

การควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือคายัคตามจุดพิกัดที่กำหนด

## POSITION-TRACKING CONTROL OF KAYAK BOAT



กิตต์เฉลิม ธรรมไชยธรรมศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# การควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือคายัคตามจุดพิกัดที่กำหนด

กิตต์เฉลิม ธรรมไชยธรรมศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือคายัคตามจุดพิกัดที่กำหนด
ชื่อ – นามสกุล	นายกิตต์เฉลิม ธรรมไชยธรรมศ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์
ปีการศึกษา	2554

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างการควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือคายัคให้เคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนด โดยใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะซึ่งนำไปประยุกต์ใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการพลศาสตร์ของเรือ และสร้างระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ (Full-State Feedback Control) ที่ใช้ร่วมกับเทคนิคการประมาณค่าตัวแปรสถานะ (Observer) เพื่อไปประยุกต์ใช้กับเรือคายัคจริง

ในการทดสอบระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเรือคายัคได้ประยุกต์ใช้ร่วมกับ เทคนิคการประมาณค่า 2 แบบคือ 1) Full-Order Observer และ 2) Reduced-Order Observer ซึ่งการประมาณค่าตัวแปรสถานะทั้งสองแบบ สามารถทนต่อสัญญาณรบกวนภายนอกได้ตามค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์จริง และทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของเรือคายัค ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเรือลำอื่นได้ ในส่วนของการประยุกต์ใช้งานจริงกับเรือคายัคจริงที่ยาว 3.85 m โดยตัวแปรสถานะของเรือคายัคจริงทั้งตำแหน่งและทิศทาง และอัตราเร็วของหัวเรือ นั้น ได้รับสัญญาณจาก GPS และ IMU ตามลำดับ โดยในการทดลองได้ทดสอบกำหนดจุดพิกัดการเคลื่อนที่เป็นแบบวงกลมและแบบรูปตัว (S) กลับด้านหรือแบบตาราง

จากผลการทดลองเรือคายัคจริง จะเห็นว่าเรือเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนดไว้ได้ แต่ความแม่นยำในการเคลื่อนที่เข้าหาจุดที่กำหนดไว้ของเรือที่ทดสอบมีความแม่นยำน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องมาจากเราไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ของเรือคายัคจริงที่แน่นอน ซึ่งสามารถปรับปรุงการเคลื่อนที่ของเรือ ให้มีความแม่นยำมากขึ้นได้ โดยการปรับค่าคงที่ของระบบป้อนกลับ

**คำสำคัญ :** พลศาสตร์ของเรือคายัค การเคลื่อนที่ตามจุดพิกัด การป้อนกลับตัวแปรสถานะ ตัวสังเกตการณ์เพื่อการประมาณค่า

<b>Thesis Title</b>	Position-Tracking Control of Kayak Boat
<b>Name - Surname</b>	Mr. Kitchalerm Thamchaitas
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Pradya Prempraneerach
<b>Academic Year</b>	2011

## ABSTRACT

In this research, motion controller is designed and constructed for a kayak boat to track the determined positions by using a state-variable feedback-control system. First, this controller is applied to control a mathematical model of the kayak boat dynamics. Second, this full-state feedback controller combining with an observer estimator is applied to control the real kayak boat.

In position-tracking control tests with dynamics model of kayak boat, the state variable feedback controller is employed with two types of the observer estimators 1) Full-Order Observer and 2) Reduced-Order Observer. Both of these observers can still perform well in the presence of the external sensor noise varying within the range of actual sensors and of the difference kayak hydrodynamic parameters. This implies that this controller can be applied to other boats as well. In the real application with 3.85-meters long kayak boat, states including position and boat heading and rate of heading are feedbacked from GPS and IMU sensors, respectively. Two experimental tests are set up for waypoints of a circular pattern and a reverse S shape or grid pattern.

Actual tested results with the real kayak show that position tracking accuracy of the real kayak is less than that of the dynamics simulation of the mathematical kayak model because the actual kayak hydrodynamics parameters are unknown. To improve the position tracking accuracy, we can further adjust pole positions or gains of the feedback system such that a better performance can be achieved.

**Keywords :** Kayak dynamics, way point-tracking, state variable feedback controller, observer estimator

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.ปรัชญา เปรมปราณี รัชต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.มนูศักดิ์ จานทอง ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ ดร.ปายาณ กุลวานิช ผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ความอนุเคราะห์ และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ในปี 2552 และ 2554 ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ช่วยให้คำปรึกษา และถ่ายทอดเทคนิคในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ขอสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลาย และคุณพระศรีรัตนตรัย จงดลบันดาลให้ทุกท่านจงประสบแต่ความสุขสมหวังตลอดไป

กิตต์เฉลิม ธรรมไชยธรรมศ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของ โครงการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สมการทางพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของเรือด้วยพอดพรอเพาส์ชั้นที่นำมาวิเคราะห์.....	4
2.2 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะทุกตัว.....	8
2.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะทุกตัวร่วมกับ Observer Estimator.....	13
2.4 การลดลำดับชั้น(Reduce Order)ของเทคนิคการประมาณค่าตัวแปรสถานะ.....	14
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	17
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	17
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน.....	18
3.3 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	22
4 ผลการวิจัย.....	38
4.1 ผลการจำลองใน MATLAB/Simulink.....	38
4.2 ผลการทดสอบแรง เมื่อพอดพรอเพาส์ชั้น หมุนไปที่มุมต่างๆ.....	48
4.3 ผลการทดสอบเรือจริง.....	49

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการวิจัย.....	51
5.1 สรุปผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
รายการอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก.....	55
ประวัติผู้เขียน.....	66



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การแปลรหัสสัญญาณของ GPS ของ Topcon รุ่น Hiper G-Serie.....	21
3.2 ข้อมูลคุณสมบัติของ Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2.....	22
4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer จากระบบของเรือที่ใช้ในการวิจัยนี้เฉพาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	44
4.2 เปรียบเทียบ Error $\begin{bmatrix} y \\ b \end{bmatrix}$ ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer เมื่อมีสัญญาณรบกวน.....	47
4.3 เปรียบเทียบ Error $\begin{bmatrix} y \\ b \end{bmatrix}$ ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer เมื่อพารามิเตอร์ของเรือเพิ่มจาก 0% ถึง 50%.....	48
4.4 แรงที่เกิดจากพอดพรอเพาส์ชั้น เมื่อหันพอดพรอเพาส์ชั้น ไปที่มุมต่างๆ.....	49





## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ที่ปรากฏในสมการทางพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของเรือด้วยพอดพรอเพาส์ชั้น.....	5
2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของเรือระหว่างจุดใดๆ.....	7
2.3 Full State Feedback Block Diagram.....	9
2.4 แผนภาพขณะเรือเคลื่อนที่อยู่นอกเส้นทาง.....	10
2.5 Close-Loop Pole-Zero ของ $d=1$ ถึง 15.....	11
2.6 Close-Loop Pole-Zero เมื่อ $d=4$ , $k_p=[0-0.15]$ และ $k_d=[0-0.3]$ .....	11
2.7 Close-Loop Pole-Zero เมื่อ $d=4$ , $k_p=[0-0.15]$ , $k_d=[0-0.3]$ และ $K_H=[0-0.004]$ .....	12
2.8 Block Diagram ของ Full-Order Observer.....	12
2.9 Block Diagram ของ Reduce-Order Observer.....	15
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	17
3.2 เรือ Atlantis12.....	18
3.3 การติดตั้ง พอดพรอเพาส์ชั้นและอุปกรณ์ควบคุม.....	18
3.4 แผนภาพการระบุตำแหน่งจากดาวเทียม 1ดวง 2ดวง และ3ดวง.....	20
3.5 Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2.....	21
3.6 การทำงานของตัวควบคุมหลัก.....	23
3.7 Block Diagram ของระบบการควบคุมแบบ Full-State Feedback Controller.....	24
3.8 Block Diagram ของระบบการควบคุมแบบ Reduce Order-State Feedback Controller.....	24
3.9 การเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ จากแนวเส้นตรงแรกไปยังแนวเส้นตรงที่สอง.....	25
3.10 การทำงานร่วมกันของโปรแกรมควบคุมที่สร้างขึ้น.....	26
3.11 Block-Diagram ของโปรแกรมรับค่าจาก GPS จาก Topcon รุ่น Hiper G-Serie.....	27
3.12 Front Panel การรับค่าจาก GPS.....	28
3.13 Block-Diagram ของโปรแกรมรับค่าจาก เซนเซอร์วัดมุมเอียง IMU.....	29
3.14 Front Panel รับค่าจาก จาก เซนเซอร์วัดมุมเอียง IMU.....	30
3.15 Block-Diagramในส่วนการประมาณค่าโดยใช้ Reduced-Order Observer.....	31
3.16 Block-Diagramในส่วนควบคุมหลัก.....	32
3.17 Front Panel ในส่วนควบคุมหลัก.....	33

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.18 Block-Diagramใน ส่วนควบคุมพอดพรอเพาส์ชั้น.....	34
3.19 Front Panel ใน ส่วนควบคุมพอดพรอเพาส์ชั้น.....	35
3.20 พิกัดจาก GPS และพิกัดบนแนวการเคลื่อนที่ของเรือ.....	36
3.21 การใช้ โปรแกรม GPS Distance Map.....	37
4.1 ผลตอบสนองของมุมของเรือกระทำกับพิกัดอ้างอิงแบบเฉลี่ย ( $\varphi$ ).....	38
4.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ แบบที่ 1 เป็นรูปร่างกลม.....	39
4.3 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ แบบที่ 2 เป็นแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นแบบ S หรือแบบ Grid .....	40
4.4 การเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปร่างกลม ในช่วงที่ 1.....	40
4.5 การเปลี่ยนแปลงของ ตัวแปรสถานะ: $\varphi, x_b, y_b$ .....	41
4.6 การเปลี่ยนแปลงของ $\varphi$ เทียบกับ $\hat{\varphi}$ .....	42
4.7 การเปลี่ยนแปลงของ $y_b$ เทียบกับ $\hat{y}_b$ .....	42
4.8 การเปลี่ยนแปลงของ $x_b$ เทียบกับ $\hat{x}_b$ .....	43
4.9 การเปลี่ยนแปลงของ $F_y$ เทียบกับ $F_{ycmd}$ .....	43
4.10 การเคลื่อนที่ของเรือจากจุดพิกัดที่ 1 ไป 2 โดยจำลองให้มี สัญญาณรบกวน IMU .....	45
4.11 ผลการตอบสนองของ $u, v, r, \varphi$ โดยจำลองให้มีสัญญาณรบกวน.....	45
4.12 เปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวน.....	46
4.13 เปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่เมื่อ พารามิเตอร์ของเรือค่ายคมีค่า เพิ่มขึ้น50%.....	47
4.14 การกำหนดมุมต่างๆที่ทำการวัดแรง.....	48
4.15 ผลการทดสอบเรือจริง ในการเคลื่อนที่แบบวงกลม.....	50
4.16 ผลการทดสอบเรือจริง ในการเคลื่อนที่แบบ Grid.....	50

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเข้าไปปฏิบัติงานในพื้นที่ที่เป็นอันตรายหรือมีสภาพที่ไม่ปลอดภัยโดยใช้นุษย์นั้น นับเป็นการเสี่ยงที่ควรหลีกเลี่ยง เช่น ในแม่น้ำที่เป็นพิษน้ำเสีย มีการรั่วไหลของสารเคมีอันตราย หรือ บริเวณที่มีอุณหภูมิสูง การหาทางควบคุมอุปกรณ์ให้เข้าไปปฏิบัติงานแทนมนุษย์ นับเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถพัฒนาให้เกิดขึ้นได้ การศึกษาการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ ของเรือในหัวข้อวิจัยนี้ก็เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาและสร้างอุปกรณ์เพื่อเข้าไปปฏิบัติงานในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง และสามารถทำงานได้เองเป็นเวลานาน

การขับเคลื่อนแบบ พอดพรอเพลส์ชัน (Podded Propulsion) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ใช้ขับเคลื่อนเรือ ปัจจุบันงานวิจัยที่ทำการศึกษการเคลื่อนที่ด้วย พอดพรอเพลส์ชันมอเตอร์ไฟฟ้า นั้นยังมีอยู่น้อย เนื่องจากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของเรือ โดย พอดพรอเพลส์ชันนั้นมีความซับซ้อนมาก งานวิจัยนี้จะศึกษาการใช้เทคนิคตัวประมาณค่า (Observer) และการป้อนกลับตัวแปรสถานะ (Full-State Feedback) ในการควบคุม แรงขับเคลื่อน ( $F_x$  และ  $F_y$ ) เพื่อใช้เป็น อินพุต ในการควบคุมการบังคับทิศทางของเรือ ให้เป็นไปตามจุดพิกัดที่กำหนด ในส่วนของ โปรแกรมควบคุมจะใช้ LabVIEW เป็นตัวประมวลผลการทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับและประมาณค่าตัวแปรสถานะเพื่อให้เรือคายัคที่ติดตั้งระบบควบคุมนี้ สามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ

การควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือที่ขับเคลื่อนแบบ พอดพรอเพลส์ชัน ให้เคลื่อนที่ไปตามจุดพิกัดที่กำหนด ได้อย่างแม่นยำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานสำรวจ งานสร้างแผนที่ และงานที่ต้องเข้าไปปฏิบัติในพื้นที่ที่ไม่ปลอดภัยแทนมนุษย์

