอน หรือปัจจัยร่วมอื่นๆ ใดๆก็ตาม ข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยการตรวจวัดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) สามารถนำมาใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการ ทดลองหาความแม่นยำและความเที่ยงตรงของข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ และตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M โดยที่ มีความเที่ยงตรงของข้อมูลพิกัดตำแหน่งสูงกว่า 5 เซนติเมตร

ในขั้นถัดมา ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อมูลความแม่นยำและความเที่ยงตรงของข้อมูลการระบุพิกัดตำแหน่งด้วยเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลกลุ่มตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และส่วนขยายในรูปที่ 4.17



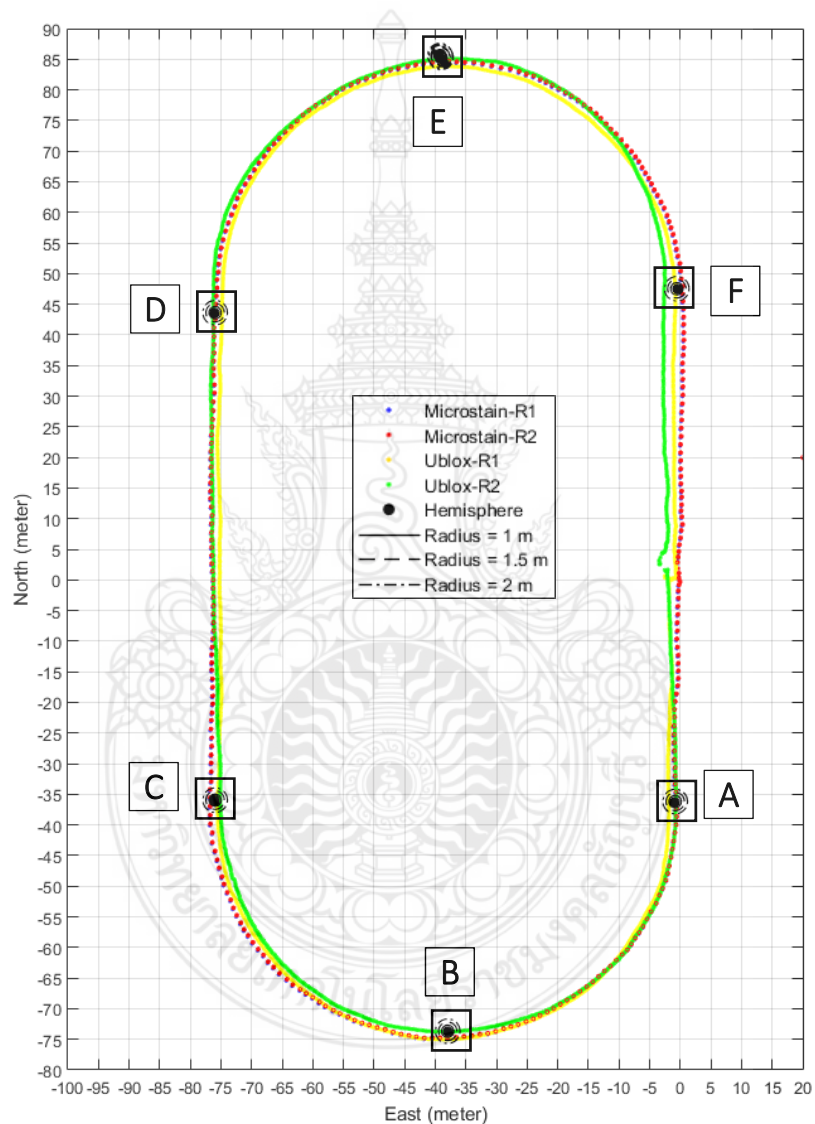
รูปที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ ที่เดินในลู่วิ่ง กับข้อมูลพิกัดตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ที่มี 6 กลุ่มตำแหน่ง



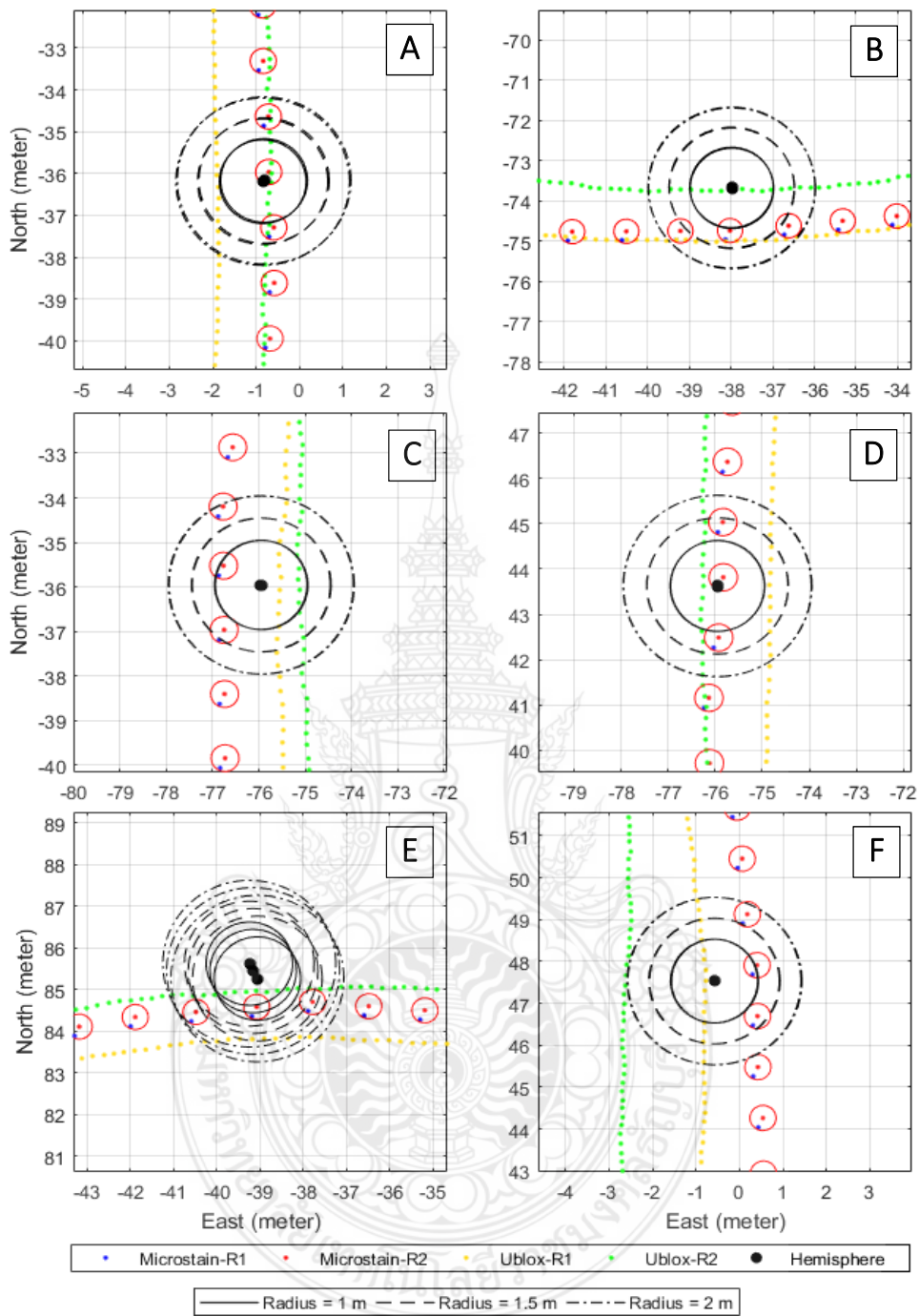
รูปที่ 4.17 ภาพขยายของผลการเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ ที่เดินในลู่วิ่ง (จุดสีแดง) กับข้อมูลพิกัดตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ที่มี 6 กลุ่มตำแหน่ง ที่มีวงรัศมีจากพิกัดอ้างอิงเท่ากับ 1 เมตร (วงกลมเส้นทึบสีดำ) และ 1.5 เมตร (วงกลมเส้นประสีเทา)

จากรูปที่ 4.16 ข้อมูลการระบุพิกัดตำแหน่งด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอสที่ใช้กับเซนเซอร์ที่ใช้วัดความถี่ของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ โดยอ้างอิงจากข้อมูลพิกัดตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ซึ่งกำหนดให้ระยะรัศมีจากพิกัดอ้างอิงเท่ากับ 1 เมตร และ 1.5 เมตร แสดงด้วยวงกลมเส้นทึบสีดำและวงกลมเส้นประสีเทาตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ในด้านความแม่นยำจากรูปที่ 4.17 พบว่า พิกัดตำแหน่งด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอสที่ใช้กับเซนเซอร์ที่ใช้วัดความถี่ของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ ที่เดินในลู่วิ่งสำหรับช่วงทางตรง ในภาพขยายที่จุด A-C-D-F มีค่าความผิดพลาดจากรัศมีพิกัดอ้างอิงในแนวราบไม่เกิน 1 เมตร และในช่วงทางโค้งหรือในภาพขยายที่จุด B-E มีค่าความผิดพลาดจากรัศมีพิกัดอ้างอิงในแนวราบไม่เกิน 1.5 เมตร และจากผลการวิเคราะห์ในด้านความเที่ยงตรงพบว่า ข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากการทำซ้ำเดิมจะมีค่าความผิดพลาดจากรัศมีพิกัดอ้างอิงที่ไม่เกิน 0.3 เมตร ซึ่งแสดงด้วยวงกลมเส้นทึบสีแดง

ลำดับถัดมา ผู้วิจัยวิเคราะห์ความแม่นยำของข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยจากรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M ที่ใช้กับหน่วยนำทางอัตโนมัติ อาคูไฟลีสต เมกะ โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ และข้อมูลกลุ่มตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่ สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และส่วนขยายในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากเซนเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M กับข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ และข้อมูลพิกัดตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) จำนวน 6 กลุ่มตำแหน่ง



รูปที่ 4.19 ภาพขยายของผลการเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยจากรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M (จุดสีเหลืองและสีเขียว) กับข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ ที่เดินในลู่วิ่ง (จุดสีแดง) และข้อมูลพิกัดตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่ สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) จำนวน 6 กลุ่มตำแหน่ง ที่มีวงรัศมีจากพิกัดอ้างอิงเท่ากับ 1 เมตร (วงกลมเส้นทึบสีดำ) และ 1.5 เมตร (วงกลมเส้นประสีเทา) และ 2 เมตร (วงกลมเส้นประ-จุดสีเทา)

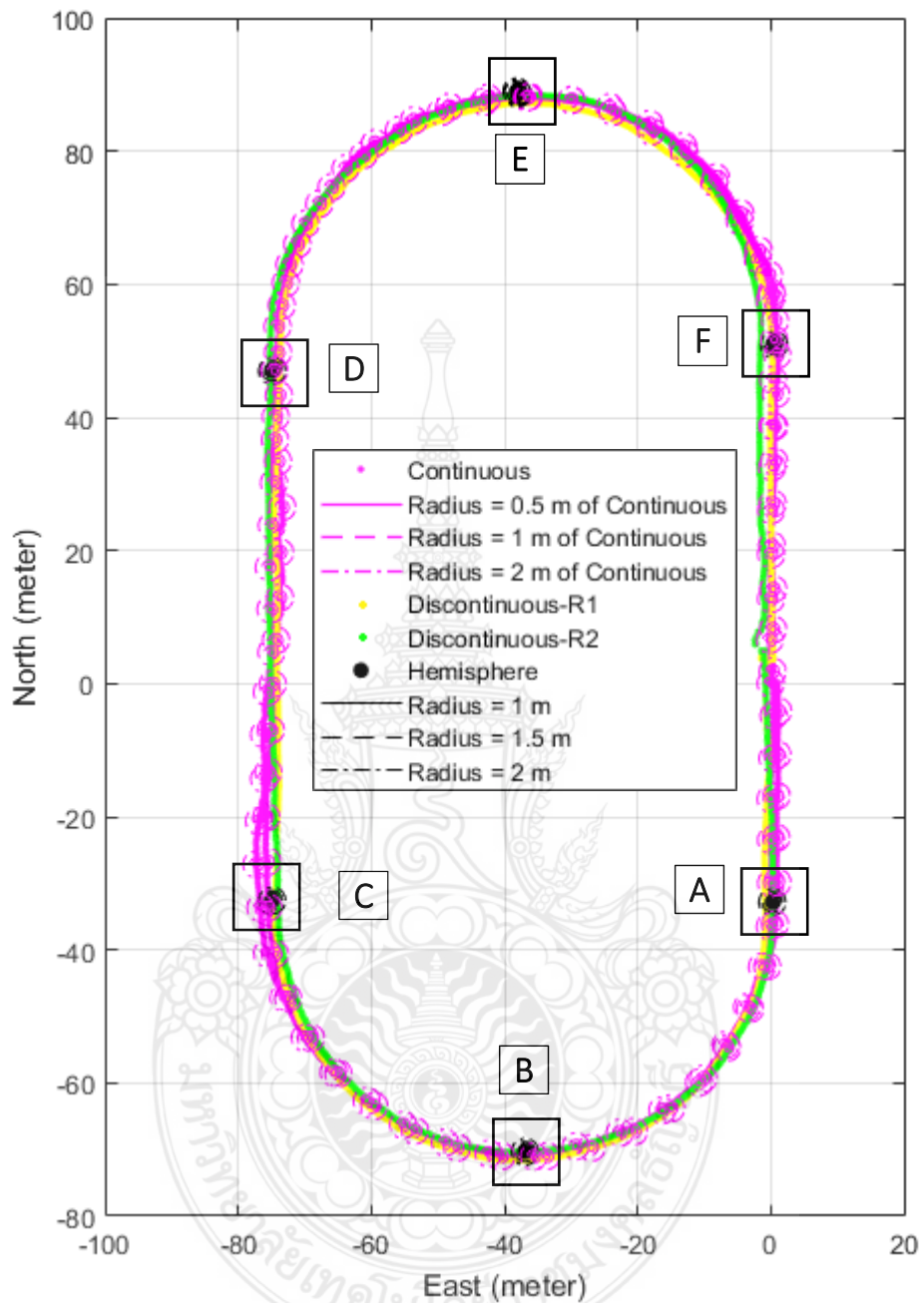
จากรูปที่ 4.18 และ ส่วนขยายในรูปที่ 4.19 ผลการตรวจวัดค่าความแม่นยำของข้อมูลพิกัดตำแหน่งในการเคลื่อนที่หรือเดินเก็บข้อมูลบนเส้นแบ่งลู่วิ่ง r2 และ R2 จำนวน 2 รอบ ด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M เปรียบเทียบกับข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ และเปรียบเทียบกับข้อมูลพิกัดตำแหน่งแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) จำนวน 6 กลุ่มตำแหน่ง พบว่า ค่าความแม่นยำของพิกัดตำแหน่งจากการตรวจวัดด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M มีค่าความผิดพลาดรัศมีในแนวราบ 2 เมตร ดังรูปรูปที่ 4.19 ในส่วนภาพขยายที่จุด F ดังนั้น ผลการทดลองพบว่าตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M มีความแม่นยำต่ำกว่าการระบุพิกัดตำแหน่งจากเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™

และในส่วนผลการวิเคราะห์ด้านความเที่ยงตรงในการระบุพิกัดตำแหน่งจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.20 โดยผู้วิจัยทำการทดลองเคลื่อนที่หรือเดินเก็บข้อมูลแบบซ้ำเดิมบนเส้นแบ่งลู่วิ่ง R2 และ r2 จำนวน 2 รอบสนามแบบต่อเนื่อง และเปรียบเทียบกับข้อมูลพิกัดตำแหน่งในการทดลองด้านค่าความแม่นยำซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบไม่ต่อเนื่องครั้งละ 1 รอบสนาม จำนวน 2 ครั้ง จากผลการทดลองในรูปที่ 4.20 พบว่าความเที่ยงตรงจากการระบุตำแหน่งด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M มีค่าความผิดพลาดสูงสุดของรัศมีในแนวราบที่น้อยกว่า 2 เมตรซึ่งแสดงในส่วนภาพขยายที่จุด F ในรูปที่ 4.21

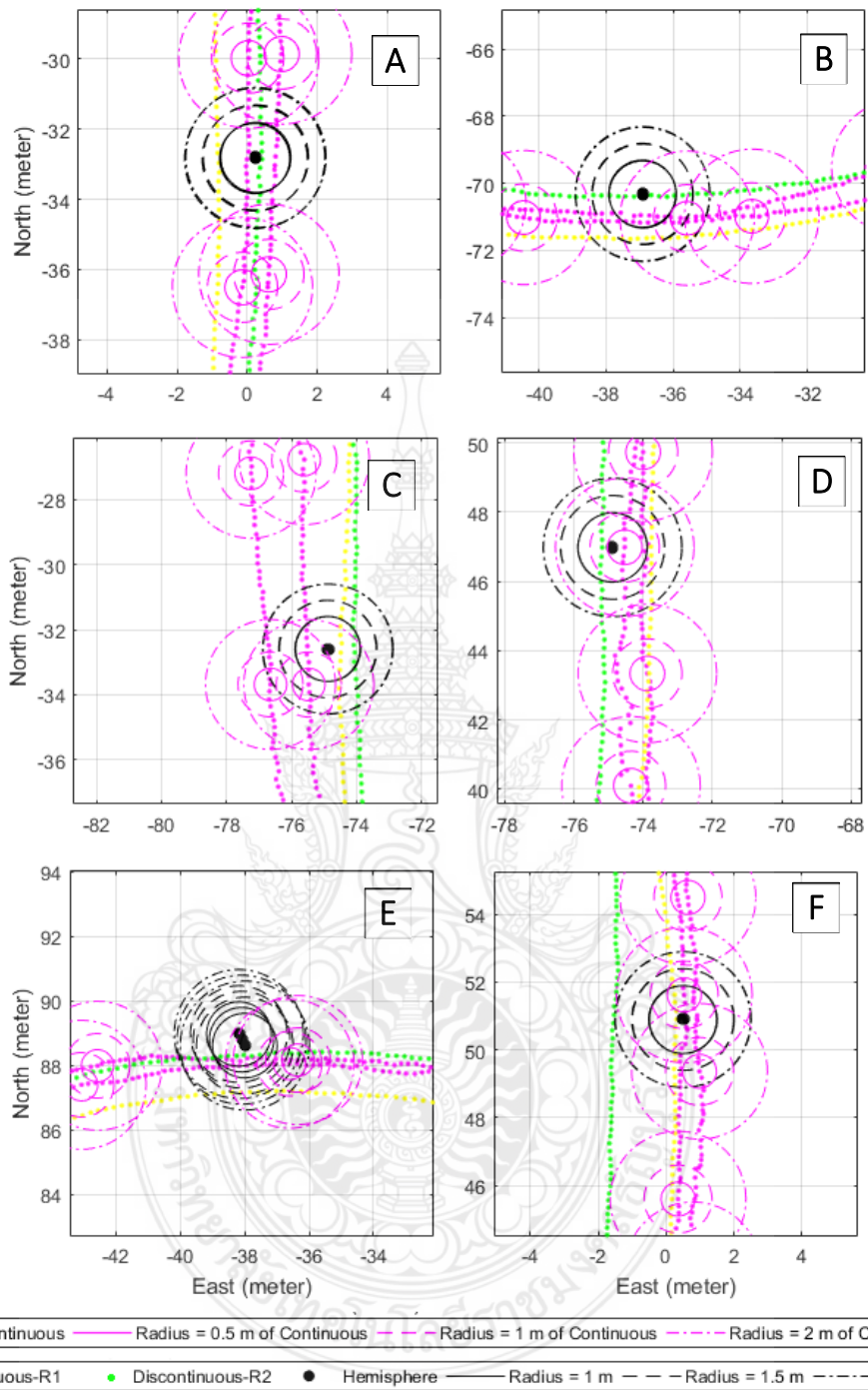
ดังนั้น จากการทดลองในด้านความแม่นยำและความเที่ยงตรงในการระบุพิกัดตำแหน่งจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M ที่ใช้กับหน่วยนำทางแบบอัตโนมัติ อาดูไฟลีดอต เมกะที่จะทำการติดตั้งในหุ่นยนต์ทั้งหมดในงานวิจัยนี้ หุ่นยนต์จะมีความสามารถในการติดตามเส้นทางและสามารถเข้าถึงพิกัดเป้าหมาย โดยที่มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลพิกัดตำแหน่งเป้าหมายภายในรัศมีแนวราบไม่เกิน 2 เมตร

ตารางที่ 4.9 สรุปผลความแม่นยำและความเที่ยงตรงจากการทดลองตัวรับสัญญาณจีพีเอสแต่ละชนิด

	Hemisphere รุ่น S321 ชนิด สองความถี่สำหรับสถานี เคลื่อนที่ (Rover)	เซนเซอร์ที่ใช้วัดความเอียง LORD MicroStrain รุ่น 3DM-GX3-45™	Ublox รุ่น NEO-6M ที่ใช้กับ หน่วยนำทางอัตโนมัติ อาดู ไฟลีดอต เมกะ
1. ความแม่นยำ	-	ไม่เกิน 1.5 เมตร	ไม่เกิน 2 เมตร
2. ความเที่ยงตรง	ไม่เกิน 0.05 เมตร	ไม่เกิน 0.3 เมตร	ต่อเนื่อง - ไม่เกิน 1 เมตร ไม่ต่อเนื่อง - ไม่เกิน 2 เมตร



รูปที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบความเที่ยงตรงของข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยจากรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M ในการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องกับพิกัดตำแหน่งอ้างอิงแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่ สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) จำนวน 6 กลุ่มตำแหน่ง

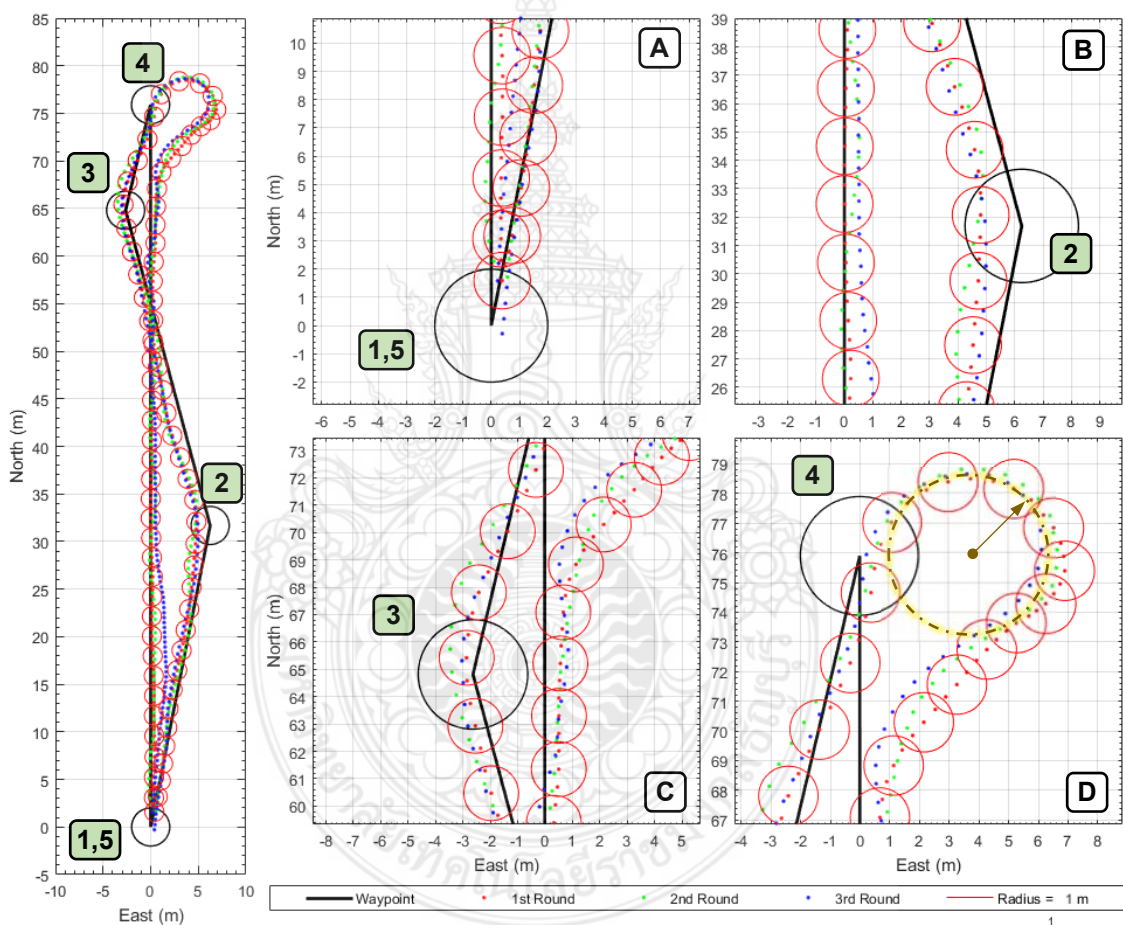


รูปที่ 4.21 ส่วนขยายของผลการเปรียบเทียบความเที่ยงตรงของข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยจากรับสัญญาณจีพีเอสของ Ublox รุ่น NEO-6M ในการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง (แนวจุดสีเหลืองและสีเขียว) และไม่ต่อเนื่อง (แนวจุดสีชมพู) กับพิกัดตำแหน่งอ้างอิงแบบจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่ สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) จำนวน 6 กลุ่มตำแหน่ง ที่มีวงรัศมีจากพิกัดอ้างอิงเท่ากับ 1 เมตร (วงกลมเส้นทึบสีดำ) และ 1.5 เมตร (วงกลมเส้นประสีเทา) และ 2 เมตร (วงกลมเส้นประ-จุดสีเทา)