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการออกแบบและสร้างระบบควบคุมแบบ Full-State Feedback ที่ทำงานร่วมกับ Observer Estimator ที่ประยุกต์ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของเรือคายัคให้เคลื่อนที่ไปตามพิกัดที่กำหนดไว้อย่างแม่นยำ

1.2.2 ทดสอบการควบคุมแบบ Full-State Feedback ร่วมกับ Observer Estimator กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และเปรียบเทียบกับเรือคายัคต้นแบบซึ่งขับเคลื่อน โดย พอดพรวดพาดส์ชั้น ให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนด

1.2.3 ศึกษาการรับสัญญาณ GPS และ IMU เพื่อนำมาใช้ป้อนกลับตำแหน่งพิกัดและทิศทางของหัวเรือสำหรับระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

1.2.4 ศึกษาการควบคุมแรงและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบพอดพรวดพาดส์ชั้นเพื่อใช้ขับเคลื่อนเรือคายัค

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 เรือคายัค รุ่น Atlantis12 ซึ่งมีรายละเอียดคือ เรือยาวไม่เกิน 4m กว้างไม่เกิน 1m น้ำหนักรวมไม่เกิน 100kg

1.3.2 พอดพรวดพาดส์ชั้นสามารถขับเคลื่อนเรือคายัคให้มีความเร็วไม่เกิน 1m/s สามารถปฏิบัติงานต่อเนื่องได้นานไม่เกิน 3 ชั่วโมงโดยใช้แบตเตอรี่ 12V

1.3.3 ใช้เทคนิค Full-State Feedback ร่วมกับ Observer Estimator ในการ ควบคุมแรงขับเคลื่อนในทิศทาง X และ Y ( $F_x$  และ  $F_y$ ) ของพอดพรวดพาดส์ชั้น

1.3.4 ประดิษฐ์โปรแกรมสำหรับอ่านค่า เซนเซอร์วัดตำแหน่ง GPS(Global Positioning System) จาก Topcon รุ่น Hiper G-Serie โดยใช้โปรแกรม LabVIEW

1.3.5 ประดิษฐ์โปรแกรมสำหรับอ่านค่า เซนเซอร์วัดมุมเอียง IMU (Inertia Measurement Unit) จาก Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2 โดยใช้โปรแกรม LabVIEW

1.3.6 ประดิษฐ์โปรแกรมสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือคายัคให้เป็นไปตามจุดพิกัดที่กำหนดได้อย่างแม่นยำโดยใช้โปรแกรม LabVIEW

### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1.4.1 ศึกษาการจำลองสมการการเคลื่อนที่ของเรือคายัคทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

1.4.2 ศึกษาการติดตั้ง พอดพรวดพาดส์ชั้นกับเรือคายัค และการควบคุมการหมุนของใบพัดและการบังคับเลี้ยว

1.4.3 ศึกษาและออกแบบการทดสอบ GPS และ IMU เพื่อวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่และทิศทางของหัวเรือตามลำดับ โดยพิจารณาคูณลักษณะของเซนเซอร์ทั้งสองในเรื่องความแม่นยำและสัญญาณรบกวนจากภายนอก

1.4.4 ศึกษาการประยุกต์ใช้ เทคนิค Full-State Feedback ร่วมกับ Observer ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือให้เป็นที่ไปตามจุดพิกัดที่กำหนด

1.4.5 จำลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือค้ายัคในโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4.6 สร้างระบบควบคุมในโปรแกรม LabVIEW เพื่อประยุกต์ใช้กับเรือค้ายัคจริง

1.4.7 ทำการวัดผลการเคลื่อนที่จริงแล้วนำไป เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในข้อที่ 1.4.1 เพื่อปรับปรุงแก้ไข

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เป็นฐานความรู้ที่เกี่ยวข้องกับ ระบบควบคุม การเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนด

1.5.2 พัฒนาทักษะในการออกแบบตัวควบคุมและการเชื่อมโยงอุปกรณ์ในการควบคุม

1.5.3 ผู้ที่สนใจในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา และนำเทคโนโลยี ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนด ไปประยุกต์ใช้จริง



## บทที่ 2

### วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ เป็นหัวข้อสำคัญในงานวิจัยด้าน Motion Control ซึ่งอาจแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือการจำลองระบบทางพลศาสตร์ (Dynamic System Modeling) และการควบคุมการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนด (Trajectory Tracking) โดย Jeffrey W. Stettler [1] ได้ศึกษาพลศาสตร์ (Dynamics) ของ Azimuthing Podded Propulsion โดยได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเรือคายัคไว้ นอกจากนี้ Matthew B. Greytak [2] ได้ศึกษา การควบคุมแบบ Path Following สำหรับเรือคายัค โดยใช้ Azimuthing Podded Propulsion โดยได้ออกแบบระบบควบคุมแบบ PID ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือคายัคตามเส้นทางที่กำหนดและ M. Bibuli [3] ได้นำเสนอระบบควบคุม โดยการ Stabilized Error Variable ให้เป็นศูนย์ เพื่อควบคุมเรือให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด โดยเขาได้ประยุกต์สร้างตัวควบคุมให้กับเรือ Charlie USV (Unmanned Surface Vehicle)[4] ซึ่งพัฒนาโดย CNR-ISSIA

ในงานวิจัยนี้จำลองการเคลื่อนที่ของเรือคายัค ซึ่งเป็นยานพาหนะผิวน้ำ (Surface Vehicle) โดยใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับหรือ Full-State Feedback Control ร่วมกับ Observer และจะจำลองการเคลื่อนที่ของเรือให้เป็นไปตามจุดต่างๆที่กำหนดไว้ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และนำโปรแกรมมาแปลงเป็นภาษา LabVIEW เพื่อประยุกต์ใช้งานกับเรือคายัคจริง เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ตามพิกัดที่กำหนด

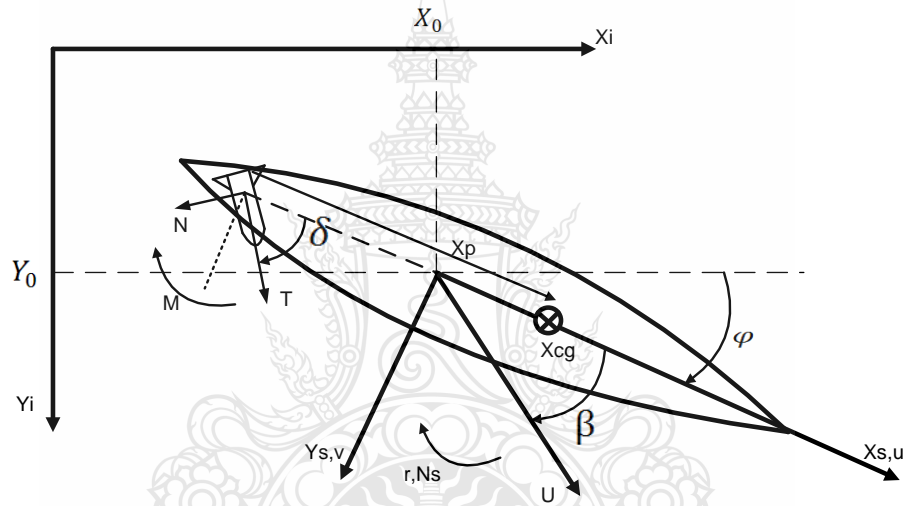
#### 2.1. สมการทางพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของเรือด้วยพอดพรอเพาส์ชั้นที่นำมาวิเคราะห์

ในการศึกษาควบคุมอัตโนมัติ สิ่งแรกๆที่ต้องคำนึงถึงคือพลศาสตร์ของระบบที่เราจะทำการออกแบบตัวควบคุม ปี 2004 Jeffrey W. Stettler [1] ได้แสดงสมการทางพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของเรือด้วยพอดพรอเพาส์ชั้นซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าเป็นเคลื่อนที่บนผิวน้ำในระนาบ X-Y ดังแสดงในสมการที่ 2.1 โดยตัวแปรต่างๆได้แสดงรายละเอียดในภาพที่ 2.1

$$\left. \begin{aligned}
 m(\dot{u} - rv - x_{cg}r^2) &= X_0 + X_u\dot{u} + X_u\Delta u + X_{uu}\Delta u^2 + X_{uuu}\Delta u^3 + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X_{vvv}v^2\Delta u + \\
 &X_{rrr}r^2\Delta u + X_{vr}vr + X_{vru}vr\Delta u + F_{xp} + (\text{inter. terms}) \\
 m(\dot{v} + ru + x_{cg}r^2) &= Y_0 + Y_{0u}\Delta u + Y_{0uu}\Delta u^2 + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_vv + Y_{vvv}v^3 + Y_{r^2}r^2 + Y_{rr}r^2 + Y_{vrr}vr^2 + \\
 &Y_{vu}v\Delta u + Y_{vuuv}\Delta u^2 + Y_{rvv}rv^2 + Y_{ru}r\Delta u + Y_{ruu}r\Delta u^2 + F_y + (\text{inter. terms}) \\
 I_z\dot{r} + mx_{cg}(\dot{v} + ru) &= N_0 + N_{0u}\Delta u + N_{0uu}\Delta u^2 + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_rv + N_{rr}r^2 + N_{vvv}v^3 + N_{vrr}vr^2 + \\
 &N_{vu}v\Delta u + N_{vuuv}\Delta u^2 + N_{rrr}r^3 + N_{rvv}rv^2 + N_{ru}r\Delta u + N_{ruu}r\Delta u^2 + x_pF_y + M + (\text{inter. terms})
 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

$(\Delta u \equiv u - u_0)$

$X_i, Y_i$  = พิกัดอ้างอิงที่ไม่เคลื่อนที่  $X_s, Y_s$  = พิกัดอ้างอิงของเรือที่เคลื่อนที่ไปกับเรือ



ภาพที่ 2.1 รายละเอียดของตัวแปรต่างๆที่ปรากฏในสมการทางพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของเรือด้วยพอดพรอเพาส์ชั้น

โดยที่

- $m$  = น้ำหนักของเรือ (kg)
- $I_z$  = โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน z (kg.m<sup>2</sup>)
- $X_{cg}$  = จุดศูนย์กลางของมวล (m)
- $X_p$  = ระยะจากจุดศูนย์กลางของมวลของเรือไปถึงแกนเพลของพอดพรอเพาส์ชั้น (m)
- $U$  = เวกเตอร์ความเร็วเรือ (m/s)
- $u$  = ความเร็วในพิกัด x (m/s)
- $v$  = ความเร็วในพิกัด y (m/s)

$r$	= ความเร็วเชิงมุมรอบแกน z	(m/s)
$\varphi$	= มุมของเรือกระทำกับพิกัดอ้างอิงแบบเฉื่อย (earth-fixed frame)	(degree)
$\delta$	= มุมที่พอดพรอเพาส์ชั้นกระทำกับพิกัดที่เคลื่อนที่ไปกับเรือ (vehicle-fixed frame)	(degree)
$\beta$	= มุมความเร็วเรือที่เบี่ยงเบนจากพิกัดที่เคลื่อนที่ไปกับเรือ (vehicle-fixed frame)	(degree)
$F_x$	= แรงในพิกัด x จากพอดพรอเพาส์ชั้น	(N)
$F_y$	= แรงในพิกัด y จากพอดพรอเพาส์ชั้น	(N)
$N$	= แรงกระทำตั้งฉากกับพอดพรอเพาส์ชั้น (Normal Force)	(N)
$M$	= โมเมนต์ที่เกิดจากพอดพรอเพาส์ชั้น	(N.m)

จากสมการ 2.1 ซึ่งแสดงพลศาสตร์ของเรือที่เคลื่อนที่ในระนาบ 2 มิติ แรง  $F_y$  คือแรงด้านข้างที่เกิดขึ้นโดย พอดพรอเพาส์ชั้น  $M$  คือ Moment รอบพอดพรอเพาส์ชั้นจะเห็นว่าสมการ 2.1 มีลักษณะเป็น ไม่เชิงเส้น ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบที่เป็นไม่เชิงเส้น จะมีความยากและซับซ้อนมาก หากต้องการลดความซับซ้อนในการแก้สมการเราสามารถ Linearize สมการ 2.1 รอบความเร็ว  $u_0$  ได้เป็น

$$\left. \begin{aligned} (m - x_u)\dot{u} &= X_u u + F_x \\ (m - Y_v)\dot{v} + (mx_{cg} - Y_r)\dot{r} &= Y_v v + Y_r r + F_y \\ (mx_{cg} - N_v)\dot{v} + (I_z z - N_r)\dot{r} &= N_v v + N_r r + x_p F_y \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

เราสามารถเขียนสมการ 2.2 ในรูป Matrix ได้เป็น

$$M\dot{X} = NX + B_0 F_y \quad (2.3)$$

โดย  $X = [u \ v \ r]^T$  และ

$$M = \begin{bmatrix} (m - x_u) & 0 & 0 \\ 0 & (m - Y_v) & (mx_{cg} - Y_r) \\ 0 & (mx_{cg} - N_v) & (I_z z - N_r) \end{bmatrix} \text{ และ}$$



$$N = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ x_p \end{bmatrix}$$

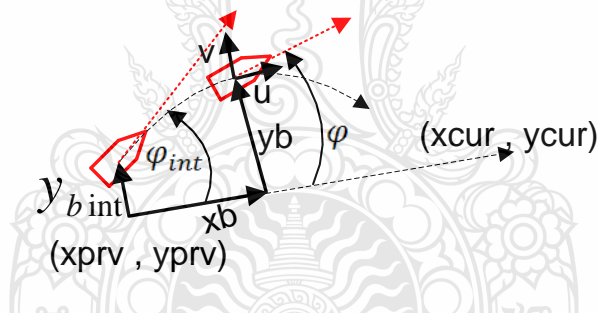
เราสามารถเขียนในรูปทั่วไปของ State Space Model ได้เป็น

$$\dot{X} = AX + BU \quad (2.4)$$

โดย  $A = M^{-1}N$  และ  $B = M^{-1}B_0$

ซึ่งสมการ 2.4 แสดงได้ในรูป

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} F_y \quad (2.5)$$



ภาพที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของเรือระหว่างจุดสองจุดใดๆ