4.2.2 ผลการทดลองความสามารถทำซ้ำเดิมของจากการใช้หน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติอากาศยานไร้คนขับ ด้วยหุ่นยนต์รถสี่ล้อ

หน่วยนำทางอัตโนมัติ อากาศไร้คนขับ เมกะ ที่ติดตั้งเข้ากับรถสี่ล้อที่มีข้อจำกัดด้านมุมเลี้ยวสูงสุดของล้อหน้า 45 องศา และกำหนดให้รัศมีเป้าหมายเท่ากับ 2 เมตร โดยที่ผู้วิจัยพิจารณาค่าความเที่ยงตรงตำแหน่งพิกัดหุ่นยนต์รถสี่ล้อของแต่ละการทดลองอ้างอิงกับการทดลองที่ 1 (จุดสีแดง) และรั้ววงรัศมี 1 เมตร (เส้นสีแดง) ในการอภิปรายผลการทดลองความสามารถทำซ้ำเดิม 3 ครั้ง ด้วยระบบเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติดังรูปที่ 4.22 สามารถแบ่งตามกรณีศึกษาได้ดังนี้



รูปที่ 4.22 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรซ้ำเดิมของหุ่นยนต์รถสี่ล้อและส่วนขยายในแต่ละกรณีศึกษา

จากรูปที่ 4.22 ในช่วงเริ่มต้น ผู้วิจัยวางหุ่นยนต์รถสี่ล้อวางตัวตามแนวทิศเหนือ (หรือตามแนวแกน North) ที่พิกัดตำแหน่ง [0,0] หุ่นยนต์รถสี่ล้อจะเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่ออกจากรัศมีเป้าหมายที่ 1 ที่ และเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบตรงไปที่เป้าหมายที่ 2 โดยแสดงในส่วนขยาย A

กรณีศึกษาที่ 1 : ขณะที่หุ่นยนต์รถสี่ล้อเข้าสู่รัศมีเป้าหมายที่ 2 ซึ่งแสดงในส่วนขยาย B ระยะเวลาการนำทางจะเปลี่ยนการติดตามเส้นวิถีโคจรในช่วงเป้าหมาย 1-2 ไปติดตามเส้นวิถีโคจรในช่วงเป้าหมาย 2-3 ที่ทำมุมต่างกัน 30 องศา จากการทดลองในส่วนความสามารถในการทำซ้ำเดิมพบว่า พิกัดตำแหน่งจากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่ารัศมีอ้างอิง 1 เมตร หุ่นยนต์สามารถบังคับเลี้ยวติดตามเส้นวิถีโคจรได้คล้ายคลึงกันได้ทั้ง 3 ครั้ง เพราะข้อจำกัดของมุมเลี้ยวที่ล้อหน้ามีค่ามากกว่ามุมหันเห 15 องศา จึงทำให้สามารถติดตามเส้นวิถีโคจรได้อย่างราบเรียบ

กรณีศึกษาที่ 2 : ขณะที่หุ่นยนต์รถสี่ล้อเข้าสู่รัศมีเป้าหมายที่ 3 ซึ่งแสดงในส่วนขยาย C ระยะเวลาการนำทางจะเปลี่ยนการติดตามเส้นวิถีโคจรในช่วงเป้าหมาย 2-3 ไปติดตามเส้นวิถีโคจรในช่วงเป้าหมาย 3-4 ที่ทำมุมต่างกัน 45 องศา ซึ่งมีค่าเท่ากับข้อจำกัดของมุมเลี้ยวที่ล้อหน้า จากการทดลองในส่วนความสามารถในการทำซ้ำเดิมพบว่า พิกัดตำแหน่งจากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่ารัศมีอ้างอิง 1 เมตร หุ่นยนต์สามารถบังคับเลี้ยวติดตามเส้นวิถีโคจรได้คล้ายคลึงกันได้ทั้ง 3 ครั้ง เช่นเดียวกับการทดลองในกรณีก่อนหน้า

กรณีศึกษาที่ 3 : ขณะที่หุ่นยนต์รถสี่ล้อเข้าสู่รัศมีเป้าหมายที่ 4 ซึ่งแสดงในส่วนขยาย D ระยะเวลาการนำทางจะเปลี่ยนการติดตามเส้นวิถีโคจรในช่วงเป้าหมาย 3-4 ไปติดตามเส้นวิถีโคจรในช่วงเป้าหมาย 4-5 ที่ทำมุมกลับ 158 องศา หรือมากกว่าข้อจำกัดด้านมุมบังคับเลี้ยวล้อหน้า 113 องศา ส่งผลให้หุ่นยนต์รถสี่ล้อหักเลี้ยวก่อนที่พุ่งเข้าหาเป้าหมายที่ 3 ไปในทิศทางสูงสุด 45 องศาที่มีรัศมีวงเลี้ยวเท่ากับ 2.85 เมตรซึ่งแสดงด้วยเส้นประสีเหลืองในรูปที่ 4.22 และสามารถลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรได้ในลักษณะเดียวกันทั้ง 3 การทดลอง และในการวิเคราะห์ความสามารถในการทำซ้ำเดิมพบว่า พิกัดตำแหน่งจากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับรัศมีอ้างอิง 1 เมตร

ในส่วนสุดท้าย หลังจากที่หุ่นยนต์รถสี่ล้อสามารถเลี้ยวหักกลับได้สำเร็จ หุ่นยนต์จะติดตามเส้นวิถีโคจรแบบตรงในช่วงเป้าหมาย 4-5 เพื่อกลับมาในตำแหน่งเริ่มต้น จากการทดลองครั้งที่ 1 (จุดสีแดง) และ 2 (จุดสีเขียว) สามารถติดตามเส้นวิถีโคจรโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินรัศมีอ้างอิง 1 เมตร แต่ในการทดลองครั้งที่ 3 พบว่าหุ่นยนต์รถสี่ล้อมีพฤติกรรมออกนอกเส้นวิถีโคจรในช่วงท้าย ซึ่งเป็นผลจากความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งพิกัดด้วยดาวเทียมซึ่งเป็นปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้น ในการทดลองหุ่นยนต์อัตโนมัติจึงจำเป็นต้องทำการทดลองซ้ำๆหลายครั้ง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจร

#### 4.2.3 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติ

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบในการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนดแบบอัตโนมัติ ในหัวข้อนี้ ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปร 3 ตัว คือ ระยะเวลาขจัด  $L_1$ , ค่าอัตราส่วนความหน่วง ( $\xi$ ) และค่าอัตราขยายการบังคับเลี้ยว  $K_{ps}$  ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็ก ในการทดลอง ผู้วิจัยออกแบบให้เส้นวิถีโคจรเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยการกำหนดจุดพิกัดเป้าหมาย 5 จุด โดยเริ่มต้นจากจุดที่ 1 และสิ้นสุดเมื่อเข้ารัศมีเป้าหมายที่ 5 ซึ่งเป็นจุดเดียวกันกับจุดเป้าหมายที่ 1 ในส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลในด้านค่าเฉลี่ยความผิดพลาดระยะขจัดจากเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองหุ่นไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก ( $\bar{d}$ ) และค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดสูงสุดของระยะขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ  $\overline{\max(d)}$ ) ดังแสดงในสมการที่ (4.1) และ (4.2)

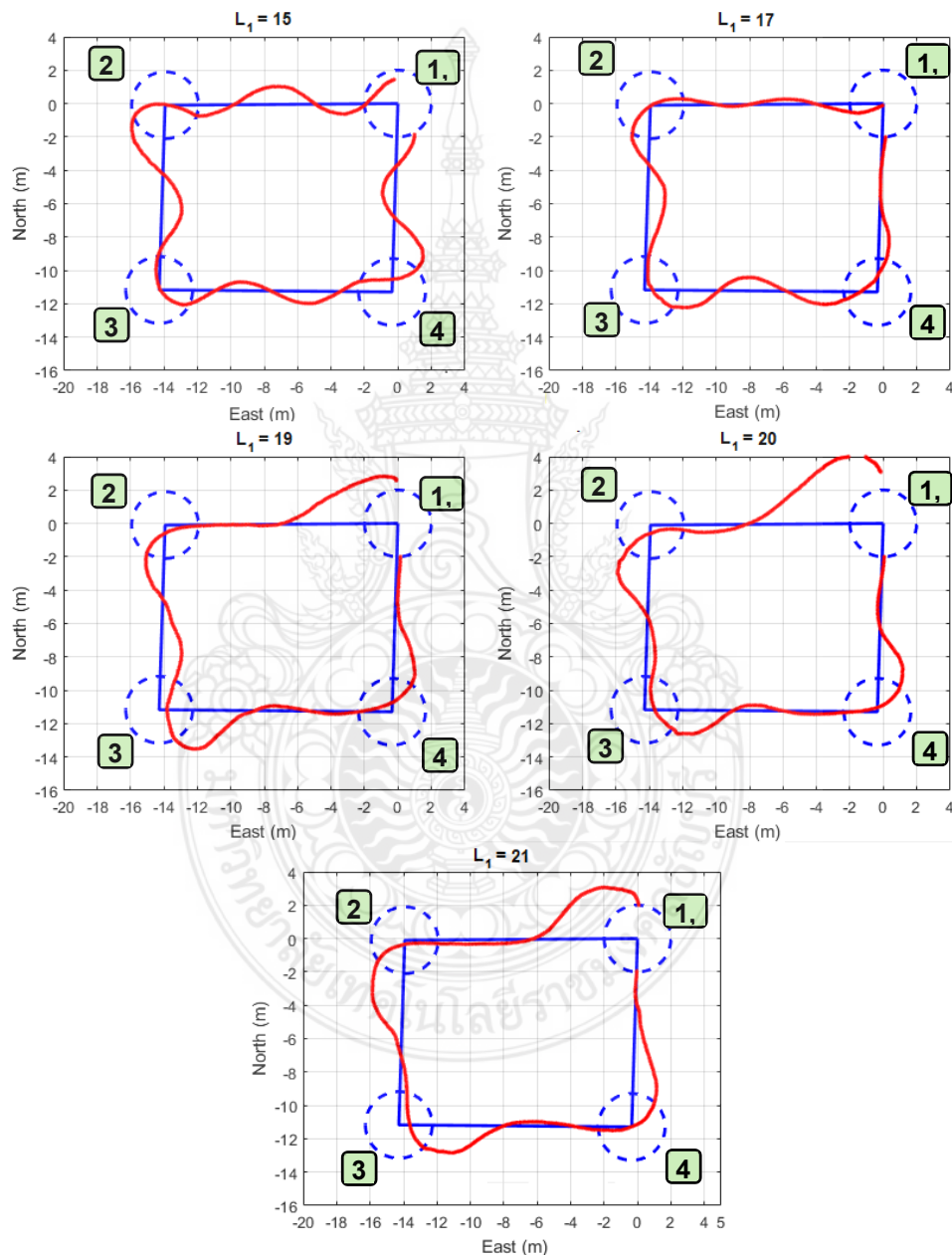
$$\bar{d}_i = \left( \sum_{j=2}^4 |GPS_{ij}(x, y) - WP\_CMD_{ij}(x, y)| \right) / 3 \quad (4.1)$$

$$\overline{\max(d)}_i = \left( \sum_{j=2}^4 \max(GPS_{ij}(x, y) - WP\_CMD_{ij}(x, y)) \right) / 3 \quad (4.2)$$

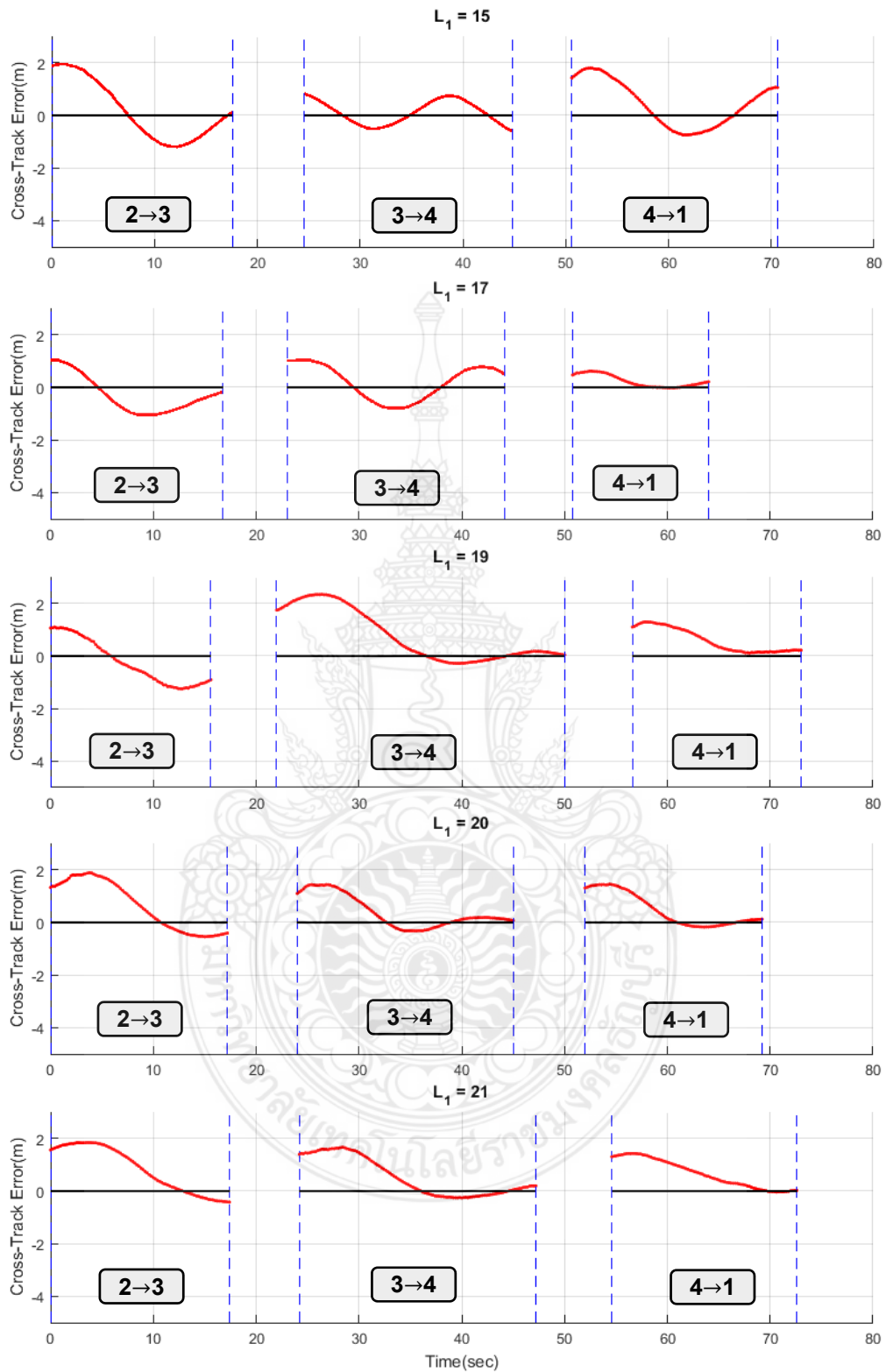
โดยเริ่มพิจารณาหลังจากหุ่นยนต์ออกจากรัศมีของจุดเป้าหมายที่ 2 และสิ้นสุดการพิจารณาเมื่อหุ่นยนต์เข้ารัศมีของเป้าหมายถัดไปจนกระทั่งหุ่นยนต์กลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นหรือเป้าหมายที่ 5 จึงถือว่าสิ้นสุดการทดลอง 1 ครั้ง ดังนั้น ส่วนที่ใช้พิจารณาวิเคราะห์ผลการทดลองมี 3 ส่วน ได้แก่ เส้นทางการเคลื่อนที่ของเรือระหว่างรัศมีเป้าหมายที่ 2-3, เส้นทางการเคลื่อนที่ของเรือระหว่างรัศมีเป้าหมายที่ 3-4, เส้นทางการเคลื่อนที่ของเรือระหว่างรัศมีเป้าหมายที่ 4-1 (หรือ 4-5) โดยไม่พิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของเรือระหว่างรัศมีเป้าหมายที่ 1 และ 2 เนื่องจากไม่สามารถกำหนดมุมหันเหเริ่มต้นของเรือที่เท่ากันในทุกๆ การทดลองได้ นอกจากนั้น ผู้วิจัยพบว่าบอร์ด อาคูไฟลีดอต เมกะสามารถบันทึกข้อมูลการทดลองการวิ่งเรือแบบอัตโนมัติได้น้อยกว่า 2 รอบ ซึ่งเป็นข้อจำกัดด้านหน่วยความจำภายใน (ROM) ของหน่วยนำทางอัตโนมัติ อาคูไฟลีดอต เมกะ ดังนั้นในการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของข้อมูลการทดลองแบบอัตโนมัติ นั้นจะคำนวณจากการวิ่งเรืออัตโนมัติ 1 รอบ นั้นเป็นที่ได้เก็บข้อมูลหลังจากทดลองวิ่งอัตโนมัติซ้ำเดิมอย่างต่อเนื่องมากกว่า 5 ครั้ง แล้วจึงทำการบันทึกผลการทดลอง ซึ่งจะช่วยให้ข้อมูลมีความแม่นยำในการทำซ้ำเดิมได้ดี

#### 4.2.3.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าระยะการจัด $L_1$

เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ค่าระยะการจัด ( $L_1$ ) ที่มีผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของยานพาหนะแบบอัตโนมัติ จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.23 ซึ่งแสดงพฤติกรรมจริงจากการติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อนเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าระยะการจัด  $L_1$  ระหว่าง 15 ถึง 21 ดังต่อไปนี้

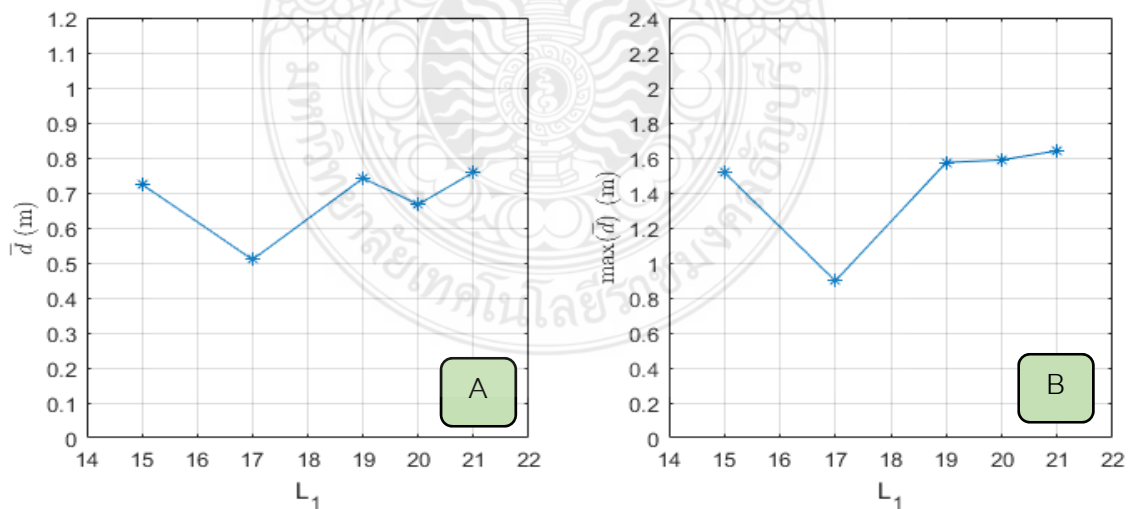


รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบพฤติกรรมจริงในการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อน ในระบบพิกัด UTM ที่มีหน่วยเป็นเมตร เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าระยะการจัด  $L_1$  ในระบบควบคุมการแบบ  $L_1$



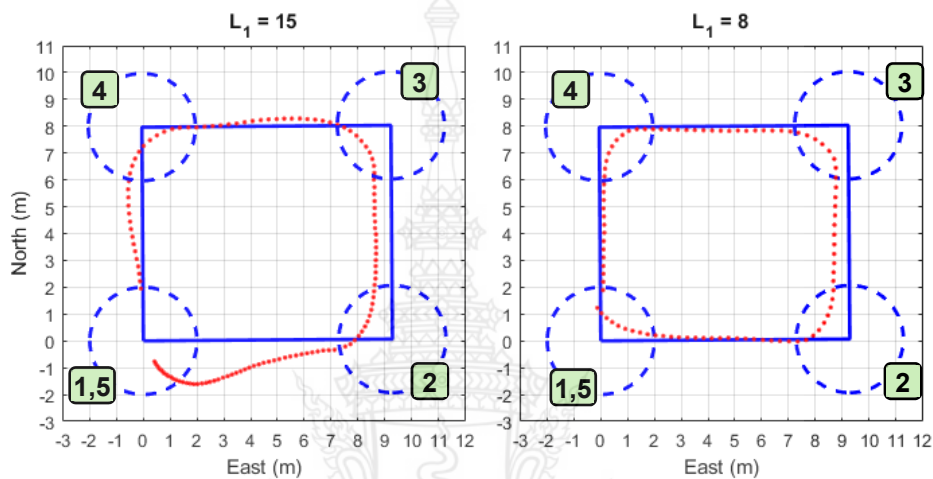
รูปที่ 4.24 ผลแสดงการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากหุ่นยนต์เรือสองท่อนไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (Cross-Track Error หรือแทนด้วย  $d$ ) ในระหว่างการเคลื่อนที่ ในช่วงเป้าหมายที่ 2-3, 3-4 และ 4-1 เพื่อศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงค่าระยะขจัด  $L_1$  ซึ่งเวลาเมื่อ  $\zeta = 0.8$ ,  $K_{ps} = 1$  คงที่

จากรูปที่ 4.23 แสดงพฤติกรรมการติดตามเส้นวิถี โคจรแบบเส้นตรงที่เชื่อมต่อสู่จุดพิคก์ที่กำหนดแบบอัตโนมัติของเรือแบบสองท่อน ในการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดระยะขจัดได้ทำการปรับรูปแบบการแสดงผลของเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบอัตโนมัติ ในรูปที่ 4.23 ให้เป็นรูป 4.24 โดยเส้นวิถี โคจรเชื่อมระหว่างจุดเป้าหมายที่กำหนด แสดงด้วยเส้นตรงสีดำ และเส้นทางการเคลื่อนที่ของเมื่ออยู่นอกวงกลมรัศมีระบุจุดพิคก์เป้าหมายที่แสดงด้วยเส้นสีแดง ค่าความผิดพลาดระยะขจัดในแนวตั้งฉาก ( $d$ ) ที่มีผลตอบสนองเชิงเวลาของเรือ ในรูปแบบของระบบอันดับสองที่เป็นแบบความหน่วงขาด (Underdamped response) จากรูปที่ 4.24 เมื่อเพิ่มค่าระยะการขจัดของ  $L_1$  จาก 15 เป็น 17 แสดงให้เห็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือจะลู่เข้าหาเส้นตรงที่เชื่อมต่อจุดพิคก์ที่กำหนดที่ราบเรียบมากขึ้น และเมื่อผู้วิจัยทดลองเพิ่มค่าระยะการขจัดของ  $L_1$  มากกว่า 17 จนถึง 21 พบว่าหุ่นยนต์เรือสามารถติดตามเส้นได้อย่างราบเรียบขึ้น แต่การลู่เข้าหาเส้นวิถี โคจรล่าช้าลง จากการวิเคราะห์ในด้านค่าเฉลี่ยความผิดพลาดระยะขจัดจากเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองท่อน ไปยังเส้นวิถี โคจรในแนวตั้งฉาก ( $\bar{d}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.25 (A) พบว่าพฤติกรรมเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นที่ราบเรียบและลู่เข้าหาเส้นวิถี โคจรได้อย่างรวดเร็วซึ่งจะช่วยให้ค่า  $\bar{d}$  ลดลงต่ำสุด เมื่อ  $L_1 = 17$  และค่า  $\bar{d}$  จะเพิ่มขึ้นจากพฤติกรรมที่ลู่เข้าหาเส้นวิถี โคจรได้ล่าช้าจากการเพิ่มค่า  $L_1$  ให้มากกว่า 17 และในส่วนของวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากยานพาหนะ ไปยังเส้นวิถี โคจรในแนวตั้งฉากที่สูงสุด (หรือ  $\max(d)$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.25 (B) พบว่าผลกระทบของการเปลี่ยนค่า  $L_1$  มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า  $\bar{d}$  ซึ่งการเพิ่มมากขึ้นของค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากยานพาหนะ ไปยังเส้นวิถี โคจรในแนวตั้งฉากที่สูงสุด จะเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อให้ค่า  $\bar{d}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