พิจารณาเมื่อเรือเริ่มเคลื่อนที่จาก  $(x_{prv}, y_{prv})$  ไปยัง  $(x_{cur}, y_{cur})$  ไตๆมุมเริ่มต้นของเรือคือ  $\varphi_{int}$  และมุมที่เวลาใดๆคือ  $\varphi$  และตำแหน่งของเรือเทียบกับแนวแกนระหว่าง  $(x_{prv}, y_{prv})$  กับ  $(x_{cur}, y_{cur})$  ที่เรือเคลื่อนที่อยู่ว่า  $(x_b, y_b)$  จากภาพที่ 2.2 จะได้ว่า

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_b &= u \cos \varphi - v \sin \varphi \\ \dot{y}_b &= u \sin \varphi - v \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

เมื่อเรือเข้าใกล้ แนวการเคลื่อนที่ ( $\varphi$  มีค่าน้อยๆ) จะได้  $\sin\varphi \approx \varphi$ ,  $\cos\varphi \approx 1$  สมการ 2.6 Linearize ได้เป็น

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_b &= u - v\varphi \cong u_0 \\ \dot{y}_b &= u\varphi + v \cong u_0\varphi + v \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

จะเห็นว่าตัวแปรสถานะ (State) ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องมี 10 ตัว คือ

$$u \quad v \quad r \quad \varphi \quad \varphi_{int} \quad x_b \quad y_b \quad y_{bint} \quad \dot{F}_y \quad F_y$$

โดย  $r = \frac{d\varphi}{dt}$ ,  $\varphi = \frac{d\varphi_{int}}{dt}$ ,  $y_b = \frac{dy_{bint}}{dt}$  เรานิยามตัวแปรสถานะทั้งหมดจะได้ว่า

$$x = [u \quad v \quad r \quad \varphi \quad \varphi_{int} \quad x_b \quad y_b \quad y_{bint} \quad \dot{F}_y \quad F_y]^T \quad (2.8)$$

ซึ่งเป็นตัวแปรสถานะทั้งหมดที่เกี่ยวข้องซึ่งเราจะนำไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ต่อไป

## 2.2. ระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะทุกตัว (Full-State Feedback Control)

ในการนำตัวแปรสถานะ ทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง มาใช้ในการควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะทุกตัวเราจะต้องสร้าง State Space Model ดังสมการ 2.4 โดยนำ ตัวแปรสถานะ (State) ทั้งหมดมาประกอบเป็น สมการ 2.4 เป็นสมการดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & u_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\lambda_1 + \lambda_2) & -\lambda_1\lambda_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$B = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \lambda_1\lambda_2 \quad 0]^T \quad (2.10)$$

และ 
$$u = F_{ycmd} \quad (2.11)$$

ในตอนนี้เราสามารถแสดงแบบจำลองในรูปสมการของตัวแปรสถานะได้เป็น

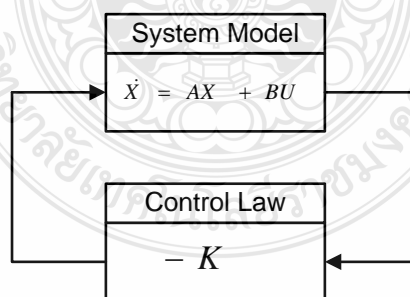
$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2.12)$$

โดยตัวแปรสถานะ ของระบบ คือ  $x = [u \ v \ r \ \varphi \ \varphi_{int} \ x_b \ y_b \ y_{bint} \ \dot{F}_y \ F_y]^T$

โดย  $u, v$  คือความเร็วในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ของเรือ และ  $r, \varphi$  คืออัตราเร็วเชิงมุม และองศาการหมุนของหัวเรือ และ  $x_b, y_b$  คือตำแหน่งของเรือ ณ เวลาต่างๆ และ  $F_y, \dot{F}_y$  คือแรงและอนุพันธ์ของแรงที่มากระทำจากพอดพรอเพาส์ชั้นและ  $\varphi_{int}, y_{bint}$  คือเงื่อนไขเริ่มต้นของเรือในช่วงการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจากพิคัดเริ่มต้นไปยังพิคัดปลาย ในการวิจัยนี้ใช้  $\lambda_1 = 6, \lambda_2 = 4, u_0 = 1$

ในขั้นแรก จะแสดงการออกแบบ ค่าคงที่ในการควบคุมแบบป้อนกลับ โดย ถ้าพิจารณา ระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะทุกตัว ดังรูปที่ 2.3 โดยกำหนด ทฤษฎีระบบควบคุมให้เป็นแบบ PID Control แรงในแนวแกน  $y$  ( $F_{ycmd}$ ) เพื่อควบคุม ให้เรือเคลื่อนที่ ตามแนวเส้นตรงจากจุดพิคัดเริ่มต้น ไปยังจุดพิคัดปลาย โดยจะนิยาม ( $F_{ycmd}$ ) ดังนี้ [2]

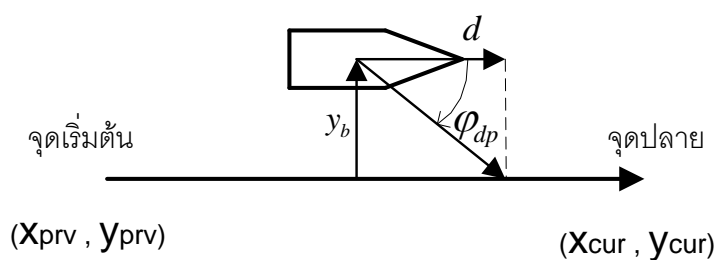
$$F_{ycmd} = -K_{pH}(\varphi - \varphi_d) - K_{dH}r - K_{iH} \int (\varphi - \varphi_d) dt \quad (2.13)$$



ภาพที่ 2.3 Full-State Feedback Block Diagram

ซึ่งจะต้องพิจารณาค่า  $K$  ที่เหมาะสมต่อไป

พิจารณาในขณะที่เรือเคลื่อนที่โดยอยู่นอกเส้นทางเป็นระยะ  $y_b$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แผนภาพขณะเรือเคลื่อนที่อยู่นอกเส้นทาง

จะได้ว่า 
$$\varphi_{dp} = -\tan^{-1} \frac{y_b}{d} \quad (2.14)$$

ถ้ามุมมีขนาดเล็กๆ สมการที่ (2.14) สามารถ Linearize ได้เป็น

$$\varphi_{dp} = -\frac{1}{d} y_b = -K_p y_b \quad (2.15)$$

ซึ่งค่า  $1/d$  ก็คือ Proportional Gain ( $K_p$ ) ของ กฎควบคุม (Control Law) ส่วนควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control) และ ส่วนควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control) ถูกรวมเข้าไปในกฎควบคุม (Control Law) เพื่อชดเชยแรงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มากระทำกับเรือ เช่น คลื่น ลม และเพื่อให้ระบบมีการแกว่ง เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยที่ทิศทางของหัวเรือที่ต้องการเนื่องจากส่วนควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control) คือ

$$\varphi_{di} = -K_i y_{bint} \quad (2.16)$$

และทิศทางของหัวเรือที่ต้องการเนื่องจาก ส่วนควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control) คือ

$$\varphi_{dd} = -K_d (v + u_0 \varphi) \quad (2.17)$$

ดังนั้นทิศทางของหัวเรือที่ต้องการเนื่องจาก ส่วนควบคุม ทุกตัวเขียนได้เป็น

$$\varphi_d = \varphi_{dp} + \varphi_{di} + \varphi_{dd} \quad (2.18)$$

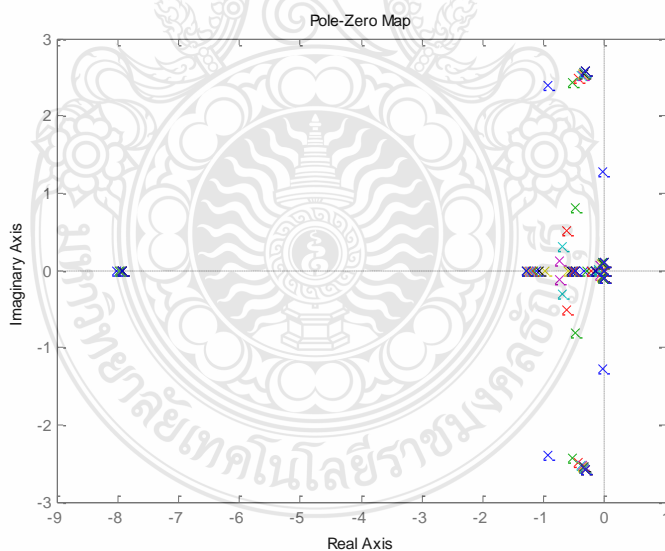
นำ (2.15),(2.16),(2.17) และ (2.18) แทนใน (2.13) และจัดรูปใหม่จะได้

$$F_{ycmd} = -Kx \quad (2.19)$$

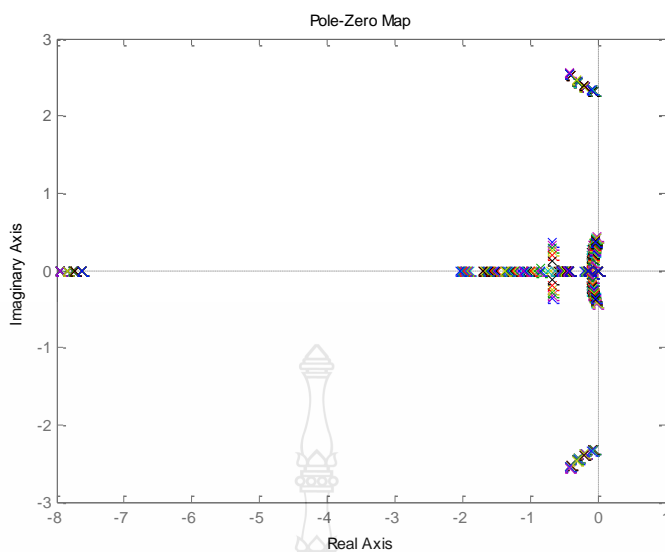
โดยที่

$$K = [0 \quad K_{pH}K_d \quad K_{dH} \quad K_{pH}(1+K_d u_0) \quad K_{iH} \quad 0 \quad K_{pH}K_p \quad K_{pH}K_i \quad 0 \quad 0] \quad (2.20)$$

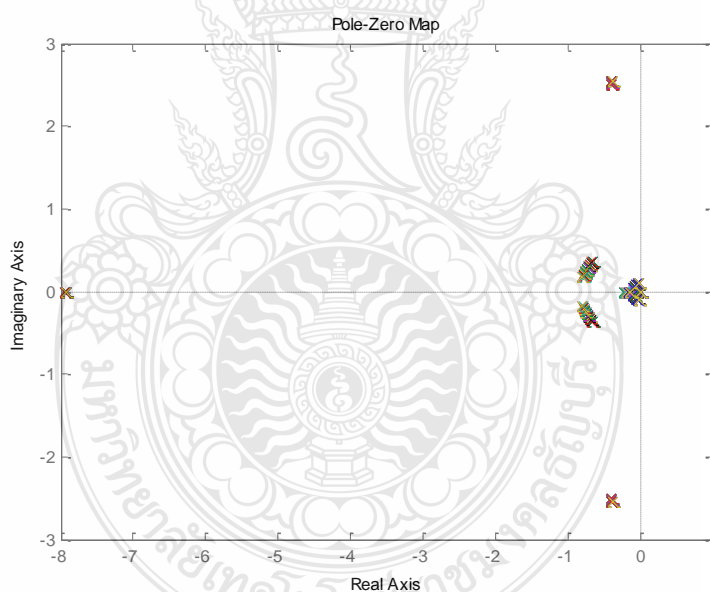
จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ ตำแหน่ง Pole-Zero ของการป้อนกลับแบบลูปปิดเมื่อค่า  $d$  เปลี่ยนแปลงจะได้ว่าค่า  $d$  ที่ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1-15 ( $K_p$  อยู่ในช่วง 0.066-1) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ในงานวิจัยนี้ได้เลือก  $d=4$  ( $K_p=0.25$ ) เมื่อใช้  $d=4$  และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ ตำแหน่ง Pole-Zero ของการป้อนกลับแบบลูปปิด เมื่อ  $K_i$ ,  $K_d$  และ  $K_{iH}$  เปลี่ยนแปลงจะได้ว่าค่า  $K_i$  ที่ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพ มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 0.15 และ  $K_d$  มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 0.3 ดังแสดงในภาพที่ 2.6 และ  $K_{iH}$  มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 0.004 ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.5 Close-Loop Pole-Zero ของ  $d=1$  ถึง 15



ภาพที่ 2.6 Close-Loop Pole-Zero เมื่อ  $d=4$ ,  $k_i=[0-0.15]$  และ  $k_d=[0-0.3]$



ภาพที่ 2.7 Close-Loop Pole-Zero เมื่อ  $d=4$ ,  $k_i=[0-0.15]$ ,  $k_d=[0-0.3]$  และ  $K_{iH}=[0-0.004]$