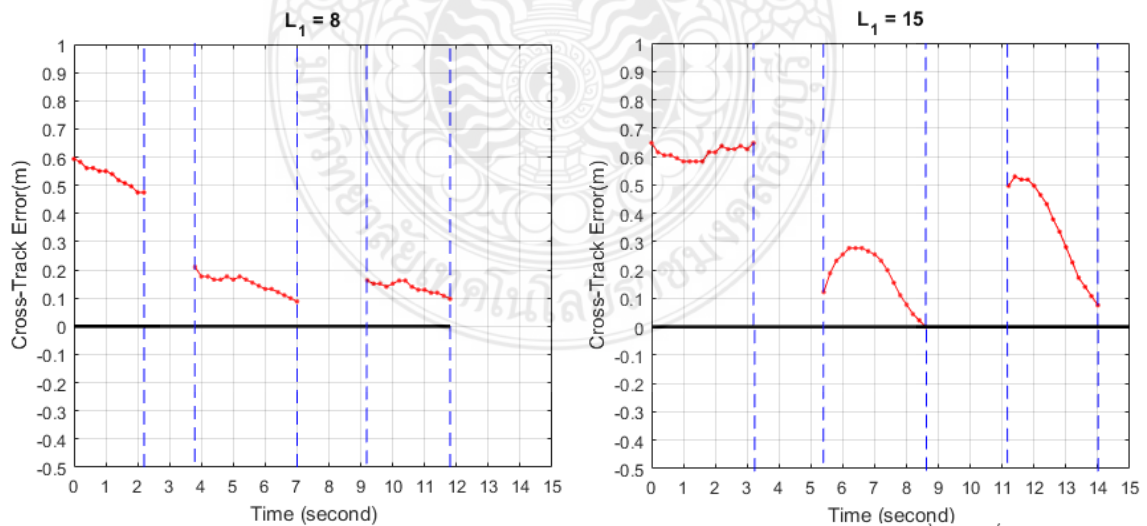


รูปที่ 4.25 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงค่าระยะการขจัด  $L_1$  ในการเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นวิถีโคจรของเรือสองท่อนแบบอัตโนมัติ ที่มีต่อ A)  $\bar{d}$  และ B)  $\bar{d}_{\max}$  เมื่อ  $L_1 = [17, 19, 20, 21]$  และ  $\zeta = 0.8$ ,  $K_{ps} = 1$  คงที่

เส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์รถแบบสี่ล้อแบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ  $L_1$  ที่มีผลตอบสนองเชิงเวลาของเรือ ในรูปแบบของระบบอันดับสองที่เป็นแบบความหน่วงเกิน เมื่อใช้พารามิเตอร์เดียวกัน คือ  $L_1 = 15$ ,  $\zeta = 0.8$  และ  $K_{ps} = 1$  แสดงในรูปที่ 4.26 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงของเรือแบบสองท่อนกับหุ่นยนต์รถแบบสี่ล้อที่แตกต่างกัน อันเนื่องมาจากพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ทั้งสองรูปแบบ

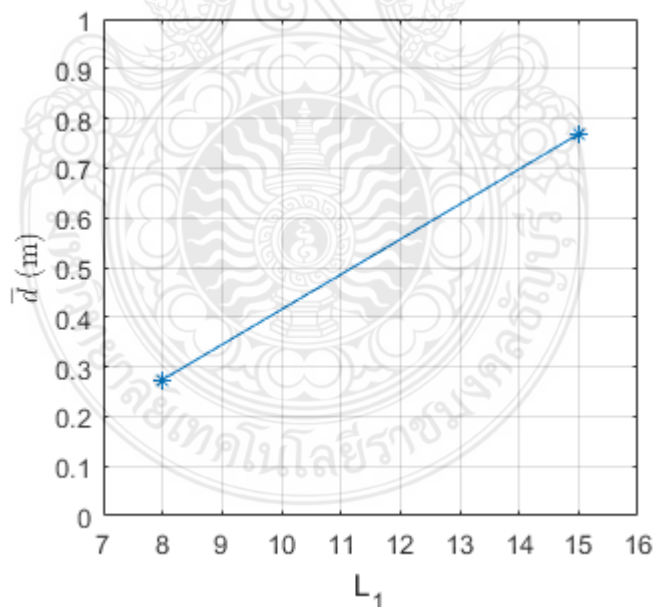


รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบพฤติกรรมจริงในการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์รถสี่ล้อ ในระบบพิกัด UTM ที่มีหน่วยเป็นเมตร เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าระยะขจัด  $L_1 = [8, 15]$  และ เมื่อ  $\zeta = 0.8$  และ  $K_{ps} = 1$  เป็นค่าคงที่



รูปที่ 4.27 ผลแสดงการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากหุ่นยนต์รถสี่ล้อ ไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (Cross-Track Error หรือแทนด้วย  $d$ ) ในระหว่างการเคลื่อนที่ ในช่วงเป้าหมายที่ 2-3, 3-4 และ 4-1 เพื่อศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงค่าระยะขจัด  $L_1$  ในรูปแบบเชิงเวลา

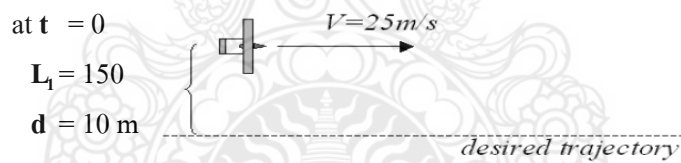
จากรูปที่ 4.26 แสดงพฤติกรรมการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงที่เชื่อมต่อกับจุดพิกัดที่กำหนดแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์รถสี่ล้อ ในการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดระยะขจัดได้ทำการปรับรูปแบบการแสดงผลของเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองหุ่นแบบอัตโนมัติ ในรูปที่ 4.26 ให้เป็นรูป 4.27 โดยเส้นวิถีโคจรเชื่อมระหว่างจุดเป้าหมายที่กำหนด แสดงด้วยเส้นตรงสีดำ และเส้นทางการเคลื่อนที่ของเมื่อยูนอกวงกลมรัศมีระบุจุดพิกัดเป้าหมายที่แสดงด้วยเส้นสีแดง ค่าความผิดพลาดระยะขจัดในแนวตั้งฉาก ( $d$ ) ที่มีผลตอบสนองเชิงเวลาของหุ่นยนต์รถสี่ล้อเป็นแบบความหน่วงเกิน (Overdamped response) เมื่อลดค่าระยะการขจัดของ  $L_1$  จาก 15 ลดลงเหลือ 8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแบบสี่ล้อจะลู่เข้าหาเส้นตรงที่เชื่อมต่อกับจุดพิกัดที่กำหนดได้รวดเร็วขึ้นหรือสามารถติดตามเส้นทางที่กำหนดได้ดีขึ้น ซึ่งจะสามารถสังเกตได้จากสมการที่ (2.37) เมื่อลดค่า  $L_1$  จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_n$ ) หรือ ความถี่ในการแกว่งของผลตอบสนองของเส้นทางการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้หุ่นยนต์รถสี่ล้อสามารถลู่เข้าหาเส้นตรงที่กำหนดได้รวดเร็วขึ้นและช่วยลดค่า  $\bar{d}$  ลงได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.28 แต่ถ้าวัดค่า  $L_1$  มากจนเกินไปจะส่งผลให้ค่า  $\bar{d}$  นั้นกลับมาเพิ่มขึ้นได้อีกเช่นกัน



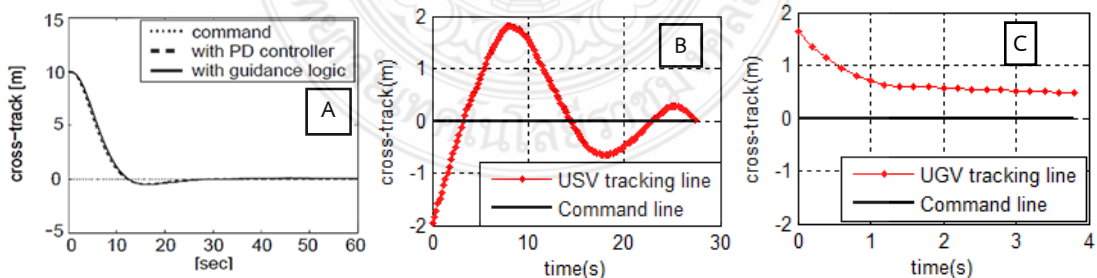
รูปที่ 4.28 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงค่าระยะการขจัด  $L_1$  ในการเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์รถสี่ล้อแบบอัตโนมัติ ที่มีต่อ  $\bar{d}$  เมื่อ  $L_1 = [8, 15]$  และ  $\zeta = 0.8$  และ  $K_{ps} = 1$  เป็นค่าคงที่



ดังนั้น จากการพิจารณาเปรียบเทียบพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงแบบอัตโนมัติที่แตกต่างกันของหุ่นยนต์ทั้งสองรูปแบบทำให้สามารถสรุปได้ว่า เมื่อใช้ค่า  $L_1 = 15$  ที่เท่ากันพบว่าหุ่นยนต์รถมีพฤติกรรมติดตามเส้นที่ราบเรียบกว่าหุ่นยนต์เรือสองท่อน เนื่องจากล้อของหุ่นยนต์รถไม่มีการลื่นไถลไปบนพื้นผิวถนน ทำให้หุ่นยนต์รถตอบสนองได้ไวเมื่อบังคับเลี้ยว มุมหันเหติดตามเส้นวิถีโคจร และเมื่อพิจารณาผลกระทบจากค่า  $L_1$  ที่มีผลต่อพฤติกรรมของหุ่นยนต์ทั้งสองประเภทที่มีความแตกต่างกันของพลศาสตร์ โดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาในงานวิจัยอ้างอิงที่ [3] ซึ่งอภิปรายทฤษฎีการควบคุมติดตามเส้นวิถีโคจรด้วยตัวควบคุม  $L_1$  และทำการศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบตรงด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับ โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 4.29 ผลการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับในทางทฤษฎีสอดคล้องและเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับผลการทดลองของหุ่นยนต์รถสี่ล้อและของหุ่นยนต์เรือสองท่อนในงานวิจัยนี้ และค่า  $L_1$  ที่เหมาะสมกับยานพาหนะแต่ละประเภทจะแตกต่างกันได้ซึ่งเป็นผลมาจากข้อจำกัดทางกายภาพและทางพลศาสตร์ของยานพาหนะชนิดนั้นๆ ดังการเปรียบเทียบพฤติกรรมเคลื่อนที่เข้าหาเส้นทางที่กำหนดที่แสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.29 เงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยอ้างอิง [3]

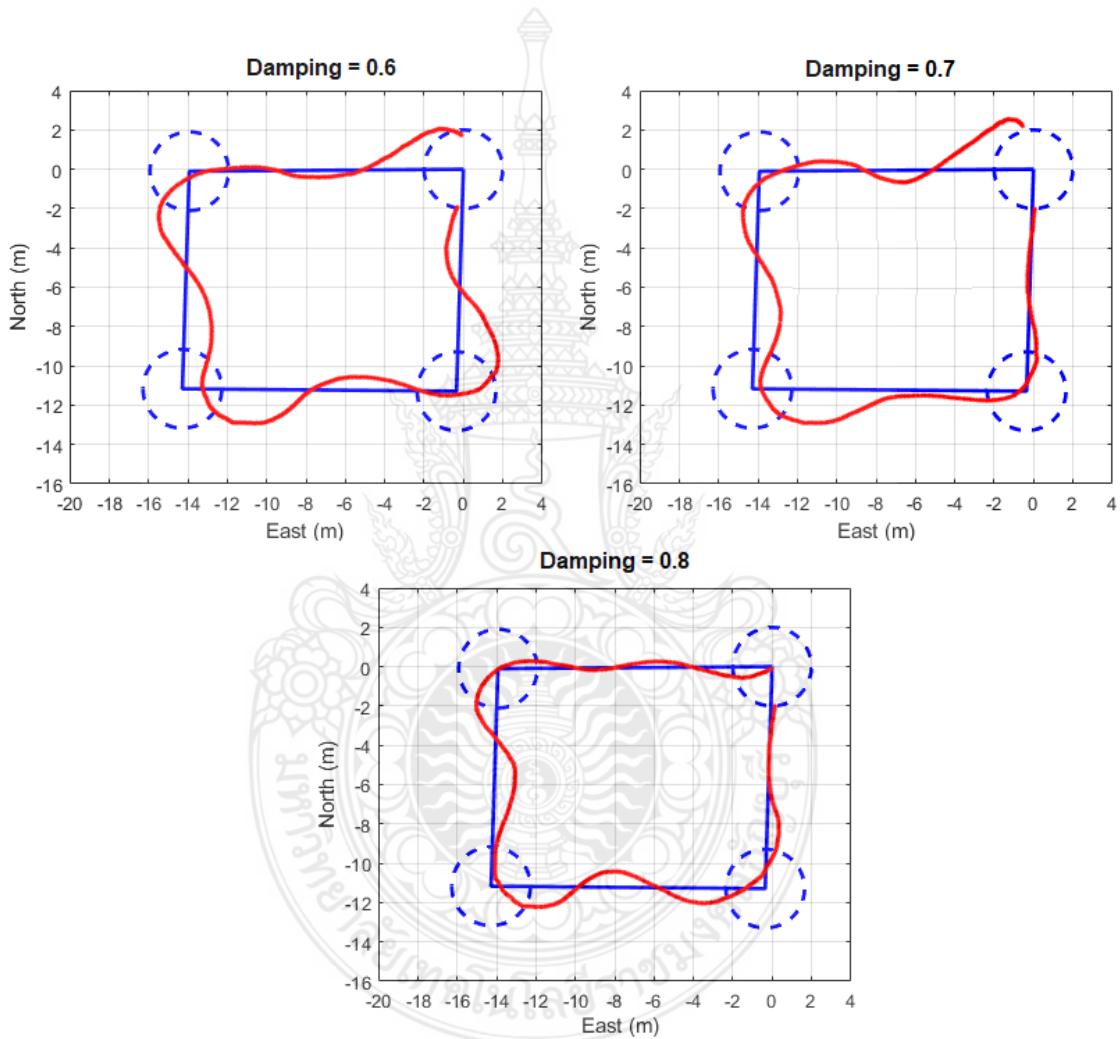


รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจร เมื่อ

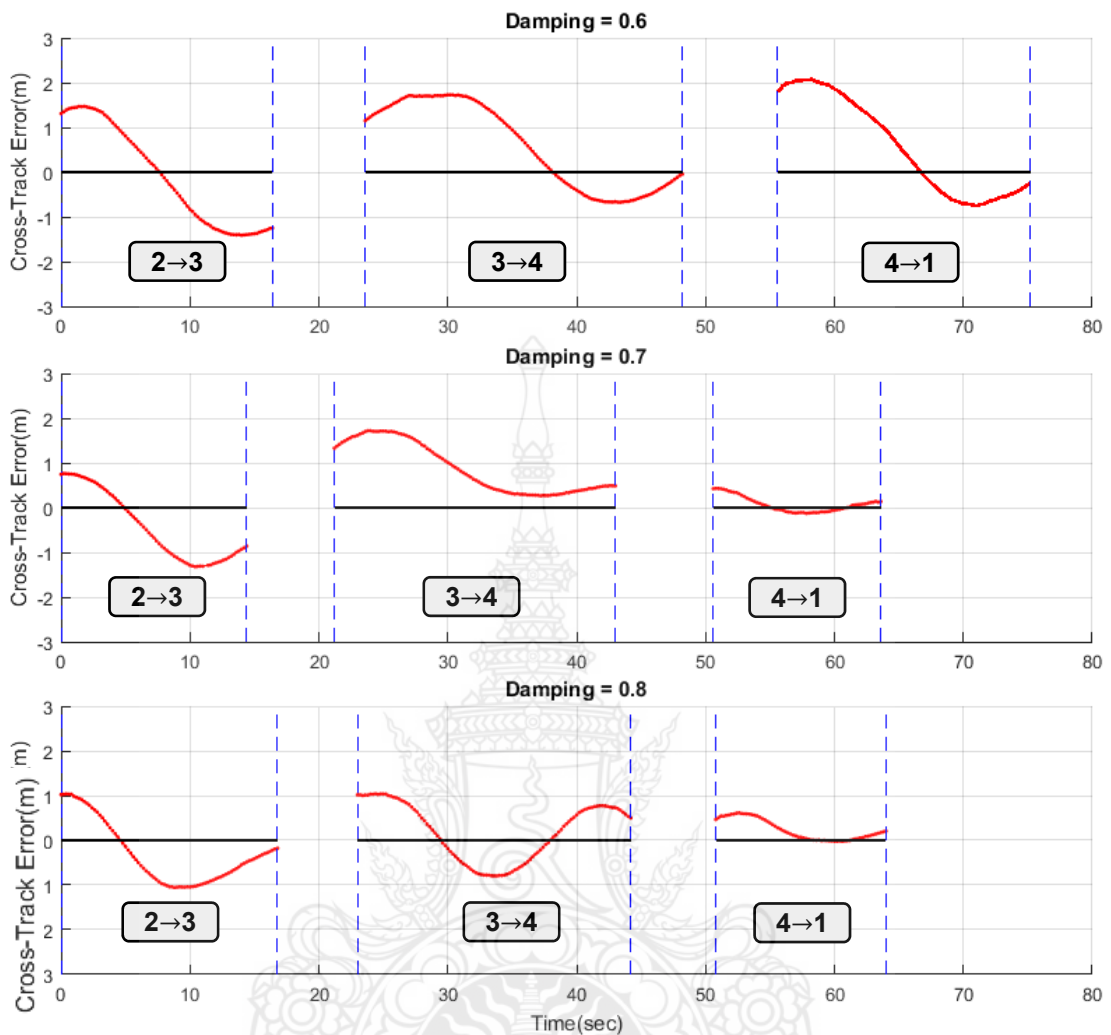
- A) ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยอ้างอิง [3]
- B) ผลการทดลองติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือสองท่อนและ
- C) ผลการทดลองติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์รถสี่ล้อ

#### 4.2.3.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio หรือ $\xi$ )

ในลำดับถัดมา ได้ทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio หรือ  $\xi$ ) ที่มีผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของยานพาหนะแบบอัตโนมัติ จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.31 ซึ่งแสดงพฤติกรรมจริงจากการติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความหน่วง ระหว่าง [0.6, 0.7, 0.8] ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบพฤติกรรมจริงในการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อนจาก ในระบบพิกัด UTM ที่มีหน่วยเป็นเมตร เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio หรือ  $\xi$ ) เมื่อ  $L_1 = 17$  และ  $K_{ps} = 1$  คงที่

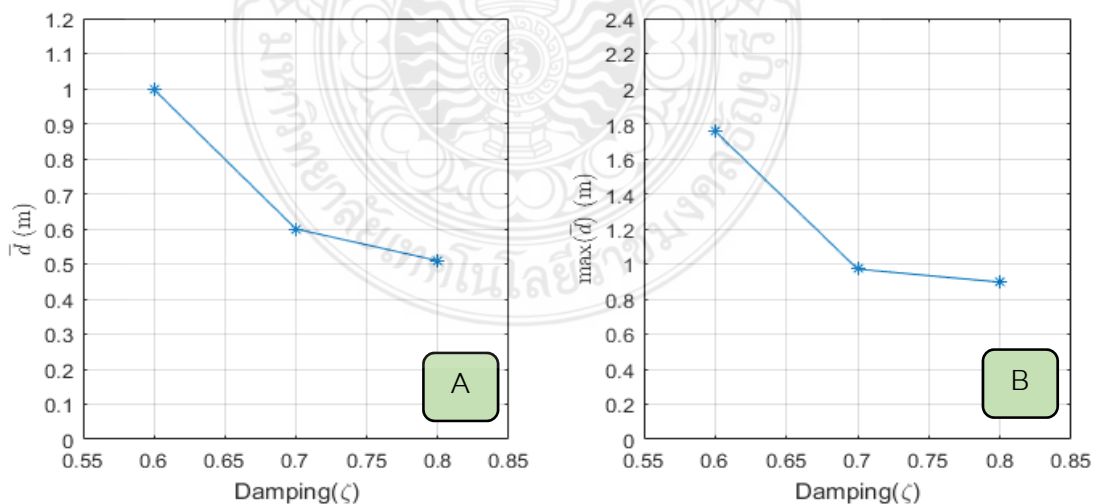


รูปที่ 4.32 ผลแสดงการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของระยะจัดจากหุ่นยนต์เรือสองท่อนไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (Cross-Track Error หรือแทนด้วย  $d$ ) ในระหว่างการเคลื่อนที่ ในช่วงเป้าหมายที่ 2-3, 3-4 และ 4-1 เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio หรือ  $\zeta$ ) ในโดเมนของเวลา

จากรูปที่ 4.32 แสดงพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงที่เชื่อมต่อกับจุดพิกัดที่กำหนดแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์เรือสองท่อน ในการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดระยะจัดได้ทำการปรับรูปแบบการแสดงผลของเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบอัตโนมัติ ในรูปที่ 4.32 ให้เป็นรูป 4.33 โดยเส้นวิถีโคจรเชื่อมระหว่างจุดเป้าหมายที่กำหนด แสดงด้วยเส้นตรงสีดำ และเส้นทางการเคลื่อนที่ของเมื่ออยู่นอกวงกลมรัศมีระบุจุดพิกัดเป้าหมายที่แสดงด้วย

เส้นสีแดง ค่าความผิดพลาดระยะขจัดในแนวตั้งฉาก ( $d$ ) ที่มีผลตอบสนองเชิงเวลาของหุ่นยนต์รถสี่ล้อ เป็นแบบความหน่วงเกิน (Overdamped response)