จากงานวิจัยของ Greytak [2] ได้ให้ความสัมพันธ์  $K_{pH}$  และ  $K_{dH}$  ที่สัมพันธ์กับตัวแปรของเรือไว้ดังนี้

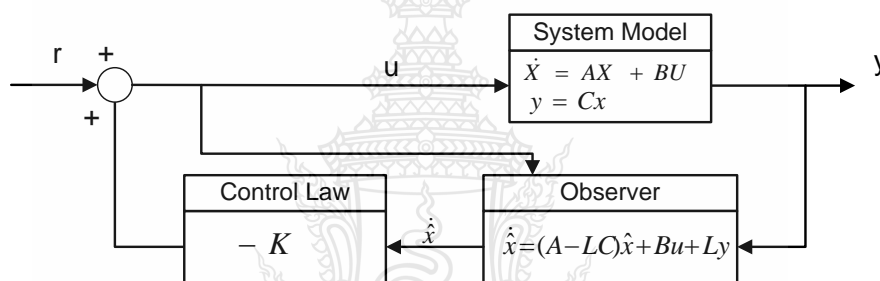
$$K_{dH} = \frac{2\lambda(I_{zz} - N_r) + N_r}{x_p} \quad (2.21)$$

$$K_{pH} = \frac{\lambda^2(L_{zz} - N_r)}{x_p} \quad (2.22)$$

ในงานวิจัยนี้ ถ้าใช้ตัวแปรของเรือที่สร้างขึ้นจะได้  $K_{pH}=0.0183$   $K_{dH}=0.226$  ซึ่งจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกับค่า  $K_i$ ,  $K_d$  และ  $K_{iH}$  ที่เราเลือกไว้

### 2.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะทุกตัวร่วมกับ Observer Estimator [5]

เราสามารถนำ Observer มาใช้เพื่อประมาณค่า State ของเรือเพื่อใช้ร่วมกับ กฎควบคุม (Control Law) ดังแสดงใน ภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 Block Diagram ของ Full Order Observer

DG Luenberger ได้ให้นิยามของ Observer ของระบบไว้ดังนี้

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (2.23)$$

โดย  $\hat{x}$  คือ ค่าประมาณของตัวแปรสถานะ State ( $x$ ) และ  $L$  คือ Observer Gain Matrix โดย Observer มีอินพุต 2 ตัวคือ  $u$  และ  $y$  และให้เอาพุต เป็น  $\hat{x}$  เนื่องจากเราไม่รู้ค่าเริ่มต้นของ  $x(t_0)$  เราจึงต้องกำหนด ค่าเริ่มต้น  $\hat{x} = 0$  ให้แก่ Observer ด้วยตามหลักการของ Observer เมื่อ  $t \rightarrow \infty$  ค่าประมาณของ State จะมีค่าเข้าใกล้ค่า State ( $\hat{x} \rightarrow x$ ) ค่าความผิดพลาด  $e(t)$  ค่าประมาณที่ได้จาก Observer แสดงได้ดังนี้

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (2.24)$$

และค่าความผิดพลาดจะเข้าใกล้ศูนย์เมื่อ  $t \rightarrow \infty$  จะได้  $e(t) \rightarrow 0$  จากความจริงอันนี้ เราจึงสามารถหาค่า  $L$  ที่ทำให้  $e(t)$  มีความเสถียรได้ จากสมการ (2.24) หอนุพันธ์ของความผิดพลาด  $e(t)$  จะได้

$$\dot{e} = \dot{x} + \dot{\hat{x}} \quad (2.25)$$

แทน (2.12) และ (2.23) ลงใน (2.25) จะได้

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \quad (2.26)$$

จะได้ว่า ทุกค่าเริ่มต้น  $e(t_0)$  ใดๆ เมื่อ  $t \rightarrow \infty$  จะทำให้  $e(t) \rightarrow 0$  ถ้าหากเมตริก  $A-LC$  มีรากอยู่ด้านซ้ายมือของ S-Plane

$$\det(\lambda I - (A - LC)) = 0 \quad (2.27)$$

ซึ่งจะนำมาใช้ในการปรับค่า  $L$  จากตำแหน่ง Pole ที่ต้องการได้

#### 2.4 การลดลำดับชั้น (Reduced-Order) ของเทคนิคการประมาณค่าตัวแปรสถานะ

ในการใช้งานทางการควบคุมทั่วไป มักจะพบปัญหาว่า ตัวแปรสถานะ บางตัวสามารถวัดค่าได้ แต่บางตัวไม่สามารถวัดค่าได้ เนื่องจากสาเหตุต่างๆ ไป เช่น อุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์บางตัวมีราคาสูงมาก หรือพารามิเตอร์บางตัวไม่สามารถ วัดด้วยเซนเซอร์ในงานจริงที่มีสภาพแวดล้อมที่จำกัดได้ เราสามารถใช้หลักการ Reduced-Order เพื่อให้ Observer ประมาณค่าตัวแปรสถานะที่ไม่สามารถวัดได้ด้วยเซนเซอร์ที่มีอยู่ในงานวิจัยนี้ เรามีตัวแปรสถานะ 10 ตัว คือ

$$x = [u \quad v \quad r \quad \varphi \quad \varphi_{int} \quad x_b \quad y_b \quad y_{bint} \quad \dot{F}_y \quad F_y]^T \quad (2.28)$$

สมมติว่าเรากำหนดให้  $u \quad v \quad \dot{F}_y \quad F_y$  เป็นตัวแปรสถานะที่ไม่สามารถวัดค่าได้ เราจะประยุกต์ใช้หลักการ Reduced-Order ได้โดยการจัดเรียงสมการตัวแปรสถานะ (Partition State Equation) ให้เป็นส่วนที่วัดค่าได้และส่วนที่วัดค่าไม่ได้



$$A = \begin{bmatrix} a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{11} & a_{12} & \dots & 0 & b_1 \\ a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{21} & a_{22} & \dots & 0 & b_2 \\ a_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{31} & a_{32} & \dots & 0 & b_3 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \hline 0 & u_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -(\lambda_1 + \lambda_2) & -\lambda_1 \lambda_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

} วัดค่าไม่ได้  
} วัดค่าได้

สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบ

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}; C = [I_m \quad 0] \quad (2.29)$$

$\begin{matrix} mx1 & mxm & mx(n-m) & mx1 \\ (n-m)x1 & (n-m)xm & (n-m)x(n-m) & (n-m)x1 \end{matrix}$