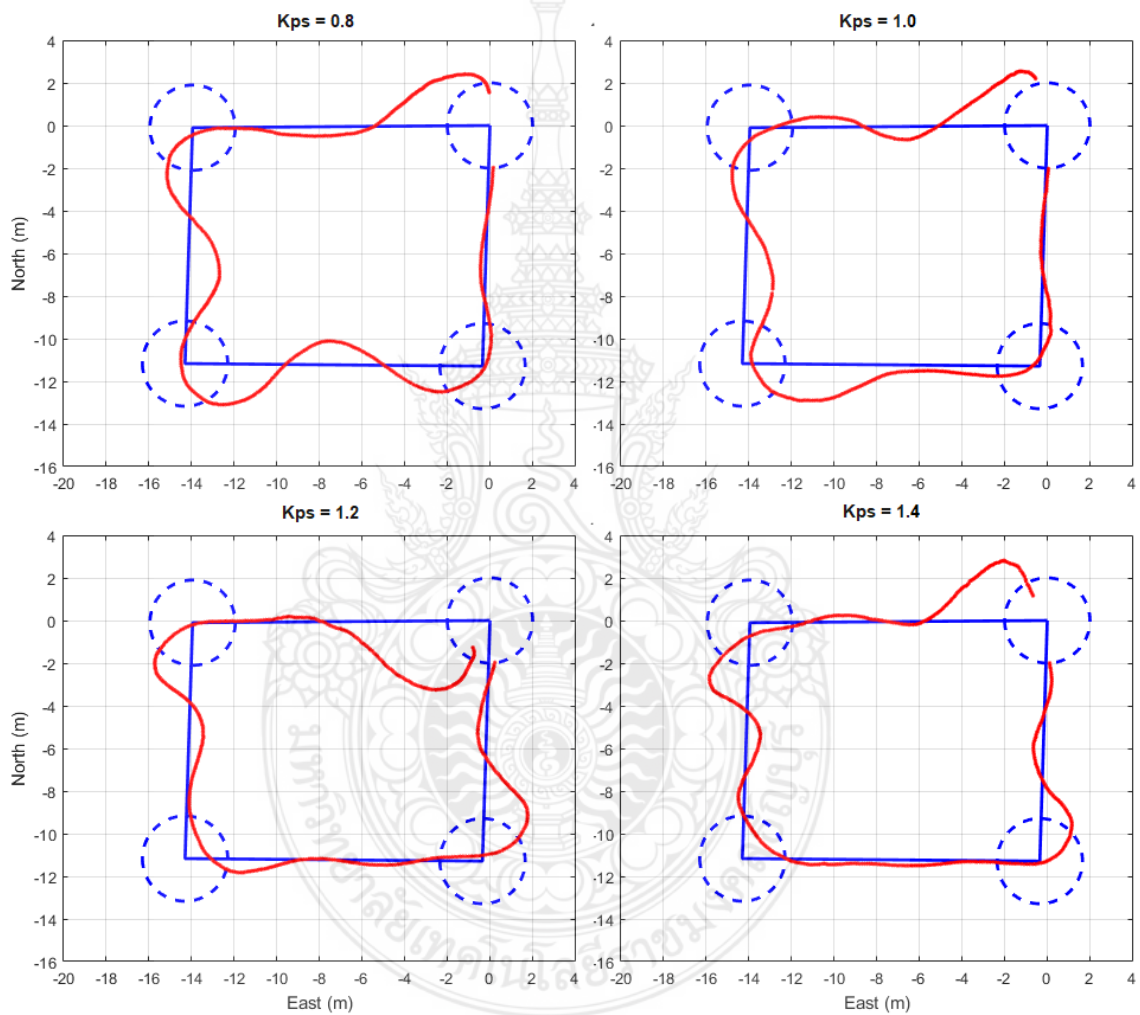
ในการวิเคราะห์ค่า  $\xi$  ได้ทำการปรับรูปแบบการแสดงผลของเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบอัตโนมัติ ในรูปที่ 4.31 ให้เป็นรูป 4.32 โดยเส้นวิถีโคจรเชื่อมระหว่างจุดเป้าหมายที่กำหนด แสดงด้วยเส้นตรงสีดำ และเส้นทางการเคลื่อนที่ของเมื่ออยู่นอกวงกลมรัศมีระบุจุดพิกัดเป้าหมายที่แสดงด้วยเส้นสีแดง พบว่า การเพิ่ม  $\xi$  ให้สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า  $\bar{d}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.33 (A) และ  $\bar{d}_{\max}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.33 (B) มีค่าลดลง แสดงถึงการให้  $\xi = 0.6$  แสดงพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือแกว่งกลับไปมามากที่สุด ทำให้มี  $\bar{d}_{\max}$  สูงที่สุดและยังส่งผลให้  $\bar{d}$  มีค่าสูงที่สุดไปด้วยเช่นกัน เมื่อผู้วิจัยทดลองเพิ่มค่า  $\xi$  ให้สูงขึ้นเป็น 0.7 พฤติกรรมการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบส่ายกลับไปมาจะลดลง ส่งผลให้  $\bar{d}_{\max}$  และ  $\bar{d}$  ลดลงตามไปด้วย และเมื่อเพิ่มค่า  $\xi = 0.8$  หุ่นยนต์สามารถลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรได้ราบเรียบมากที่สุด ส่งผลให้  $\bar{d}_{\max}$  และ  $\bar{d}$  มีค่าน้อยที่สุด จากการทดลองเปลี่ยนแปลงค่า  $\xi$  แสดงถึงความสอดคล้องกับผลตอบสนองแบบฮาร์โมนิกทางทฤษฎีที่ได้รับมาจากสมการที่ (2.37) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับสอง (2<sup>nd</sup> order linear ODEs) เมื่อกำหนดให้  $0 < \xi < 1$  จะเป็นผลตอบสนองแบบมีความหน่วงขาด (Underdamped response) ซึ่งช่วยให้ลดพฤติกรรมเคลื่อนที่ส่ายกลับไปมาและลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรได้อย่างราบเรียบและเร็วมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่า  $\xi$  ให้เข้าใกล้ 1 (Criticallydamped response)



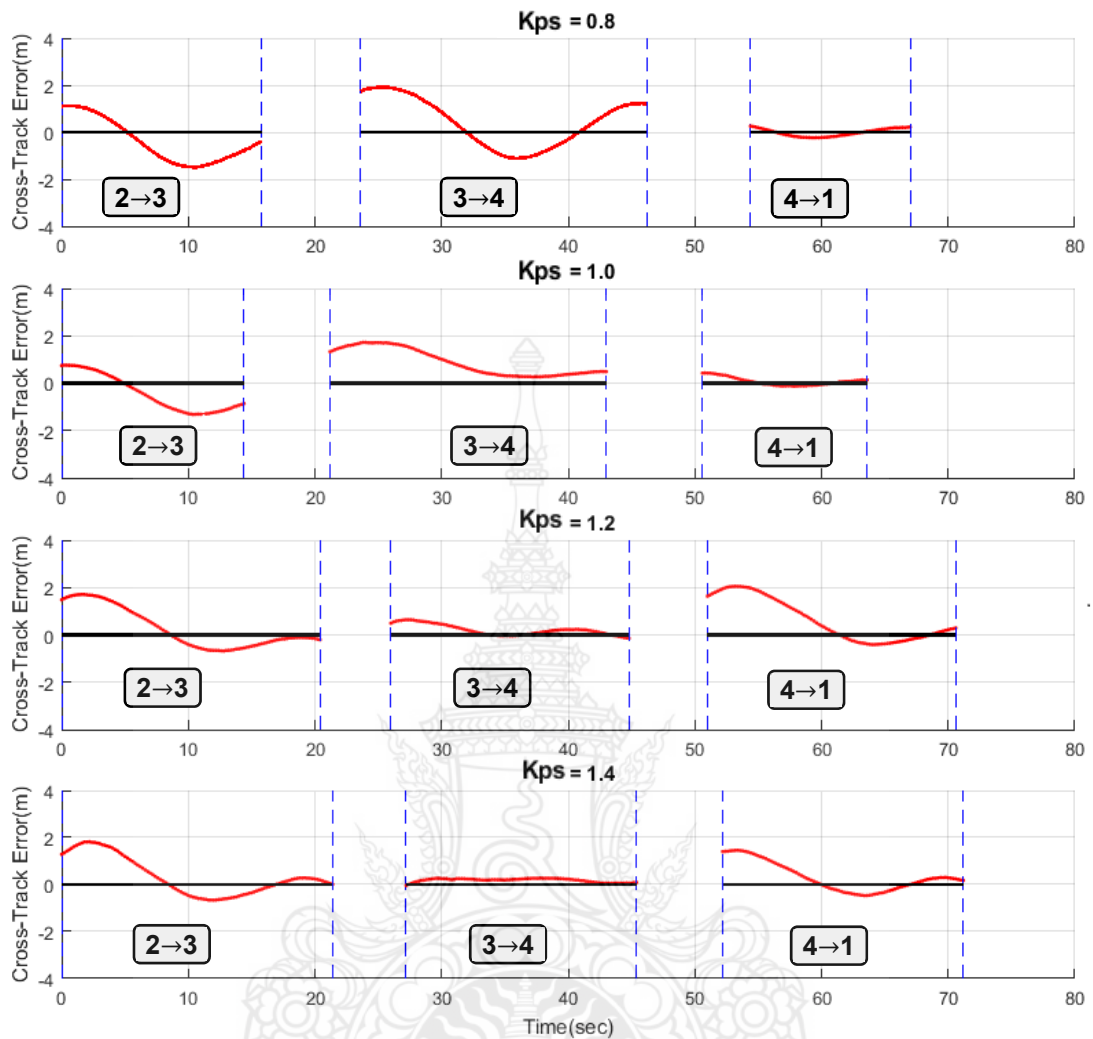
รูปที่ 4.33 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความหน่วง  $\xi = [0.6, 0.7, 0.8]$  ในการเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรของเรือสองท่อนแบบอัตโนมัติ ที่มีต่อ A)  $\bar{d}$  และ B)  $\bar{d}_{\max}$  เมื่อ  $L_1 = 17$  และ  $K_{ps} = 1$  คงที่

#### 4.2.3.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายมุมหันเห ( $K_{ps}$ )

ในการศึกษาผลกระทบของค่าอัตราขยายมุมหันเห ( $K_{ps}$ ) = [0.8, 1.0, 1.2, 1.4] ที่มีผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของยานพาหนะแบบอัตโนมัติด้วยตัวควบคุมแบบ  $L_1$  ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.34 ซึ่งแสดงพฤติกรรมจริงจากการติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อนเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $K_{ps}$  ดังต่อไปนี้



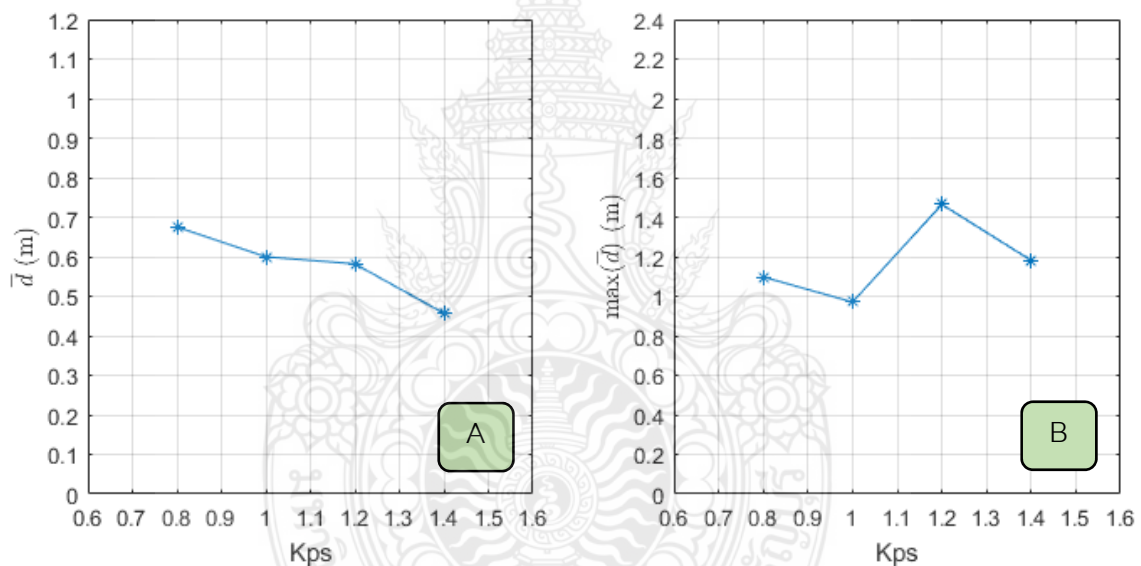
รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบพฤติกรรมจริงในการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อนจาก ในระบบพิกัด UTM ที่มีหน่วยเป็นเมตร เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายมุมหันเห ( $K_{ps}$ ) เมื่อ  $L_1 = 17$  และ  $\xi = 0.8$  คงที่



รูปที่ 4.35 ผลแสดงการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากหุ่นยนต์เรือสองท่อนไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (Cross-Track Error หรือแทนด้วย  $d$ ) ในระหว่างการเคลื่อนที่ ในช่วงเป้าหมายที่ 2-3, 3-4 และ 4-1 เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าอัตราขยายมุมหันเห ( $K_{ps}$ ) ในโดเมนของเวลา

ในการวิเคราะห์ค่าอัตราขยายมุมหันเห ( $K_{ps}$ ) = [0.8, 1.0, 1.2, 1.4] ได้ทำการปรับรูปแบบการแสดงผลของเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบอัตโนมัติ ในรูปที่ 4.34 ให้เป็นรูป 4.35 โดยเส้นวิถีโคจรเชื่อมระหว่างจุดเป้าหมายที่กำหนด แสดงด้วยเส้นตรงสีดำ และเส้นทางการเคลื่อนที่ของเมื่ออยู่นอกวงกลมรัศมีระบุจุดพิกัดเป้าหมายที่แสดงด้วยเส้นสีแดง จากการวิเคราะห์ผล  $\bar{d}$  ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.36 (A) จะพบว่าเมื่อค่า  $K_{ps}$  เพิ่มขึ้น  $\bar{d}$  จะมีแนวโน้มลดลง แต่  $\bar{d}_{max}$  จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงในรูปที่ 4.36 (B) แสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือ ซึ่งจะเห็นชัดในกรณีที่ใช้ค่า  $K_{ps} = 0.8$  เปรียบเทียบกับในการทดลองที่ใช้ค่า  $K_{ps} = 1.4$  จะ

พบว่าที่ค่า  $K_{ps} = 0.8$  แสดงผลตอบสนองการบังคับเลี้ยวมุมหันเหของหุ่นยนต์เรือเกิดขึ้นล่าช้า ทำให้มุมการลู่เข้าเส้นวิถีโคจรจึงมีขนาดกว้างมาก ส่งผลให้มีพฤติกรรมการติดตามเส้นทางแบบส่ายกลับไปมาและไม่ทนทานต่อสิ่งรบกวนจากสภาพแวดล้อม แต่ในกรณีที่ใช้ค่า  $K_{ps} = 1.4$  แสดงถึงการตอบสนองบังคับเลี้ยวมุมหันเหของหุ่นยนต์เรือที่ไวมากกว่าเมื่อใช้ค่า  $K_{ps} = 0.8$  ผลที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีตัวควบคุมแบบพีไอดี จากคุณลักษณะของ  $K_{ps}$  ซึ่งเป็นตัวควบคุมอัตราขยายค่าความผิดพลาดของมุม  $\eta$  ในกรณีที่ผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำจะส่งผลให้ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady-State) ล่าช้า ในทางกลับกัน ผลจากอัตราขยายสัดส่วนที่สูงค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน ส่งผลให้ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองที่ไวมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.36 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายมุมหันเห ( $K_{ps}$ ) = [0.8, 1.0, 1.2, 1.4] ในการเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรของเรือสองหุ่นแบบอัตโนมัติ ที่มีต่อ A)  $\bar{d}$  และ B)  $\bar{d}_{max}$  เมื่อ  $L_1 = 17$  และ  $\zeta = 0.8$  คงที่

### 4.3 การทดลองและการอภิปรายผลการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน

#### 4.3.1 การบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันบนพื้นเรียบ

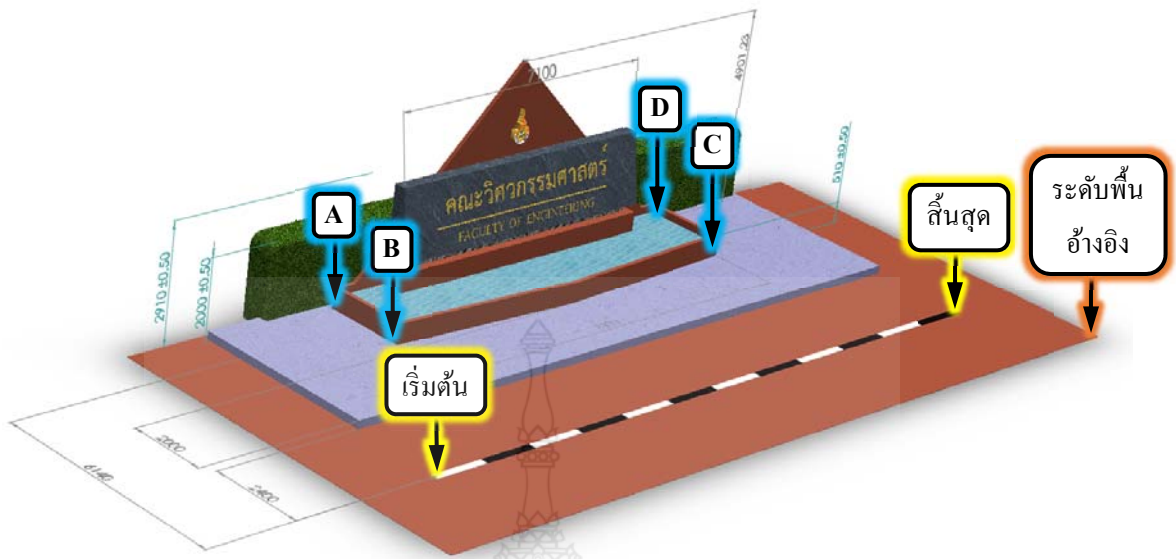
ในการทดสอบความถูกต้องจากผลการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน ผู้วิจัยเลือกสถานที่ที่ทราบรูปร่างและขนาดแน่ชัดสำหรับการทดสอบการบูรณาการข้อมูล คือ ป้ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังแสดงในรูปที่ 4.37



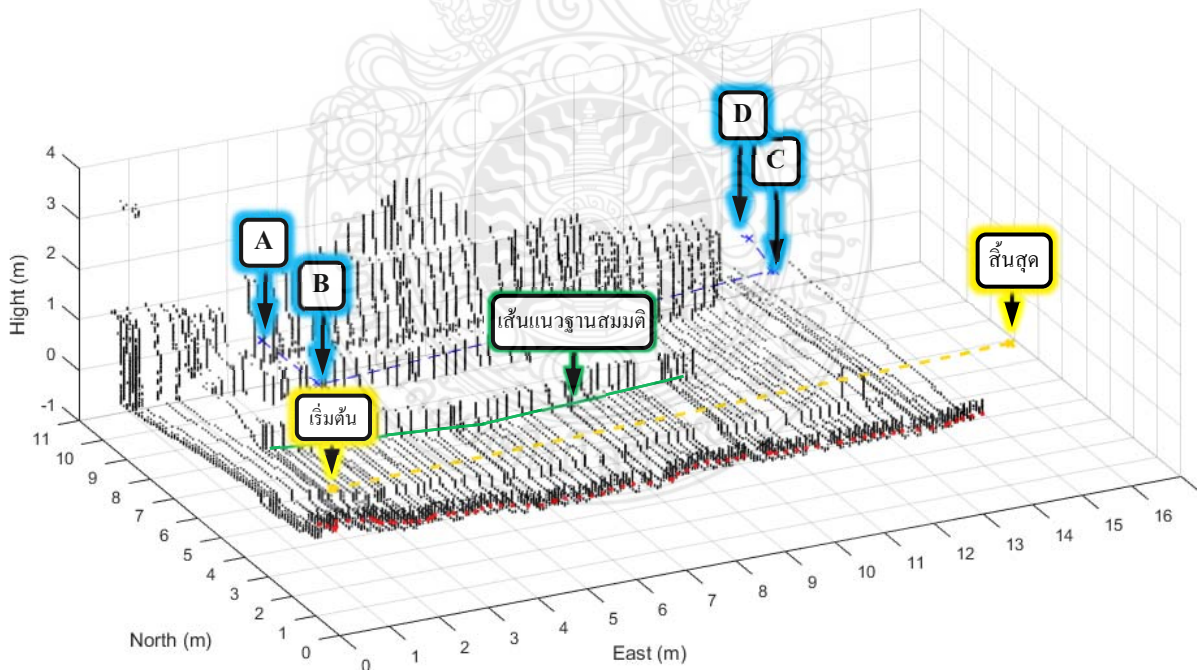
รูปที่ 4.37 สถานที่ทดสอบบนพื้นเรียบ ป้ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ในการทดลอง ผู้วิจัยเลือกใช้เครื่องวัดพิคัดด้วยสัญญาณดาวเทียมของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover) ที่มีความแม่นยำสูงในการระบุพิกัดตำแหน่ง เพื่อตรวจวัดพิกัดตำแหน่งอ้างอิงแบบจุดที่ขอบมุมของวัตถุรวมทั้งตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 4.38 ซึ่งแสดงรายละเอียดของแบบเส้นทางการเก็บข้อมูลแบบตรงสำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองหุ่นที่ติดตั้งบนรถเข็น ให้อยู่ห่างจากตำแหน่งอ้างอิงจุด B และ จุด C เท่ากับ 4.4 เมตร โดยเริ่มเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งสิ้นสุด นอกจากนี้ในรูปที่ 4.38 ยังแสดงรายละเอียดส่วนต่างๆของป้ายวิศวกรรมศาสตร์ จากการวัดระยะทางด้วยตลับเมตรซึ่งเป็นเครื่องมือวัดพื้นฐานที่มีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปมีค่าความคลาดเคลื่อนในระดับเซนติเมตร จากการตรวจวัดด้วยตลับเมตรพบว่า ป้ายมีความกว้าง 7.1 เมตร มีความสูงรวมจากพื้นระดับอ้างอิง 2.91 เมตร โดยที่ความสูงรวมของป้ายจากพื้นระดับอ้างอิงถึงยอดสามเหลี่ยมเท่ากับ 4.9 เมตร และเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือในแนวเส้นตรงจะอยู่ห่างจากป้ายเป็นระยะ 6.14 เมตร

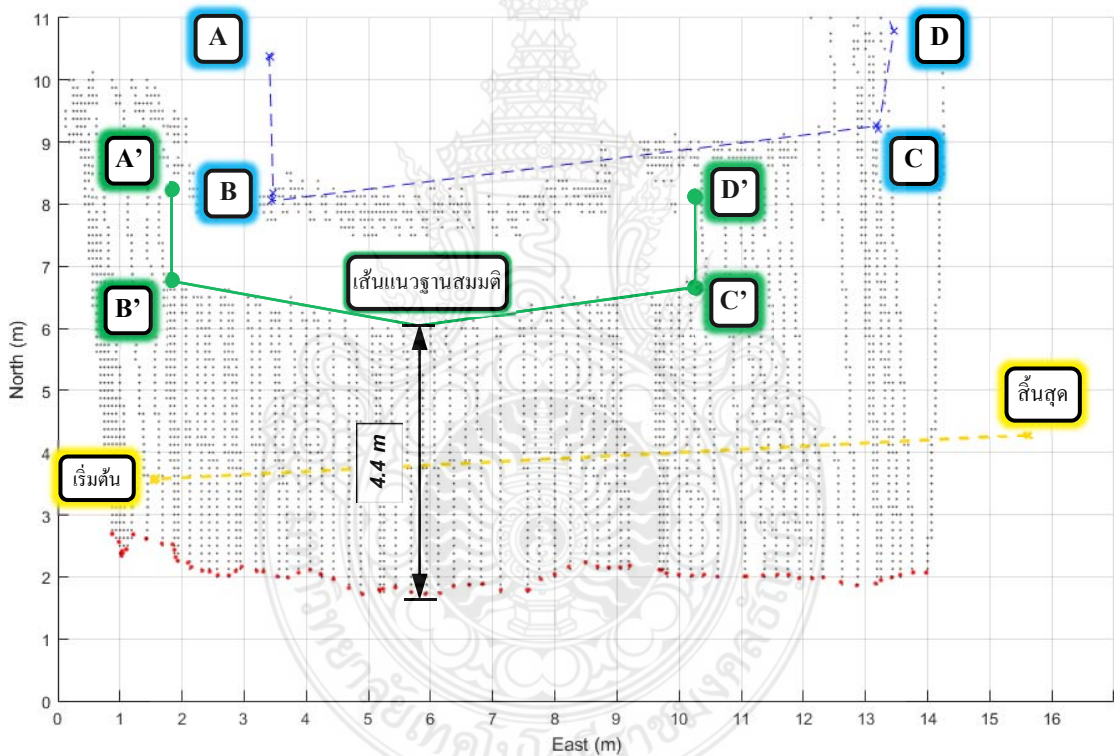
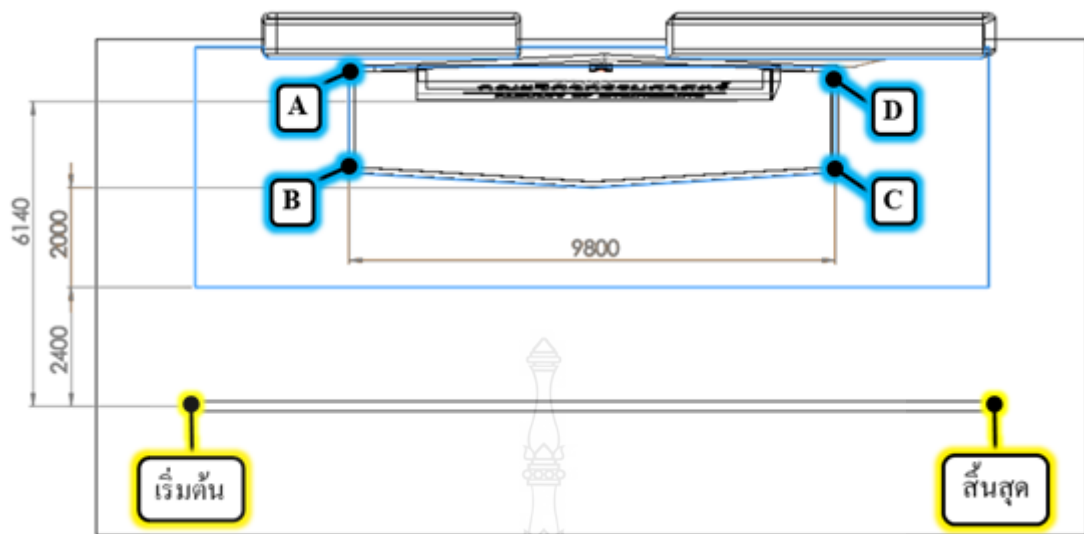




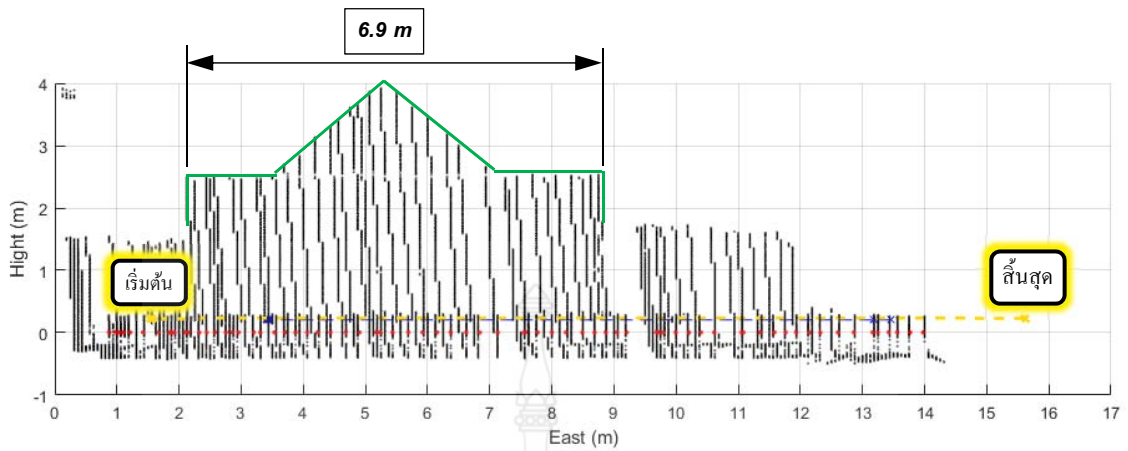
รูปที่ 4.38 รายละเอียดขนาดของป้ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ในหน่วยมิลลิเมตรและการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงวัตถุ (กรอบสี่ฟ้า) และตำแหน่งเริ่มต้นและสุดท้ายสำหรับเส้นทางการเคลื่อนที่ (กรอบสี่เหลือง) เพื่อระบุพิกัดตำแหน่งด้วยเครื่องวัดพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียมของ Hemisphere รุ่น S321 ชนิดสองความถี่สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Rover)



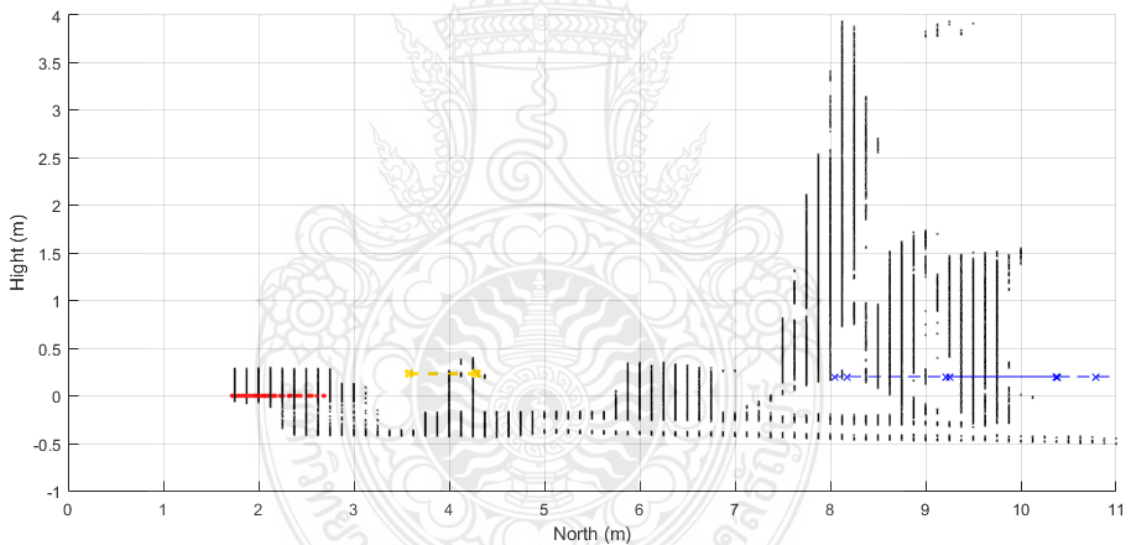
รูปที่ 4.39 ผลการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันบนพื้นเรียบโดยกำหนดให้กลุ่มหมอกรายละเอียดวัตถุด้วยสีดำ, ตำแหน่งอ้างอิงในการเคลื่อนที่แสดงด้วยเส้นสีเหลือง, ตำแหน่งอ้างอิง A-B-C-D ด้วยเส้นประสีน้ำเงิน และตำแหน่งของหุ่นยนต์เรือแสดงด้วยจุดประสีแดง



รูปที่ 4.40 ระยะเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เร็วที่ห่างจากป้ายคณะวิศวกรรมศาสตร์เมื่อวัดด้วยตลับเมตร (รูปบน) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันบริเวณหน้าป้ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ (รูปล่าง) ที่อยู่บนพื้นเรียบจากมุมมองด้านบน



รูปที่ 4.41 ผลการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน บริเวณหน้าป้ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่อยู่บนพื้นเรียบจากมุมมองด้านหน้า



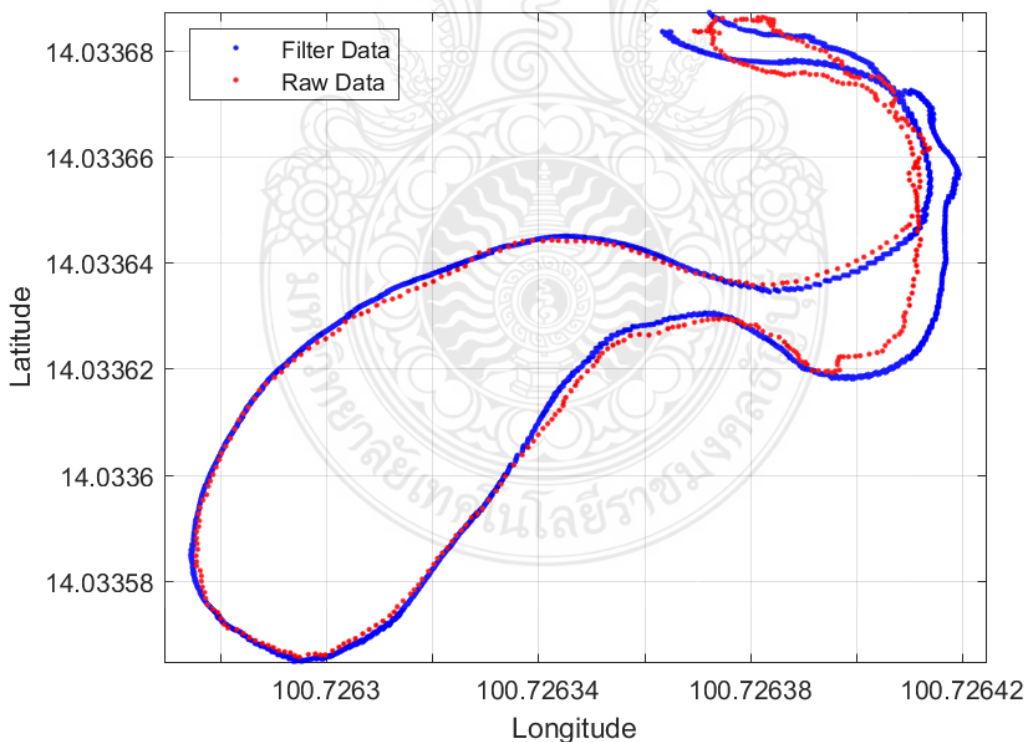
รูปที่ 4.42 ผลการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน บริเวณหน้าป้ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่อยู่บนพื้นเรียบจากมุมมองด้านหน้า

จากผลการทดลองการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 4.39 ถึงรูปที่ 4.42 พบว่าการบูรณาการข้อมูลสามารถแสดงรายละเอียดวัตถุได้ชัดเจน ซึ่งข้อมูลจากการตรวจวัดระยะทางของวัตถุด้วยเซนเซอร์เลเซอร์มีระยะทางเท่ากับการวัดระยะด้วยตลับเมตร จึงส่งผลให้สัดส่วนความสูงและระนาบการตรวจวัดถูกต้อง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลรายละเอียดวัตถุจากการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์เลเซอร์จะอ้างอิงกับพิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เรือ ซึ่งตรวจวัดด้วยตัวรับ

สัญญาณจีพีเอสที่ใช้กับเซนเซอร์วัดความเฉื่อย LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ จากการทดลองพบว่ามึระยะความคลาดเคลื่อนในแนวระนาบจากเส้นการเคลื่อนที่อ้างอิงในช่วง 2-2.5 เมตร ส่งผลให้การบูรณาการข้อมูลเพื่อสร้างกลุ่มหมอกรายละเอียดวัตถุคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งอ้างอิงที่ตรวจวัดด้วยระบุพิกัดตำแหน่งด้วยเครื่องวัดพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียมของ Hemisphere รุ่น S321 แบบสถานีเคลื่อนที่ที่มีความแม่นยำในระดับน้อยกว่า 10 เซนติเมตร

#### 4.3.2 การอภิปรายผลการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันในสภาพแวดล้อมจริง

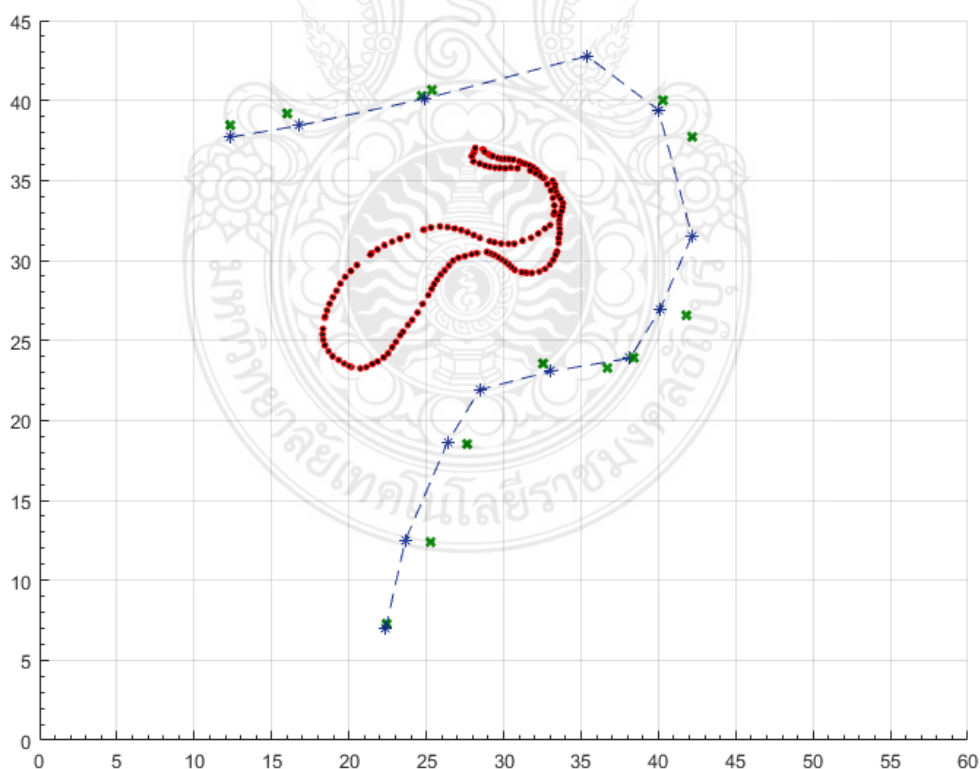
ในการทดลองนี้เป็นการนำหุ่นยนต์เรือสองท่อนขนาดเล็กภาคพื้นผิวน้ำ ที่ติดตั้งเซนเซอร์ต่างๆเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.42 เพื่อใช้เก็บและตรวจวัดข้อมูลทางอุทกศาสตร์ สำหรับผลการทดลองระบุตำแหน่งหุ่นยนต์เรือสองท่อนขนาดเล็กด้วยเซนเซอร์จีพีเอส เมื่อเป็นข้อมูลดิบในพิกัดภูมิศาสตร์จากดาวเทียมเพียงอย่างเดียว เมื่อเทียบกับข้อมูลตำแหน่งจากการบูรณาการข้อมูลจากดาวเทียมเข้ากับความเฉื่อยที่วัดได้จากเซนเซอร์ Microstrain GX3-45 ในพิกัดภูมิศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.43 การเปรียบเทียบข้อมูลตำแหน่งจีพีเอสชนิดมีการบูรณาการข้อมูล (สีน้ำเงิน) และข้อมูลตำแหน่งจีพีเอสชนิดข้อมูลดิบ(สีแดง) ที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ที่ใช้วัดความเฉื่อย

Microstrain GX3-45 ในการระบุตำแหน่งหุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กบังคับวิทยุภาคพื้นผิวน้ำ

จากรูปที่ 4.43 การระบุตำแหน่งเพื่อแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กบังคับวิทยุภาคพื้นผิวน้ำด้วยข้อมูลที่ผ่านการบูรณาการร่วมกันระหว่างตำแหน่งจากดาวเทียมร่วมกับความเฉื่อยภายในเซนเซอร์แล้ว (เส้นประสีน้ำเงิน) นั้นมีความราบเรียบและมีความต่อเนื่องมากกว่าข้อมูลดิบจากดาวเทียมเพียงอย่างเดียว (เส้นประสีแดง) เนื่องจากหุ่นยนต์เรือเคลื่อนที่ไปบนผิวน้ำแบบราบเรียบและต่อเนื่องมากกว่าแสดงถึงการระบุตำแหน่งมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้นจากกระบวนการบูรณาการข้อมูลภายในเฟิร์มแวร์ของเซนเซอร์ที่ใช้วัดความเฉื่อย Microstrain GX3-45 ดังนั้น เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลการระบุตำแหน่งที่ได้รับจากกระบวนการบูรณาการข้อมูลมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด ผู้วิจัยจึงทำการเปรียบเทียบกับการระบุตำแหน่งกับเครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม Hemisphere S321 ที่ทำการระบุตำแหน่งที่ขอบตลิ่งและผิวน้ำ โดยให้หุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กเคลื่อนที่ห่างจากขอบตลิ่ง 1.5 – 2 เมตร ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.44

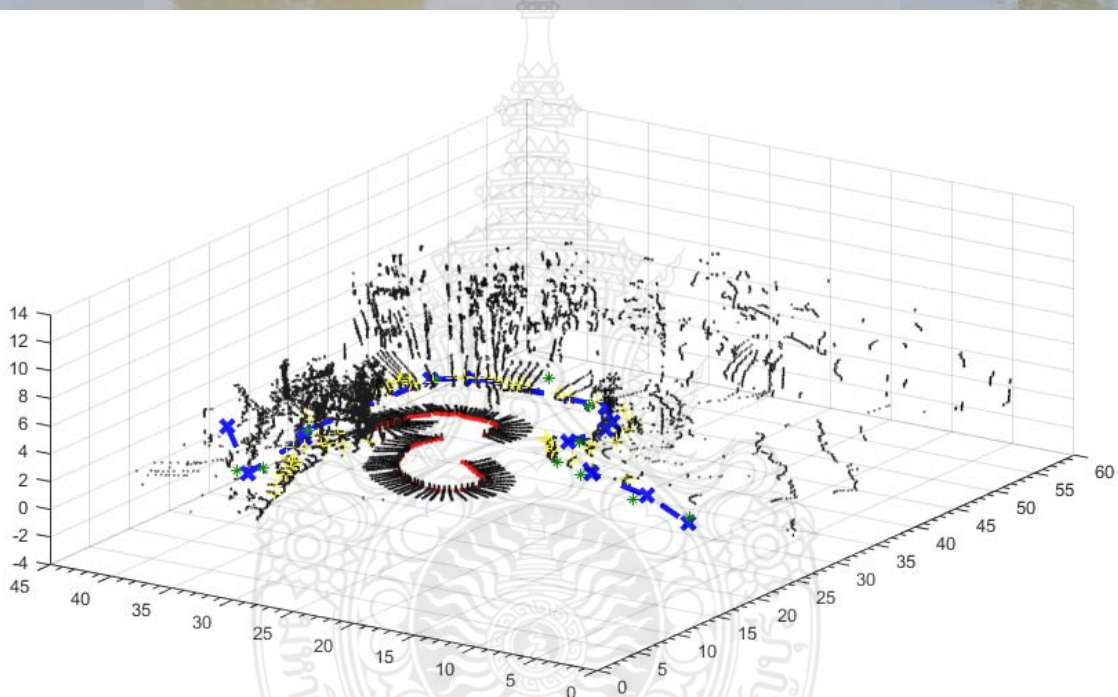


รูปที่ 4.44 ตำแหน่งของหุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็ก (จุดสีแดง) ที่ล้อมรอบด้วยผิวน้ำที่ขอบตลิ่ง (เส้นประสีน้ำเงิน) และสันตลิ่ง (สีเขียว)

จากรูปที่ 4.44 แสดงการระบุตำแหน่งผิวน้ำที่ขอบตลิ่ง (เส้นประสีน้ำเงิน) ด้วยเครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม Hemisphere S321 ที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมเฉลี่ย 22 ดวง โดยมีค่าความผิดพลาดในแนวระนาบเฉลี่ย 9.111 เซนติเมตร และค่าความผิดพลาดในแนวตั้งฉาก 18.615 เซนติเมตร แสดงถึงการระบุตำแหน่งหุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กด้วยเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเครียด Microstrain GX3-45 มีความสอดคล้องกับการระบุตำแหน่งที่ขอบตลิ่งด้วยเครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม Hemisphere S321 กล่าวคือ หุ่นยนต์เรืออยู่ห่างจากขอบตลิ่งอยู่ในช่วง 1.5-2 เมตร ซึ่งแสดงถึงข้อมูลตำแหน่งหุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กด้วยข้อมูลที่ผ่านการบูรณาการจากเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเครียด Microstrain GX3-45 สามารถนำมาใช้ระบุตำแหน่งได้หุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กโดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.5 เมตร

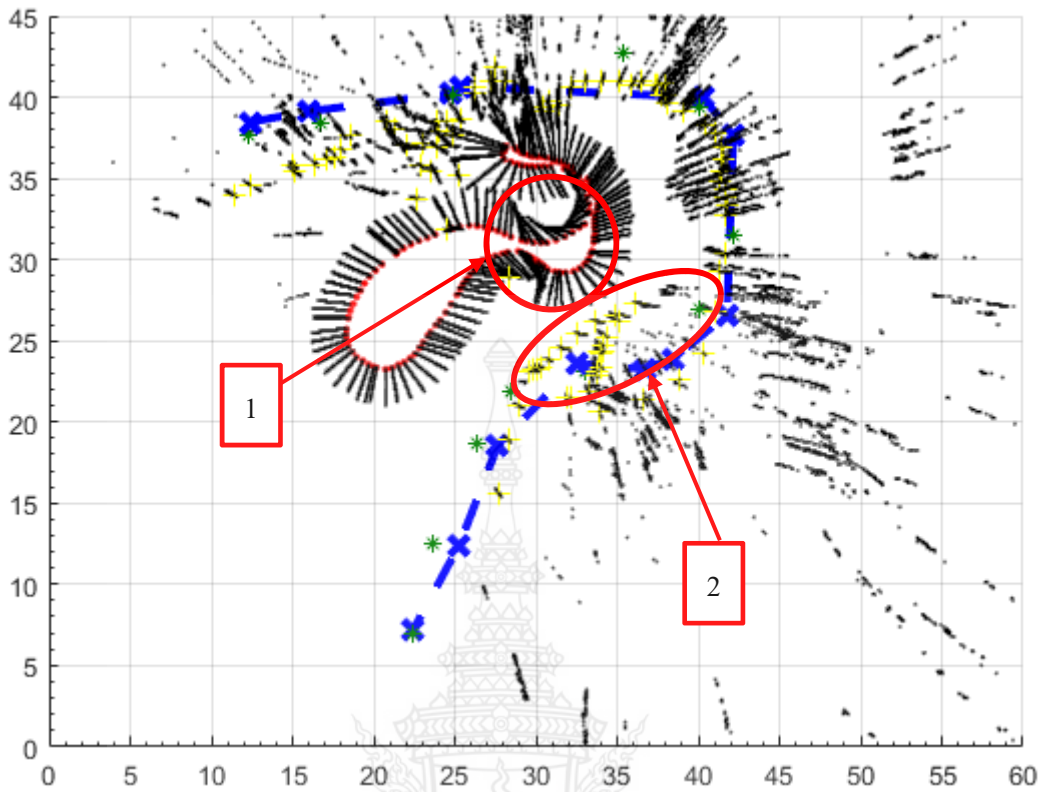
ในการตรวจวัดรายละเอียดวัตถุต่างๆที่อยู่เหนือผิวน้ำโดยใช้เซนเซอร์เลเซอร์ ข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์เลเซอร์จะนำมาบูรณาการร่วมกับมุมเอียงและการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเครียด Microstrain GX3-45 จากผลการทดลองการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันเปรียบเทียบกับสถานที่สำหรับเก็บข้อมูลจริงดังแสดงในรูปที่ 4.45





รูปที่ 4.45 การเปรียบเทียบสถานที่ทดลองจริง ในสระน้ำของ มทร. รัตนบุรี (ภาพบน) กับผลการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันสำหรับข้อมูลทางอุทกศาสตร์ (ภาพล่าง)

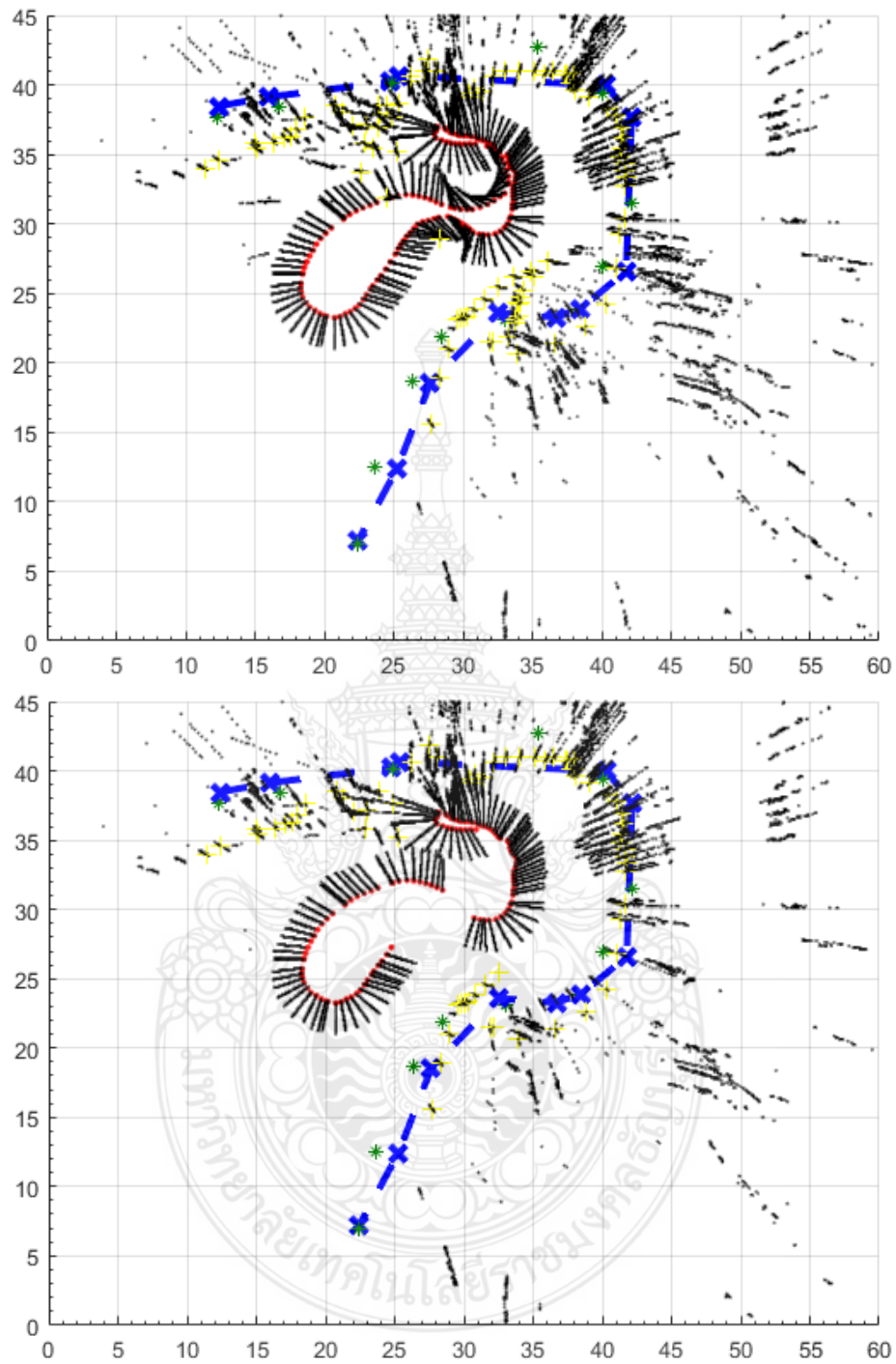
จากรูปที่ 4.45 ภาพล่าง ซึ่งแสดงภาพมุมมองโดยรวมของตำแหน่งหุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กด้วยจุดประสีแดง, กลุ่มหมอกรายละเอียดวัดจากการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์เลเซอร์ (Point cloud laser) ด้วยจุดสีดำ, การระบุตลิ่งจากการบูรณาการข้อมูลจากการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ต่างๆร่วมกันด้วยจุดสีเหลือง, การระบุตำแหน่งผิวน้ำที่ตลิ่งและสันขอบตลิ่งด้วยเครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม Hemisphere S321 ด้วยเส้นประสีน้ำเงิน และสีเขียว ตามลำดับ



รูปที่ 4.46 ภาพมุมมองจากด้านบนของการตรวจวัดและบูรณาการด้วยเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน

จากรูปที่ 4.46 แสดงความผิดพลาดของการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน กล่าวคือ จากวงกลมที่ 1 เมื่อหุ่นยนต์เรือสองท่อนเคลื่อนที่ไปด้านหน้า ระยะเวลาการตรวจวัดของเซนเซอร์เลเซอร์ควรจะต้องตรงกับแนวการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรืออยู่เสมอ แต่พบว่าข้อมูลระยะเวลาการตรวจวัดไม่ตรงกับแนวการเคลื่อนที่ในขณะที่หุ่นยนต์เรือสองท่อนกำลังเลี้ยวไปทางซ้าย เป็นผลมาจากข้อมูลมุมหันเห (Yaw) จากเซนเซอร์ที่ใช้วัดความเฉื่อย Microstrain GX3-45 ตรวจวัดได้ไม่ถูกต้อง ทำให้ข้อมูลองค์ประกอบวัตถุผิดเพี้ยนเสมือนว่ามีวัตถุอยู่นอกเส้นขอบคดโค้ง ซึ่งแสดงในวงรีที่ 2 ในรูปที่ 4.46 ดังนั้น เพื่อให้องค์ประกอบวัตถุถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จึงจำเป็นต้องขจัดกลุ่มข้อมูลตรวจวัดที่ผิดพลาดออก ดังแสดงในรูปที่ 4.47





รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบภาพมุมมองจากด้านบนก่อนจัดข้อมูลที่ผิดพลาด (ภาพบน) และ ภาพมุมมองจากด้านบนหลังจัดข้อมูลที่ผิดพลาด (ภาพล่าง) ของรายละเอียดวัตถุจากการบูรณาการข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

การวางแผนบริหารจัดการทรัพยากรน้ำที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องเพิ่มขีดความสามารถในการพยากรณ์ที่แม่นยำผ่านระบบ Decision Support System (DSS) โดยการผสมข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดพารามิเตอร์จริงเข้าให้เข้ากับแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยใช้หุ่นยนต์เรือออกปฏิบัติการตรวจวัดและจัดเก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์อย่างเป็นระบบ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเสนอการพัฒนาระบบนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางในหุ่นยนต์เรือเก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์ โดยแบ่งการพัฒนาออกเป็นสามส่วนหลัก ในส่วนแรก คือ การพัฒนาในส่วนระบบทางกลโดยออกแบบระบบรองรับการสั่นสะเทือนทางกลในหุ่นยนต์เรือสองท่อนให้สามารถปรับตัวตามคลื่นน้ำได้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดอัตราการส่งผ่านระยะขจัดไปยังเซนเซอร์เลเซอร์ ส่งผลให้เซนเซอร์เลเซอร์ตรวจวัดรายละเอียดวัตถุต่างๆที่อยู่เหนือผิวน้ำได้ถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น สำหรับในส่วนที่สอง เป็นการศึกษาตรรกะระบบนำทางอัตโนมัติด้วยตัวควบคุมแบบ  $L_1$  ที่มีความสามารถติดตามเส้นทางวิถีโคจรแบบตรงตามจุดพิกัดที่ถูกวางแผนไว้ล่วงหน้าโดยผู้ใช้งาน และในส่วนที่สาม คือ การบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆร่วมกัน เพื่อสร้างกลุ่มกลุ่มหมอกรายละเอียดวัตถุจากเซนเซอร์เลเซอร์ (laser point cloud) ที่บอกรายละเอียดของวัตถุ ที่ตรวจวัดได้เหนือผิวน้ำจากเซนเซอร์เลเซอร์ โดยอ้างอิงกับเครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียมที่มีความแม่นยำสูงในการระบุตำแหน่งของคลัง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

##### 5.1.1 การทดสอบระบบสั่นสะเทือนทางกล

การออกแบบระบบรองรับการสั่นสะเทือนทางกลของฐานรองรับเลเซอร์ที่อยู่ด้านบนระหว่างท่อนของหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อนอันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงอุทกพลศาสตร์ เพื่อช่วยลดปัญหาการสั่นสะเทือนที่จะส่งผ่านไปยังฐานรองรับเซนเซอร์เลเซอร์ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความแม่นยำของข้อมูลที่ได้ออกจากการตรวจวัดจากเซนเซอร์เลเซอร์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไม้สักแก้วส่วนน้ำมันของ CaneCreek DBAir จำนวน 2 ตัว ที่ติดตั้งที่ส่วนหน้าของแต่ละท่อนเรือและเชื่อมต่อระหว่าง 2 ท่อนด้วยโครงสร้างฐานรองรับเลเซอร์ที่มีจุดหมุนเชื่อมต่อที่กึ่งกลางลำเรือ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะการเคลื่อนที่จากการโคลงของเรือเพียงท่อนใดท่อนหนึ่ง ซึ่งโครงสร้างส่วนบน

สำหรับยี่ดฐานรองรับเซนเซอร์เลเซอร์จะเชื่อมเข้ากับจุดหมุนกึ่งกลางนี้ จากการออกแบบสมการการเคลื่อนที่ของระบบสั่นสะเทือนทางกล ผู้วิจัยกำหนดน้ำหนักของมวลรวมฐานยึดเซนเซอร์เลเซอร์เท่ากับ 15 กิโลกรัม และ ค่าสัมประสิทธิ์สปริง (Stiffness spring) ของโช๊ค เท่ากับ 5.6 kN/m และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (Damping coefficient) ของโช๊ค เท่ากับ 10 kN-s/m ซึ่งคุณสมบัติของทั้งสองค่าของโช๊คได้จากการทดลองเบื้องต้น ทำให้สามารถคำนวณค่าประมาณของความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_n$ ) จากความสัมพันธ์  $\sqrt{k/m} \approx \sqrt{5600/15} \approx 19.32$  rad/s หรือ 3.08 Hz และสามารถคำนวณหาค่าประมาณของอัตราส่วนความหน่วง ( $\zeta$ ) จาก  $c_2/(2\sqrt{km}) \approx 10,000/(2\sqrt{5600 \cdot 15}) \approx 17.25$  ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะผลตอบสนองของระบบสั่นสะเทือนแบบหน่วงเกิน (Overdamped response) ส่งผลให้อัตราส่วนการส่งผ่านระยะขจัด (Displacement transmissibility) มีค่าใกล้เคียง 1 กล่าวคือ ระยะขจัดการเคลื่อนที่จากความถี่อินพุตและระยะขจัดการเคลื่อนที่ของผลตอบสนองจะมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการตรวจวัดค่าความเร่งและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในงานวิจัยนี้จะใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง 2 ตัว, เซนเซอร์วัดความเร่งตัวล่างจะติดตั้งที่บริเวณฐานโช๊คของหุ่นด้านซ้ายและเซนเซอร์วัดความเร่งตัวบนจะติดตั้งอยู่ที่บริเวณฐานยึดเซนเซอร์เลเซอร์ โดยจะต้องทำการขจัดแวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกลอกออกจากข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์วัดความเร่ง 2 ตัว โดยใช้การคำนวณเมทริกซ์การหมุนด้วยมุมที่เกิดจากองค์ประกอบของแวกเตอร์ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลกในแต่ละแนวแกนแล้วนำไปหักล้างออกจากความเร่งที่วัดได้จากเซนเซอร์ ในการวิเคราะห์ความหนาแน่นของกำลังสเปกตรัม (Power Spectrum Density - PSD) ของสัญญาณความเร่งจะถูกประมาณด้วยวิธี Welch's method ด้วยฟังก์ชัน pwelch ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะสามารถช่วยตรวจจับและแยกความถี่จากสั่นสะเทือนที่สนใจออกจากสัญญาณรบกวนความถี่สูงได้ จากผลการทดลองหาค่าความเร่งจากการสั่นสะเทือนในโหมดนของเวลาด้วยการทดสอบการสั่นสะเทือนทางกลบนแท่นทดสอบที่มีแรงภายนอกมากกระทำในช่วงความถี่ระหว่าง 0.7 ถึง 2.0 Hz และการสั่นสะเทือนจากคลื่นอุทกพลศาสตร์โดยมีความถี่ประมาณ 1-1.25 เฮิร์ตซ์ ในตารางที่ 2 – 4 แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของความหนาแน่นของกำลังสเปกตรัมจากความเร่งที่แท้จริงจากเซนเซอร์ทั้งสองตัวในรูปแบบผลต่างของลอการิทึม จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า โช๊คและการออกแบบการติดตั้งโช๊คทั้งสองจะสามารถลดการสั่นสะเทือนจากหุ่นที่ส่งผ่านไปยังฐานรองรับเซนเซอร์เลเซอร์ได้ถึง 8-12% จากกรณีบนแท่นทดสอบและกรณีทดสอบในน้ำสามารถลดได้ 26% หนึ่ง สำหรับการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้มีค่าอัตราส่วนความถี่ ( $\omega/\omega_n$ ) น้อยกว่า 1 หรือต่ำกว่าช่วงลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือน (Isolation region) ซึ่งส่งผลให้การกระจายพลังงานขนาดเล็กในโช๊คอัพตัวเดียว

นอกจากนี้การลดการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากอุทกพลศาสตร์ของหุ่นเรือและการวิเคราะห์ความแข็งแรงวัสดุของจุดหมุนด้านหน้าบนแถบเชื่อมต่อด้านหน้าจำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบเพิ่มเติมเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของเรือในระยะยาว

### 5.1.2 การทดสอบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติ

ในขั้นการตรวจสอบและพิสูจน์ความแม่นยำและความเที่ยงตรงของข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอส Ublox รุ่น NEO-6M ที่ใช้กับหน่วยควบคุมการนำทางอัตโนมัติ อาดูไฟล็ต เมกะ เปรียบเทียบกับข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอสที่มีคุณภาพสูงกว่า โดยเลือกใช้เซนเซอร์ตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ LORD MicroStrain® รุ่น 3DM-GX3-45™ โดยอ้างอิงจากข้อมูลพิกัดตำแหน่งแบบกลุ่มจุดจากตัวรับสัญญาณจีพีเอสของ Hemisphere รุ่น S321 จากผลการทดลองพบว่าข้อมูลพิกัดตำแหน่งด้วยตัวรับสัญญาณจีพีเอส Ublox รุ่น NEO-6M สามารถนำมาใช้ระบุพิกัดตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบอัตโนมัติได้โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 เมตร

ในส่วนการศึกษาระยะการนำทางติดตามเส้นวิถีโคจรด้วยตัวควบคุม  $L_1$  โดยศึกษาผลกระทบในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม  $L_1$  จำนวน 3 ค่า คือ  $L_1$ ,  $\xi$  และ  $K_{ps}$  และได้ใช้ระยะการนำทางด้วยตัวควบคุม  $L_1$  กับหุ่นยนต์ 2 ประเภทที่มีพลศาสตร์แตกต่างกัน คือ หุ่นยนต์รถสี่ล้อที่มีการบังคับเลี้ยวด้วยล้อหน้า, ขับเคลื่อนด้วยล้อหลังและไม่สามารถลื่นไถลบนผิวสัมผัสถนน ซึ่งแตกต่างจากหุ่นยนต์เรือสองหุ่นจะใช้แรงผลักดันระหว่างสองใบพัดที่เท่ากันในทิศทางเดียวกันสำหรับการเคลื่อนที่ทางตรงและบังคับเลี้ยวด้วยการสร้างแรงผลักดันต่างกันระหว่างสองใบพัดและสามารถลื่นไถลไปบนผิวน้ำได้เมื่อมีผลกระทบจากอุทกพลศาสตร์ จากการศึกษาเปรียบเทียบหุ่นยนต์ทั้ง 2 ประเภทสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ผลการศึกษาผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนค่า  $L_1$  ของหุ่นยนต์ทั้งสองประเภทพบว่า การกำหนดค่า  $L_1$  จะแปรผันตรงกับขนาดระยะขจัดของเส้นตรง  $L_1$  และแปรผกผันกับมุมหันเลี้ยวเส้นวิถีโคจร การกำหนดค่า  $L_1$  ที่มีความเหมาะสมจะส่งผลให้หุ่นยนต์สามารถติดตามเส้นวิถีโคจรได้อย่างราบเรียบและลู่เข้าหาเส้นทางอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกับหุ่นยนต์เรือสองหุ่น เนื่องจากพฤติกรรมของเรือที่เป็นแบบความหน่วงขาด ทำให้ต้องใช้ค่า  $L_1$  ที่มากจึงจะดี ส่วนหุ่นยนต์รถสี่ล้อมีพฤติกรรมเป็นแบบความหน่วงเกิน ทำให้ต้องปรับตั้งค่า  $L_1$  ที่น้อยจึงจะลู่เข้าหาเส้นทางได้อย่างรวดเร็ว

2) ผลการศึกษาผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนค่า  $\xi$  ที่ใช้กับหุ่นยนต์เรือพบว่ามีความสอดคล้องกับผลตอบสนองจากระบบอันดับสองแบบมีความหน่วงแบบหน่วงขาด ซึ่งส่งผลให้พฤติกรรมการติดตามเส้นวิถีโคจรแกว่งกลับไปมาและค่อยๆ ลดลงตามเวลา เนื่องจากพลศาสตร์ของเรื่อนั้นมีแรงเสียดทานด้านที่น้อย การเพิ่มค่า  $\xi$  ให้สูงขึ้นจนเข้าใกล้ค่า  $1/\sqrt{2}$  หรือค่าความหน่วงวิกฤติ จะช่วยลดพฤติกรรมการแกว่งกลับไปมาและลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรได้รวดเร็วและราบเรียบมากยิ่งขึ้น ส่วนการปรับค่า  $\xi$  จะมีผลกระทบต่อ ผลตอบสนองของหุ่นยนต์รถที่น้อยมากเนื่องจากผลตอบสนองเป็นแบบความหน่วงเกินอยู่แล้ว

3) ผลการศึกษาตัวควบคุมพีไอดีของระบบการบังคับเลี้ยว เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า  $K_{ps}$  ให้สูงขึ้นจะช่วยให้หุ่นยนต์ทั้งสองประเภทสามารถเคลื่อนที่ลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรได้เร็วมากขึ้น และยังช่วยให้หุ่นยนต์สามารถติดตามเส้นวิถีโคจรได้ดียิ่งขึ้น โดยมีการกวัดแกว่งของเส้นทางเคลื่อนที่ที่น้อยลง

### 5.1.3 การทดลองการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆ ร่วมกัน

ในการศึกษาและทดลองการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆ ร่วมกันเพื่อสร้างกลุ่มหมอกรายละเอียดวัตถุจากเซนเซอร์เลเซอร์ ที่บอกรายละเอียดของวัตถุที่อยู่เหนือผิวน้ำ โดยใช้กับหุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กบังคับด้วยวิทยุภาคพื้นผิวน้ำที่ติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับและเก็บบันทึกข้อมูลทางอุทกศาสตร์ จากกรณีทดลองบนพื้นเรียบและการทดลองในสภาพแวดล้อมจริงสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1) ข้อมูลตำแหน่งจีพีเอสชนิดที่ผ่านการบูรณาการร่วมกันระหว่างตำแหน่งจากดาวเทียมร่วมกับค่าความเฉื่อยภายในเซนเซอร์ Microstrain GX3-45 แล้ว ลักษณะข้อมูลที่รับจะมี ความต่อเนื่องและราบเรียบมากกว่าข้อมูลดิบจากดาวเทียมเพียงอย่างเดียว และเมื่อเปรียบเทียบกับการระบุตำแหน่งผิวน้ำที่ขอบตลิ่งด้วยเครื่องหาพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียม Hemisphere S321 ที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมเฉลี่ย 22 ดวง มีค่าความผิดพลาดในแนวระนาบเฉลี่ยและในแนวตั้งฉาก 9.111 และ 18.615 เซนติเมตร ตามลำดับ จากการทดลองให้หุ่นยนต์เรือเคลื่อนที่ห่างจากขอบตลิ่งอยู่ในช่วง 1.5-2 เมตร แสดงให้เห็นว่ากระบวนการบูรณาการข้อมูลภายในเซนเซอร์สามารถนำมาใช้ระบุตำแหน่งได้หุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กโดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.5 เมตร

2) ในการสร้างกลุ่มหมอกรายละเอียดวัตถุที่บอกรายละเอียดของวัตถุที่อยู่เหนือผิวน้ำ โดยใช้ข้อมูลที่ตรวจจับได้จากเซนเซอร์เลเซอร์บูรณาการร่วมกับการระบุตำแหน่ง (Position) และทิศ

ทางการวางตัว (Orientation) ของหุ่นยนต์เรือสองหุ่นขนาดเล็กภาคพื้นผิวน้ำจากการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย Microstrain GX3-45 จากผลการศึกษพบว่า การบูรณาการข้อมูลสามารถแสดงรายละเอียดวัตถุได้คร่าวๆ โดยที่ความถูกต้องของตำแหน่งกลุ่มหมอกรายละเอียดวัตถุจากเซนเซอร์เลเซอร์จะอ้างอิงกับพิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เรือและระนาบตรวจวัดจะขึ้นอยู่กับองศาหมุนหันเห (Yaw) ของลำเรือ จากการทดลองนี้พบว่าระนาบตรวจวัดของเซนเซอร์เลเซอร์ไม่ตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ขณะที่หุ่นยนต์เรือสองหุ่นกำลังแล่นไปทางซ้าย ส่งผลให้ข้อมูลที่ผ่านการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆ ร่วมกันในช่วงเวลานั้นแสดงรายละเอียดองค์ประกอบวัตถุไม่ถูกต้องเสมือนว่ามีวัตถุอยู่นอกเส้นขอบตลิ่ง เป็นผลมาจากข้อมูลมุมหันเห (Yaw) จากการตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเฉื่อย Microstrain GX3-45 ดังนั้น จึงจำเป็นต้องขจัดกลุ่มข้อมูลตรวจวัดที่ผิดพลาดออกไปเพื่อให้องค์ประกอบวัตถุที่อยู่เหนือผิวน้ำถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การออกแบบระบบต้นสะพานเชิงกลในหุ่นยนต์เรือสองหุ่นแบบปรับตัวตามคลื่นควรเลือกใช้โซ่ที่มีช่วงปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่ต่ำกว่าโซ่เคสส์รวมน้ำมัน CaneCreek DBAir ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จึงจะทำให้ระบบรองรับต้นสะพานทางกลแสดงคุณลักษณะการลดอัตราการส่งผ่านระยะขจัดอย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น และ ควรเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างระบบรองรับต้นสะพานทางกลเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานระยะยาว

5.2.2 ในการเก็บบันทึกผลการทดลองหุ่นยนต์ติดตามเส้นทางวิถีโคจรแบบอัตโนมัติในระยะยาว ควรเลือกใช้หน่วยควบคุมการนำทางที่มีความเสถียรภาพมากกว่า อาคูไฟลีสต เมกะ และมีพื้นที่จัดเก็บข้อมูลมากกว่าอาคูไฟลีสต เมกะ หรือสามารถรองรับหน่วยความจำภายนอก (MicroSD card) ได้

5.2.3 เซนเซอร์ต่างๆ ที่นำมาใช้ในกระบวนการบูรณาการเซนเซอร์ควรจะต้องมีความแม่นยำและเที่ยงตรงสูงมาก เพื่อให้ได้มาซึ่งกลุ่มจุดจากเลเซอร์ (laser point cloud) ที่บอกรายละเอียดองค์ประกอบของวัตถุต่างๆ ที่อยู่เหนือผิวน้ำ ได้อย่างถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

5.2.4 ควรเพิ่มสมรรถนะระบบประมวลผลและพื้นที่จัดเก็บข้อมูลอุทกศาสตร์ที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ต่างๆ ร่วมกัน สำหรับออกปฏิบัติงานตรวจวัดและเก็บข้อมูลเป็นเวลานาน

## บรรณานุกรม

- [1] ไทยรัฐออนไลน์, การเกษตร ไทยรัฐออนไลน์ (Online), (2010), Available:  
<https://www.thairath.co.th/content/81914>, (7 June 2017).
- [2] Wikipedia, อุทกภัยในประเทศไทย พ.ศ.2554 Wikipedia (Online), (2011) , Available:  
[https://th.wikipedia.org/wiki/อุทกภัยในประเทศไทย\\_พ.ศ.\\_2554](https://th.wikipedia.org/wiki/อุทกภัยในประเทศไทย_พ.ศ._2554), (8 June 2017).
- [3] P. Prempraneerach, K.Thamchaitas & P.Kulvanit, (2012), Autonomous Waypoint Tracking of Kayak Boat using State-Variable Feedback Control, in 2012 Oceans - Yeosu , pp. 1-7.
- [4] P. Prempraneerach et al., (2015), Autonomous Way-Point Tracking Navigation of Surveying Surface Vessel with Real-Time Positioning System, in 2015 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC), Chiang Mai, 2015, pp. 1-6.
- [5] C. Y. Tzeng, S. D. Lee, Y. L. Ho and W. L. Lin, (2006), Autopilot Design for Track-keeping and Berthing of a Small Boat, 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Taipei, pp. 669-674.
- [6] D. S. dos Santos, C. L. Nascimento and W. C. Cunha, (2013), Autonomous Navigation of a Small Boat using IMU/GPS/Digital Compass Integration, in 2013 IEEE International Systems Conference (SysCon), Orlando, FL, pp. 468-474.
- [7] J. Pandey and K. Hasegawa, (2015), Study on Manoeuverability and Control of an Autonomous Wave Adaptive Modular Vessel (WAM-V) for Ocean Observation, 2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress (IAIN), Prague, pp. 1-7.
- [11] Jay A. Farrell, (2008), Aided Navigation GPS with High Rate Sensors, New York, NY , McGraw-Hill.
- [12] วิชัย เขียววีรชน, (2559), ระบบพิกัด UTM, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- [13] Thor I.Fossen, (1994) , Guidance and Control of Ocean Vehicles , University of Trondheim , Norway
- [14] P. Prempraneerach, (2016), Trajectory tracking using Sliding Mode Control for Autonomous Surface Vessel, 2016 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC), Chiang Mai, pp. 1-6.
- [15] นกคณัษ อชาวาคม และ ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์, วิธีการควบคุมการสิ้นสะท้อน, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [16] Sanghyuk Park, John Deyst, and Jonathan How, (2006), A New Nonlinear Guidance Logic for Trajectory Tracking, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Providence, Rhode Island.
- [17] Wikipedia, Spectral density estimation (Online), (2018), Available:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Spectral\\_density\\_estimation](https://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_density_estimation), (15 July 2018).
- [18] MathWorks, Pwelch (Online), (2018), Available:  
<https://www.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html>, (29 May 2018).
- [19] CaneCreek, DBAir (Online), (2017), Available:  
<https://www.canecreek.com/products/suspension/dbair-cs>, (20 May 2017).
- [20] Pololu, MinIMU-9 v2 Gyro, Accelerometer, and Compass (L3GD20 and LSM303DLHC Carrier) (Online), (2018), Available:  
<https://www.pololu.com/product/1268/specs/>, (15 June 2018).
- [21] Sparkfun, Small, Low Power, 3-Axis  $\pm 3$  g Accelerometer | ADXL335 (Online), (2018), Available:  
<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/adxl335.pdf/>, (15 June 2018).
- [22] ArduPilot Dev Team, ArduPilot Mega (Online), (2017), Available:  
<http://www.ardupilot.co.uk/>, (15 May 2017).
- [23] Microstrain, LORD Microstrain SENSING SYSTEMS (Onlines), 2017, Available:  
<http://www.microstrain.com/inertial/3dm-gx4-45>, (7 July 2017).
- [24] HOKUYO, UXM-30LXH-EWA (Onlines), 2018, Available:  
<https://www.hokuyo-aut.jp/search/single.php?serial=172>, (16 June 2018).
- [25] Hemisphere, S321 GNSS SURVEY SMART ANTENNA (Onlines), 2018, Available:  
<https://hemispheregnss.com/Industries/Product-View/s321-gnss-survey-smart-antenna-1309>, (3 July 2018).
- [26] GARMIN®, 421s (Onlines), 2018, Available:  
<https://buy.garmin.com/en-US/US/p/28746#specs>, (7 July 2017).



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

การคำนวณขั้นต้นเพื่อออกแบบ

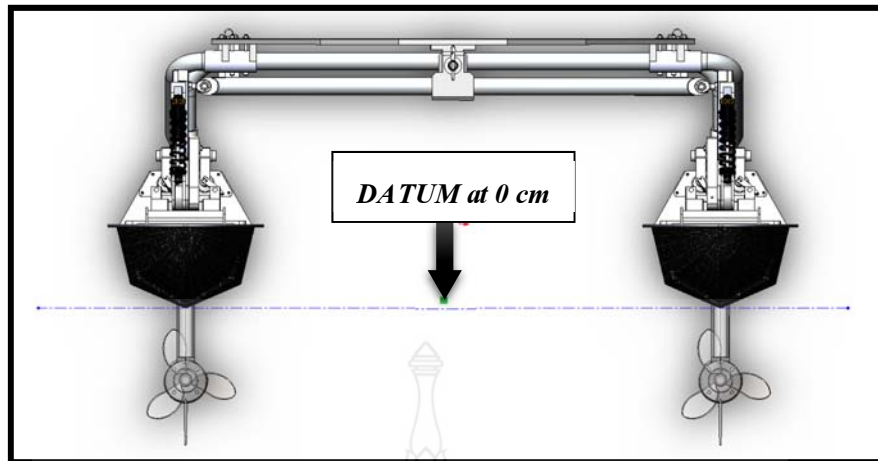
หุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น

ก.1 การคำนวณแรงลอยตัวของหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น

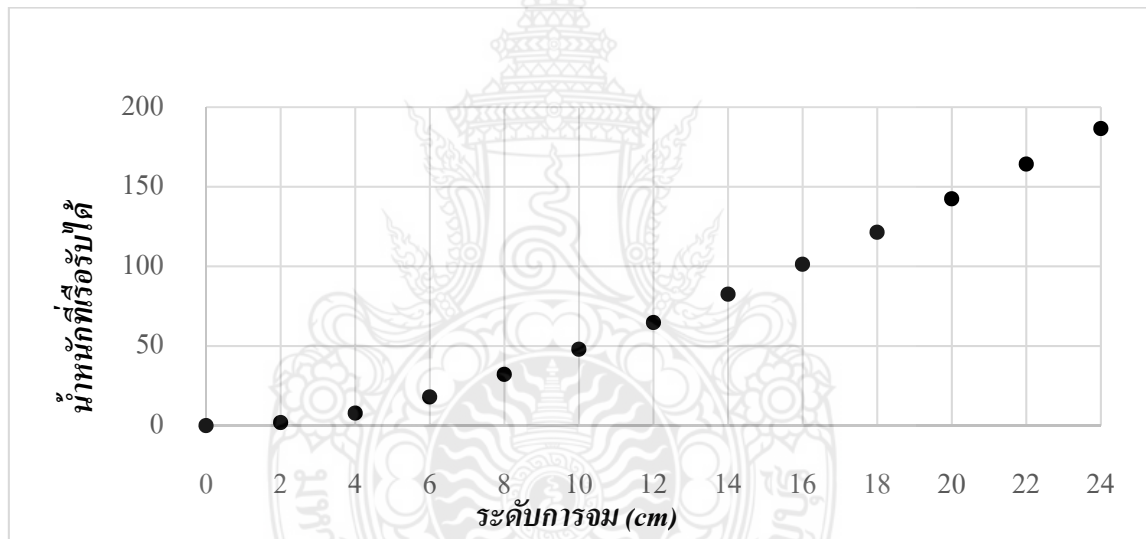
ในการออกแบบเรือหุ่นยนต์สองท่อน จะทำการประมาณค่าปริมาตรส่วนที่จมของเรือที่แต่ละระดับความลึกเพื่อคำนวณหาแรงลอยตัว จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ทราบว่า เรือสามารถรองรับน้ำหนักได้สูงสุดเท่าไรที่แต่ละระดับการกินน้ำของลำเรือ รวมไปถึงการพิจารณาอัตราการจมของลำเรือที่น้ำหนักต่างๆ อีกทั้งยังช่วยในการประเมินเสถียรภาพการลอยตัวของเรือเมื่อปะทะกับคลื่นด้วย

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำหนักที่เรือบรรทุกได้ (หรือ แรงลอยตัว) ที่ระดับการจมต่างๆกัน (ต่อ 1 ท่อน)

<i>Height form DATUM (cm)</i>	<i>Submerge Volume (m<sup>3</sup>)</i>		<i>Buoyancy Force(N)</i>		$\Sigma$	$\Sigma$	<i>Weight @ Height</i>
	Front	Rear	Front	Rear	<i>Submerge Volume (m<sup>3</sup>)</i>	<i>Buoyancy Force (N)</i>	
0	0.00000	0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.00052	0.00135	5.056	13.229	0.00186	18.285	1.864
4	0.00236	0.00540	23.138	52.97	0.00776	76.108	7.758
6	0.00576	0.01216	56.545	119.301	0.01793	175.846	17.925
8	0.01078	0.02134	105.783	209.321	0.03212	315.104	32.121
10	0.01680	0.03111	164.838	305.197	0.04791	470.035	47.914
12	0.02355	0.04118	230.99	403.959	0.06472	634.949	64.725
14	0.03094	0.05154	303.516	505.615	0.08248	809.131	82.48
16	0.03905	0.06220	383.078	610.174	0.10125	993.252	101.249
18	0.04824	0.07315	473.266	717.643	0.12140	1190.91	121.398
20	0.05804	0.08441	569.398	828.031	0.14245	1397.429	142.449
22	0.06821	0.09596	669.174	941.346	0.16417	1610.52	164.171
24	0.07874	0.10781	772.473	1057.596	0.18655	1830.068	186.551



ภาพที่ ก.1 ระดับอ้างอิงสำหรับการคำนวณแรงลอยตัว



ภาพที่ ก.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักรับได้ที่ระดับการจมน้ำต่างๆ (ต่อ 1 ท่อน)

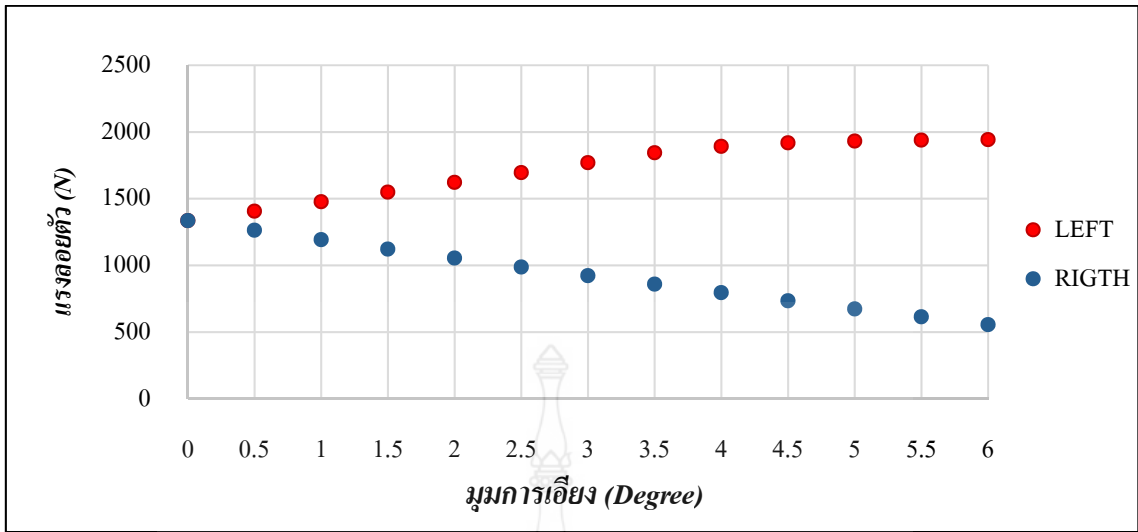
จากการคำนวณพบว่า เรือสามารถรองรับน้ำหนักได้สูงสุด 373.102 กิโลกรัม หรือท่อนละ 186.551 กิโลกรัม ในการออกแบบ ผู้วิจัยกำหนดให้น้ำหนักรวมของเรือและอุปกรณ์ทั้งลำไม่เกิน 260 กิโลกรัมหรือท่อนละ 130 กิโลกรัม ซึ่งทำให้กานเรือลอยอยู่สูงกว่าผิวน้ำไม่น้อยกว่า 5 เซนติเมตร เมื่อเรืออยู่ในสภาวะสมดุล

ก.2 การคำนวณความเสถียรภาพของหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น

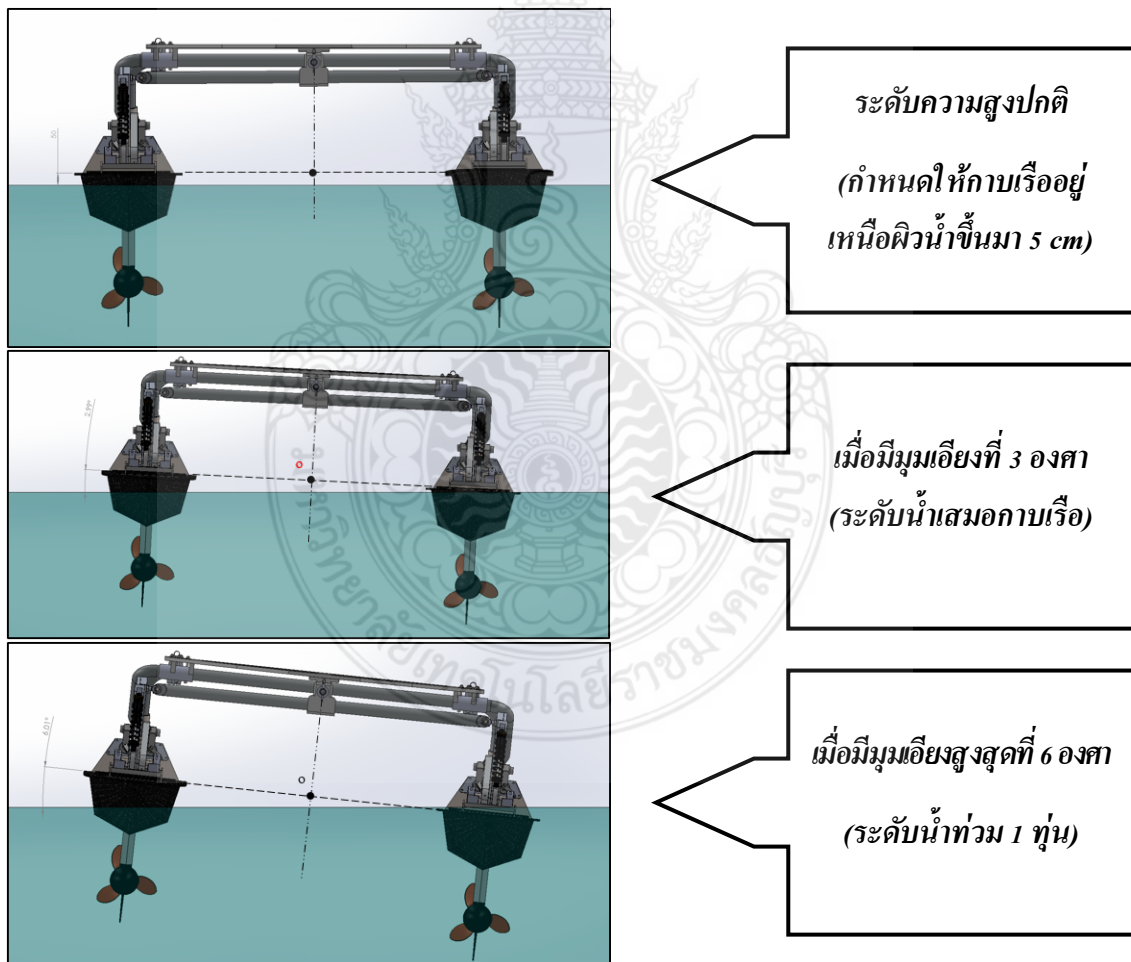
เป็นการคำนวณเพื่อหาโมเมนต์ที่ช่วยป้องกันการพลิกคว่ำเมื่อเกิดการโคลงหรือการเอียงระหว่าง 2 ท่อน ในการคำนวณจะพิจารณาความแตกต่างของปริมาตรส่วนที่จมทั้งหมดของเรือและอุปกรณ์ที่เปลี่ยนไป ณ มุมเอียงต่าง ๆ กัน แล้วจึงนำไปคำนวณหาแรงลอยตัวที่เปลี่ยนไป ซึ่งจะช่วยให้คำนวณหาโมเมนต์ผลกกลับรอบจุดศูนย์กลางเรือที่เกิดขึ้น โดยที่โมเมนต์ผลกกลับนั้นจะช่วยรักษาเสถียรภาพในการลอยตัวของเรือแบบสองท่อนเมื่อปะทะกับคลื่นในแม่น้ำหรือลำคลอง นอกจากนั้นยังพิจารณาหามุมเอียงสูงสุดของเรือแบบสองท่อนก่อนที่ท่อนด้านใดด้านหนึ่งจะจมมิดผิวน้ำ จากการคำนวณจะได้ที่มุมเอียงสูงสุดเท่ากับ 6 องศา จากสถานะสมดุลที่กัปเรืออยู่สูงจากผิวน้ำเป็นระยะ 5 cm ซึ่งมุมเอียงสูงสุดนั้นแสดงด้วยแถบสีแดงในตาราง

ตารางที่ ก.2 แสดงความสัมพันธ์ของความลาดเอียงระหว่างสองท่อนและ โมเมนต์ที่เกิดขึ้น (ที่ความสูงปกติ 5 cm จากผิวน้ำ)

Slope (Degree)	Total Submerge Volume (m <sup>3</sup> )		Buoyancy Force(N)		Difference between 2 bouy		Moment about O (N.m )
	Left	Right	Left	Right	Force (N)	Load (kg)	L =0.761238 m
0.0	0.13619	0.13619	1336.087	1336.087	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
0.5	0.14336	0.12885	1406.400	1264.040	<b>0.00186</b>	<b>18.285</b>	<b>1.864</b>
1.0	0.15060	0.12158	1477.398	1192.757	<b>0.00776</b>	<b>76.108</b>	<b>7.758</b>
1.5	0.15793	0.11442	1549.312	1122.482	<b>0.01793</b>	<b>175.846</b>	<b>17.925</b>
2.0	0.16533	0.10746	1621.944	1054.256	<b>0.03212</b>	<b>315.104</b>	<b>32.121</b>
2.5	0.17282	0.10069	1695.449	987.797	<b>0.04791</b>	<b>470.035</b>	<b>47.914</b>
3.0	0.18045	0.09405	1770.291	922.719	<b>0.06472</b>	<b>634.949</b>	<b>64.725</b>
3.5	0.18795	0.08754	1843.884	858.865	<b>0.08248</b>	<b>809.131</b>	<b>82.48</b>
4.0	0.19284	0.08115	1891.776	796.147	<b>0.10125</b>	<b>993.252</b>	<b>101.249</b>
4.5	0.19556	0.07487	1918.539	734.507	<b>0.12140</b>	<b>1190.91</b>	<b>121.398</b>
5.0	0.19693	0.06869	1931.884	673.916	<b>0.14245</b>	<b>1397.429</b>	<b>142.449</b>
5.5	0.19769	0.06262	1939.403	614.363	<b>0.16417</b>	<b>1610.52</b>	<b>164.171</b>
6.0	0.19795	0.05666	1941.949	555.871	<b>0.18655</b>	<b>1830.068</b>	<b>186.551</b>



ภาพที่ ก.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงลอยตัวเรือสองท่อน ณ ระดับความลาดเอียงต่างๆ



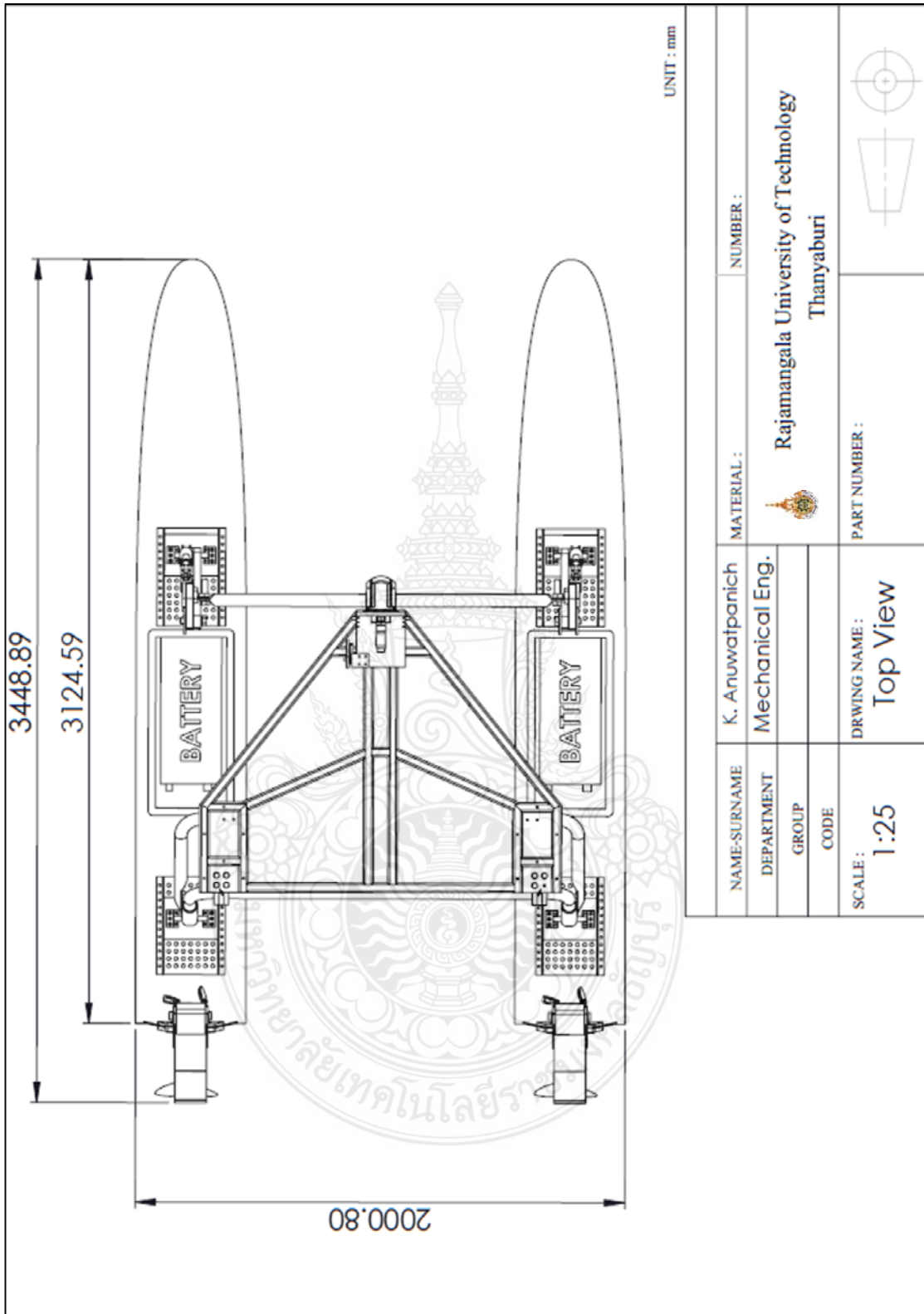
ภาพที่ ก.4 แสดงการโคลงของหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่นจากระดับปกติถึงมุมเอียงสูงสุด



ภาคผนวก ข

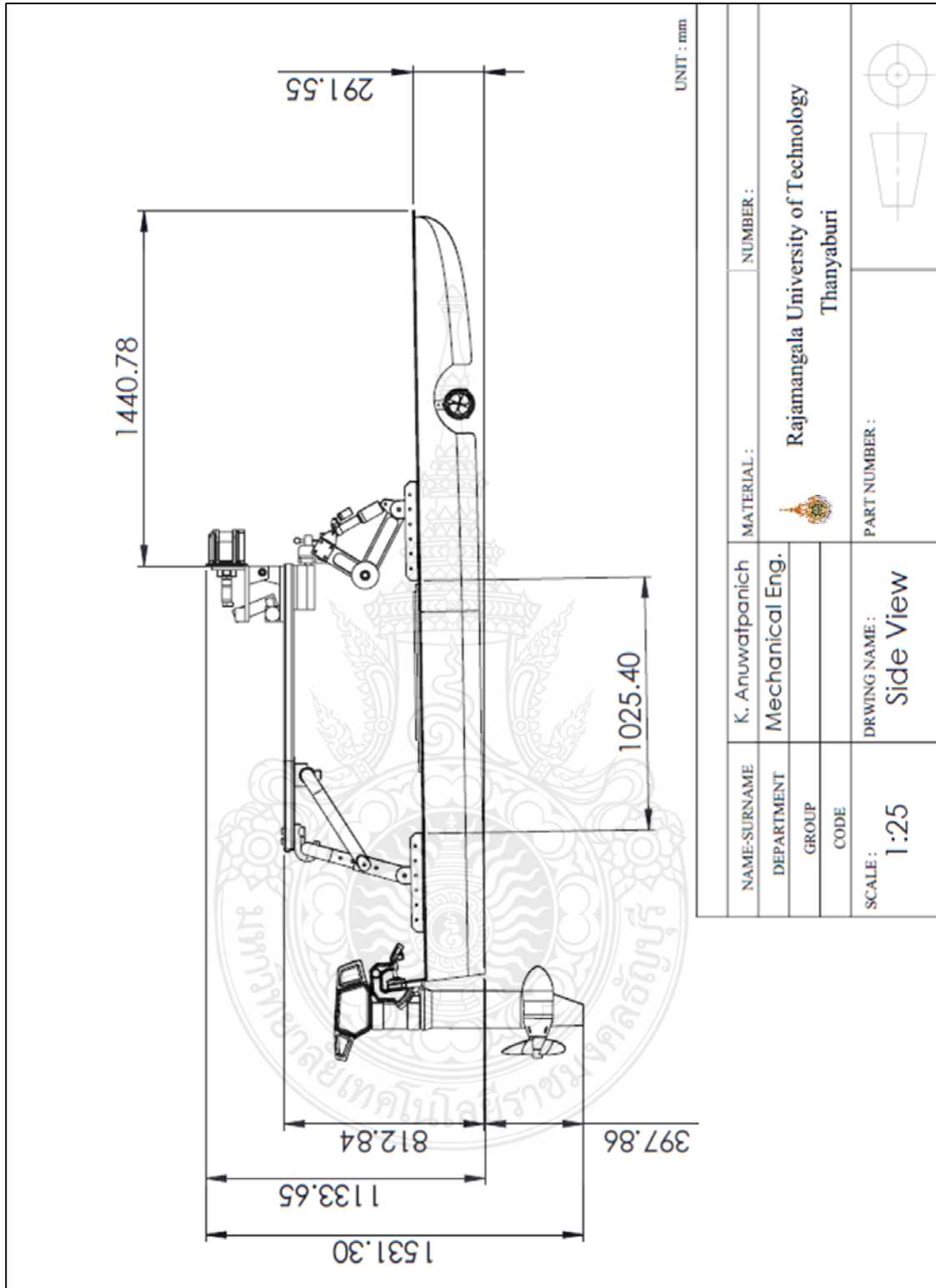
แบบโครงสร้างของ

หุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น

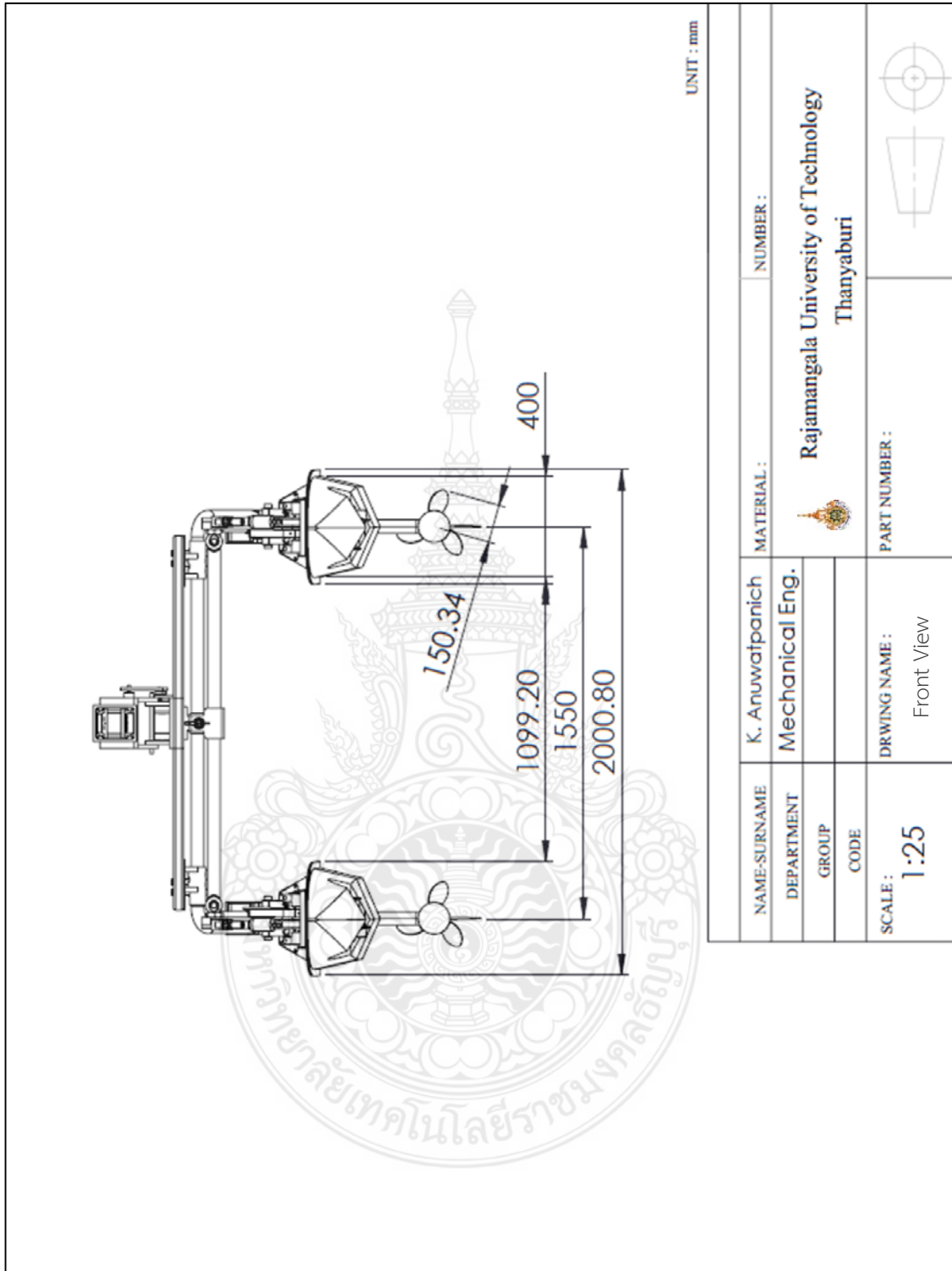


ภาพที่ ข.1 ภาพฉายมุมมองด้านบนของหุ่นยนต์เรือสองล้อแบบปรับตัวตามคลื่น

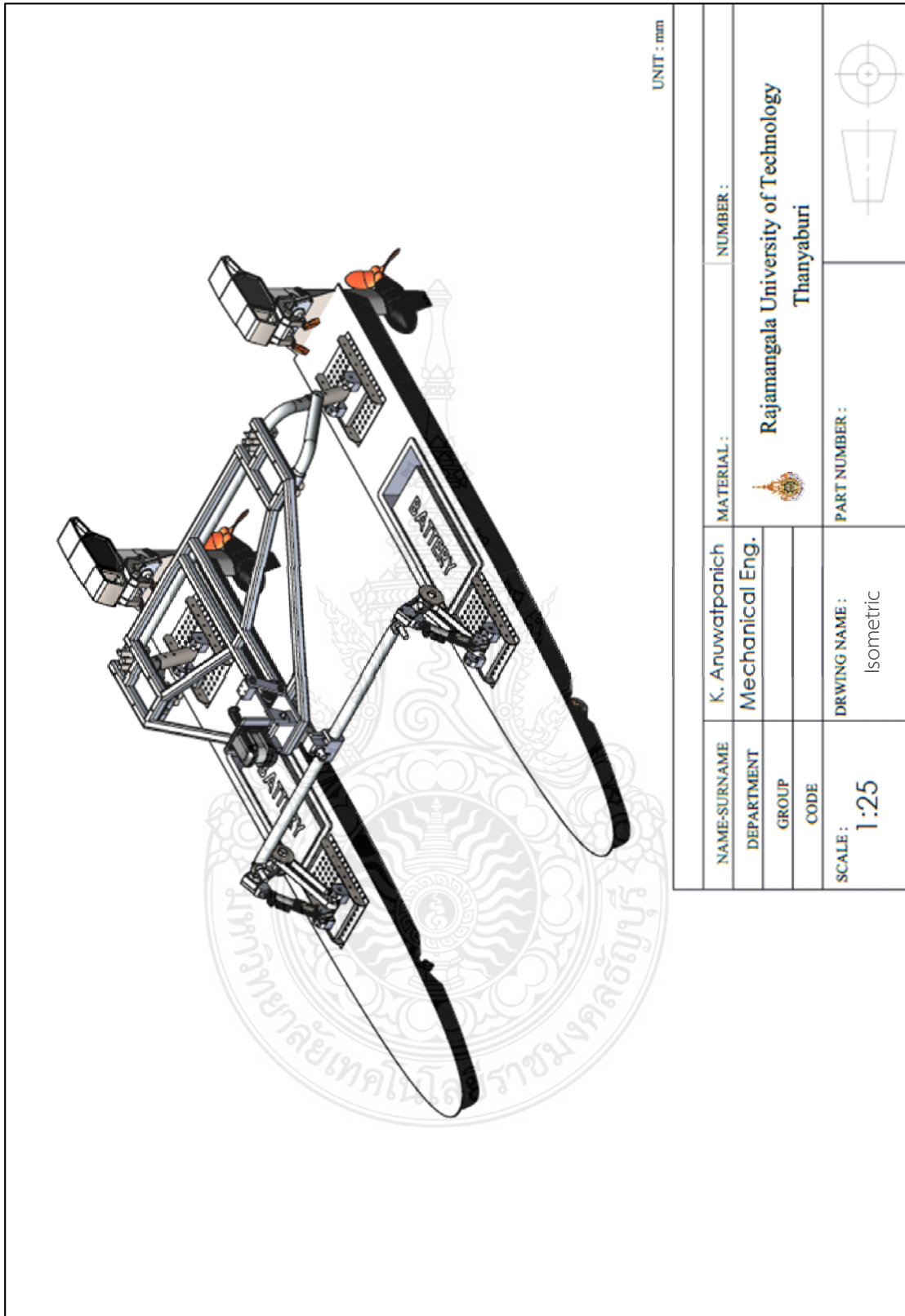




ภาพที่ ข.2 ภาพฉายมุมมองด้านข้างของหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น



ภาพที่ ข.3 ภาพฉายมุมมองด้านหน้าของหุ่นยนต์เรือสองท่อนแบบปรับตัวตามคลื่น



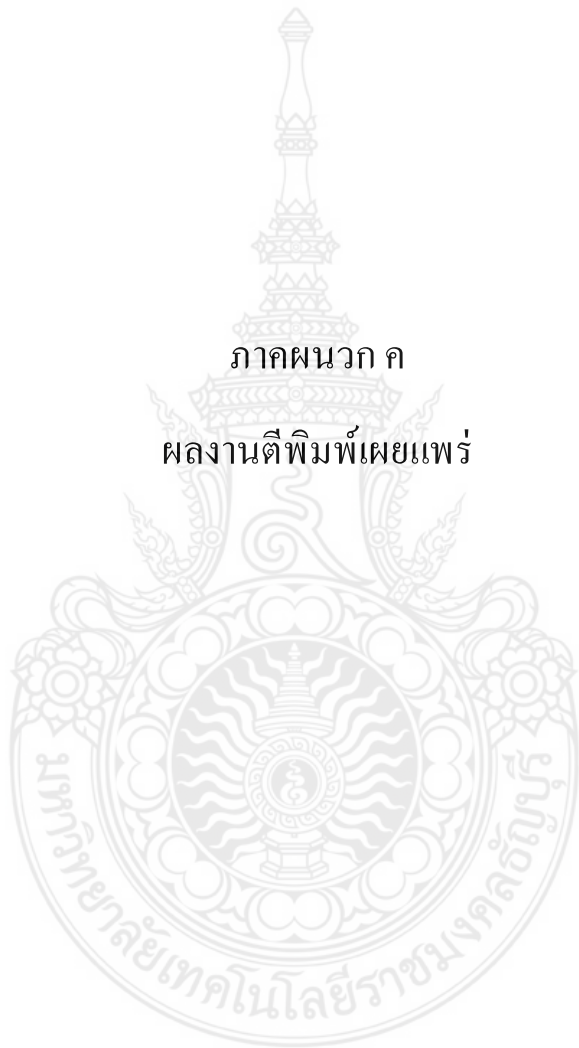
UNIT : mm

NAME-SURNAME	K. Anuwatpanich	MATERIAL :	NUMBER :
DEPARTMENT	Mechanical Eng.	Rajamangala University of Technology Thanyaburi	
GROUP		PART NUMBER :	
CODE			
SCALE :	1:25	DRAWING NAME :	Isometric

ภาพที่ ข.4 ภาพไอโซเมทริกของหุ่นยนต์เรือสองล้อแบบปรับตัวตามคลื่น

ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





## SESSIONS

## AUTHORS

## STUDENT POSTERS

## SEARCH



### Proceedings of 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO) Conference & Exhibition

Copyright and Reprint Permission: Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries are permitted to photocopy beyond the limit of U.S. copyright law for private use of patrons those articles in this volume that carry a code at the bottom of the first page, provided the per-copy fee indicated in the code is paid through Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923. For reprint or republication permission, email to IEEE Copyrights Manager at [pubs-permissions@ieee.org](mailto:pubs-permissions@ieee.org). All rights reserved. Copyright ©2018 by IEEE.

IEEE Catalog Number: CFP18OCF-DVD  
ISBN DVD: 978-1-5386-1653-6

Additional copies of this publication are available from:

IEEE Operations Center, P.O. Box 1331, 445 Hoes Lane  
Piscataway, NJ 08855-1331 USA  
Tel: +1 800 678 IEEE, +1 732 981 1393, Fax: +1 732 981 9667  
email: [conference-ops@ieee.org](mailto:conference-ops@ieee.org)

Adobe and Acrobat are trademarks of Adobe Systems Incorporated or its subsidiaries and may be registered in certain jurisdictions.

Produced by: Veraprise Incorporated, P. O. Box 949 Front Royal, VA 22630 USA  
[www.veraprise.com](http://www.veraprise.com) - [ebusiness@veraprise.com](mailto:ebusiness@veraprise.com)



## SESSIONS / PAPERS

### Unmanned Surface Vehicle 2

Thursday, 13:30 - 15:10 | Room: Room 501

---

#### **Automated Recovery of the UUV based on the Towed system by the USV**

Haitao Gu<sup>1</sup>; Lingshuai Meng<sup>1</sup>; Guiqiang Bai<sup>1</sup>; Haiting Zhang<sup>1</sup>; Yang Lin<sup>2</sup>; Shuang Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences

<sup>2</sup>Shenyang Institute of Automation

#### **Control-law for Oil Spill Mitigation with an Autonomous Surface Vehicle**

Diogo Pedrosa; André Dias; Alfredo Martins; José Almeida; Eduardo Silva

INESC TEC

#### **Vibration Suppression for Unmanned Catamaran**

Khunakon Anuwatpanich<sup>1</sup>; Pradya Prempraneerach<sup>1</sup>; Sirod Sirisup<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rajamangala University of Technology Thanyaburi

<sup>2</sup>National Electronics and Computer Technology Center

#### **Unmanned surface vehicle for managing parallel cruising of a multiple AUVs**

Yuya Nishida<sup>1</sup>; Kazunori Nagano<sup>2</sup>; Junichi Kojima<sup>3</sup>; Hitoshi Kakami<sup>4</sup>; Saori Yokota<sup>5</sup>; Takeshi Ohki<sup>6</sup>;

Takeshi Nakatani<sup>6</sup>; Blair Thornton<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kyushu Institute of Technology

<sup>2</sup>Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

<sup>3</sup>KDDI R&D Laboratories

<sup>4</sup>Mitsui E&S Shipbuilding Co., Ltd.

<sup>5</sup>National Maritime Research Institute

<sup>6</sup>JAMSTEC

# Vibration Suppression for Unmanned Catamaran

Khunakon Anuwatpanich, Pradya Prempraneerach  
Department of Mechanical Engineering  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Pathumthani, Thailand  
khunakon\_a@mail.rmutt.ac.th, pradya.p@en.rmutt.ac.th

Sirod Sirisup  
National Electronics and Computer Technology Center  
Pathumthani, Thailand  
sirod.sirisup@nectec.or.th

**Abstract**—Vibration suppression system using two hybrid oil-gas DBAir shock absorbers and a roll-balancing front connecting bar is designed for a 3-m unmanned carbon-fiber catamaran, equipped with a laser scanner on the top platform. To measure actual accelerations of both catamaran hulls and top platform, two accelerometers are employed; however, gravitational acceleration must be eliminated from acceleration signals to capture pure structural acceleration/vibration. Moreover, adjustable spring stiffness and damper coefficients of the DBAir shock absorber are experimentally measured at various valve settings. Thus, natural frequency and damping ratio of a lumped-parameter base-excitation model of single shock absorber exhibits overdamped characteristics of the designed vibration suppression system. Experimental manual excitations at one hull at low frequency of 1-Hz and at high frequency of 2-Hz show acceleration/vibration reduction of the top platform by half according to both acceleration time-series signals and Power Spectrum Density (PSD) estimation in frequency-domain analysis. Using frequency-domain analysis, PSD of the top-platform vibration shows much smaller amplitude than that of the catamaran hull in wide-frequency range, when there exists hydrodynamic wave excitation at catamaran-hull with frequency of around 1 Hz. In cruising operation with small impact wave, acceleration time series reveals more than 60%-70% vibration reduction of the top laser-scanner platform comparing to the hull motion.

**Keywords**—Unmanned Catamaran; Vibration Suppression; Based Excitation; Acceleration Time Series; Power Spectrum Density

## I. INTRODUCTION

Survey surfaced vessels have been developed to collect hydrographical data such as reservoir bank height for bank erosion monitoring using a mobile laser scanner, installed on top of motorboat [1], and canal/river depth combining with bank height for bathymetry map using an echo sounder and two laser scanners installed on both sides of catamaran [2]. Furthermore, a 33-ft Wave-Adaptive Modular Vessel (WAM-V) [3] is designed to be equipped with 2 different suspension arrangements and with sensor arrays for motion measurement such that the effect of wave impact force on its payload tray and pontoon dynamic-motions could be studied. Then, the acceleration and displacement of WAM-V top payload tray, obtained from accelerometer and potentiometer are evaluated both in laboratory dynamic testing and in different sea trails. With balancing dual stroke ratio of suspension system on both

hulls, significant payload-tray vibration reduction upto 60% can be achieved in sea condition with 4-ft wave.

Maneuverability and control of an autonomous WAM-V for ocean observation are analyzed based on kinematic model of WAM-V combined with and hydrodynamic equation [4]. Moreover, power spectrum of accelerometers' signal could help classifying influences of vehicle motion, wave turbulence at different frequency ranges, as demonstrated in data analysis from measurement probe, installed on Autonomous Underwater Vehicle (AUV) [5] such that survey of ocean flow could be performed more accurately.

Vibration suppression systems for 3-m catamaran using two hybrid oil-gas shock absorbers and a pivot front connecting bar for roll balancing between two hulls is designed and constructed to decrease vibration of the laser-scanner platform on top of the catamaran that will be equipped with a forward-looking laser scanner. First, catamaran structure, its motion constraints, and onboard instruments are described in Section II. Second, a lumped-parameter model of a base excitation and its associated Power Spectrum Density estimation for vibration analysis in the frequency-domain are explained in Section III. Section IV describes the first experimental test for evaluating parameters of the DBAir shock absorber: 1) damper coefficient ( $c$ ) from oil and 2) spring stiffness ( $k$ ) from air, thus system natural frequency and damping ratio can be estimated for a given laser-scanner top-platform mass. To capture actual acceleration/vibration suppression, two accelerometers, installed on catamaran hull and laser-scanner platform, must be calibrated and compensated for gravitational acceleration. Then, vibration reductions of the laser-scanner platform are validated experimentally from acceleration time-series signal and its corresponding PSD estimation, when manual excitations as well as hydrodynamic excitations from transverse and gravity wave are applied on the catamaran hull. Lastly, the autonomous waypoint tracking capability of this unmanned catamaran reveals its dynamic motion performance.

## II. CATAMARAN STRUCTURE

Motion of catamaran has 5 Degree Of Freedom (DOF): two translations (surge- $x$  and heave- $z$ ) and three orientations (roll- $\phi$ , pitch- $\theta$ , yaw- $\psi$ ) in a local coordinate frame ( $XYZ_0$ ), measured with respect to the tangential coordinate frame ( $XYZ_n$ ), as shown in Fig. 1. Since, the catamaran has a symmetry plane paralleling with its forward motion, thus its

sway motion can be neglected [ 5] . The heave and pitch motions are a main focus of this research study.

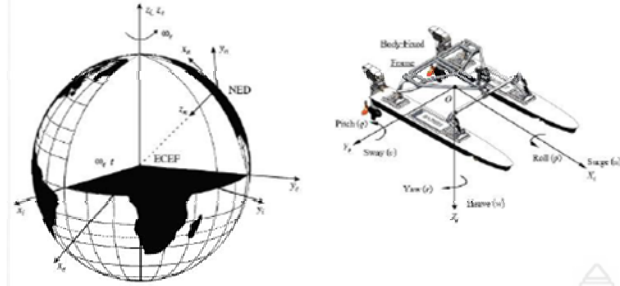


Fig.1 Earth-fixed and body-fixed reference frames for defining catamaran motion.

#### A. Equipments of Surface Vessel

The 3-m catamaran is designed to be equipped with dual hybrid gas-oil Double-Barrel (DB) Air shock absorber from Cane Creek [ 7] in the front section of each carbon-fiber hull, which allow independent pitching motion for each hull. The bottom of these two shock absorbers is pivoted on a steel plate, inserted inside the top of carbon-fiber hull. However, a vertical length of a designed back-cross bar and a stroke of both DBAir shock absorbers constrain a forward motion of the laser-scanner top platform along the x-axis, thus laser scanner based platform can maintain parallel motion with water level. Therefore, vibration of laser-scanner top platform can be reduced when hydrodynamic wave induces vibration on both hulls. Moreover, main propulsion of this unmanned catamaran employs two Torqeedo cruise 2.0 outboards that can deliver maximum thrust of 115 lbf, The main source of electrical power is from two packs of 24 VDC lead-acid batteries, placed inside the middle section of each hull, so that lower center of mass of vehicle can provide good floatation stability.

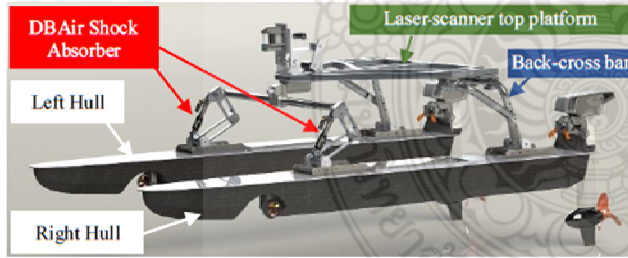


Fig.2 Components of a designed unmanned Catamaran

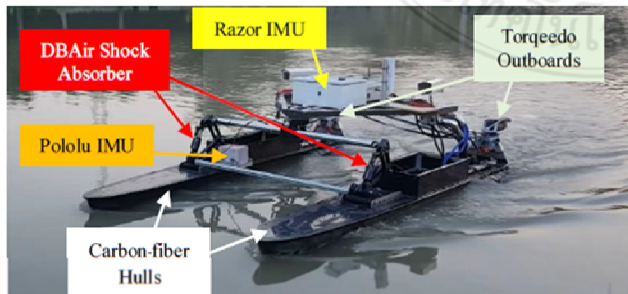


Fig.3 Equipment and instruments of constructed unmanned Catamaran

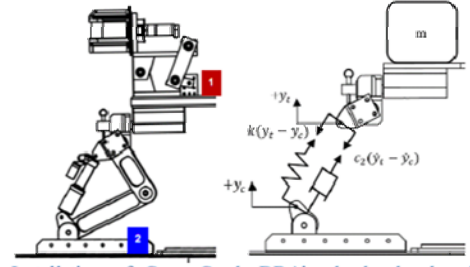


Fig.4 Installation of Cane Creek DBAir shock absorber between the catamaran hull and laser-scanner top platform (Left) and the lumped-parameter model of the shock absorber as spring ( $k$ ) and damper ( $c$ ) in parallel for analyzing heave-motion ( $h$ ) reduction with the hull-base excitation ( $y_c$ ).

#### B. Accelerometer Installation for Vibration Measurement of Shock Absorber

To measure vibration of the laser-scanner top platform against that of twin hulls, two gyro and accelerometer sensors : 1) a Pololu MiniIMU-9 v2 and 2) a 6-DOF Razor IMU, illustrated in Fig.5, are employed. The Razor 6-DOF IMU, located in a computer box, is positioned and used to capture vibration at the middle of the top platform, as denoted by number 1 in Fig. 4. The Pololu IMU, located inside a waterproof box and denoted by number 2 in Fig.4, is installed and used to measure vibration excitation of the left hull. A sampling rate ( $f_s$ ) of both sensors, measured by Arduino Due microcontroller, is 16 Hz. Local coordinate systems of both IMUs is aligned with the local coordinate of the catamaran in Fig.1, thus a gravitational acceleration ( $g$ ) points downward. Assuming that 3-axis accelerometer drift is insignificant within short-time interval; however, gravity is included in measured acceleration in 3-axis ( $a_x, a_y, a_z$ ) for an arbitrary catamaran motion. To examine only acceleration of the vessel structure, the gravity must be excluded from acceleration measurements of both IMU sensors. First, the gravity must be decomposed into 3-axis in  $XYZ_0$  frame using a three-dimensional rotation matrix ( $R_{xyz}$ ), expressed in Eq .(1), with zero yaw angle ( $\alpha = 0$ ) when two orientation angles : roll ( $\phi$ ) and pitch ( $\theta$ ) angles are calculated from 3-axis accelerations, described in Eq .(2).

$$g_{xyz} = R_{xyz}(\phi, \theta, \psi) \cdot g \quad (1)$$

$$\text{or } g_{xyz} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi - c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( a_y / \sqrt{a_x^2 + a_z^2} \right) \text{ and } \theta = \tan^{-1} \left( -a_x / \sqrt{a_y^2 + a_z^2} \right) \quad (2)$$

Second, gravitational acceleration components ( $g_{xyz}$ ) are then subtracted from 3-axis filtered acceleration ( $a_x, a_y, a_z$ ), thus the 3-axis acceleration ( $\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z$ ) of the catamaran hull and laser-scanner top platform can be obtained from Pololu and Razor IMU, respectively.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย คุณากร อนุวัตพานิชย์
วัน เดือน ปีเกิด	25 ธันวาคม 2535
ที่อยู่	40 หมู่ 8 ตำบลศรีสุราษฎร์ อำเภอดำเนินสะดวก จังหวัดราชบุรี 70130
การศึกษา	
พ.ศ. 2558	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2559 – 2561	ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	082 362 5472
E-mail	khunakon.a@mail.rmutt.ac.th