โดยในระบบของเรือจะมีตัวแปรสถานะและเมตริกซ์ย่อยในสมการ 2.29 ดังนี้

$$x_1 = [r \quad \varphi \quad \varphi_{int} \quad x_b \quad y_b \quad y_{bint}]^T, \quad x_2 = [u \quad v \quad \dot{F}_y \quad F_y]^T$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{11} & a_{12} \\ a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{21} & a_{22} \\ a_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{31} & a_{32} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & b_1 \\ 0 & b_2 \\ 0 & b_3 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & u_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -(\lambda_1 + \lambda_2) & -\lambda_1 \lambda_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad \text{และ} \quad B_2 = [0 \quad 0 \quad \lambda_1 \lambda_2 \quad 0]^T$$

จากส่วน สมการตัวแปรสถานะที่วัดค่าไม่ได้ทางด้านล่างในสมการ (2.29) จะได้ว่า

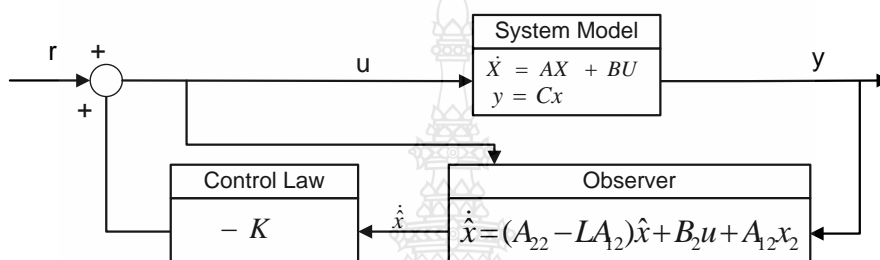
$$\dot{x}_2 = A_{22}x_2 + \{A_{21}x_1 + B_2u\} \quad (2.30)$$

จากส่วน สมการตัวแปรสถานะที่วัดค่าได้ทางด้านบนในสมการ (2.29) จะได้ว่า

$$\{\dot{x}_1 - A_{11}x_1 - B_1u\} = A_{12}x_2 \quad (2.31)$$

โดย  $\{A_{21}x_1 + B_2u\}$  คือ อินพุต และ  $\{\dot{x}_1 - A_{11}x_1 - B_1u\}$  คือเอาต์พุต

ทำให้เราได้ว่าระบบ Reduced-Order Observer ดังแสดงในภาพที่ 2.8 Reduced-Order Observer ที่ได้จากวิธีการนี้บางครั้งมีชื่อว่า Luenberger Reduced-Order Observer



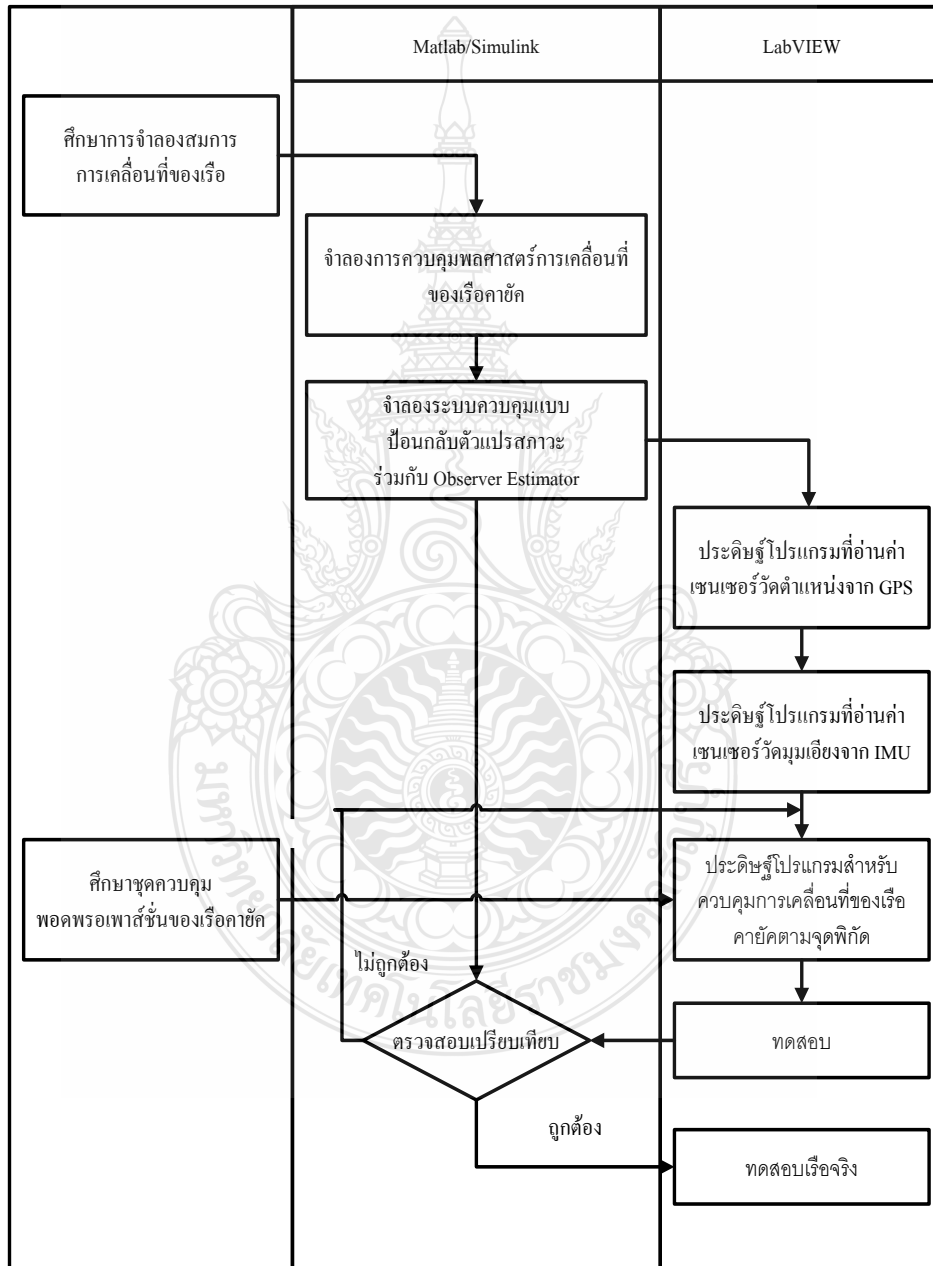
ภาพที่ 2.9 Block Diagram ของ Reduced Order Observer

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่าง Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer ที่ประยุกต์ใช้กับเรือ จะเห็นว่าขนาดของ เมตริกซ์ สำหรับ Reduced-Order Observer มีขนาดน้อยกว่าขนาดของเมตริกซ์สำหรับ Full-Order Observer เนื่องจากในเทคนิค Reduced-Order Observer ไม่จำเป็นต้องประมาณค่าตัวแปรสถานะทั้ง 6 ตัว  $[r, \varphi, \varphi_{int}, x_b, y_b, y_{bint}]$  หรือนำค่าที่วัดได้จริงจากเซนเซอร์ มาใช้ในการป้อนกลับค่า Gain โดยตรงได้เลย ซึ่งเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งของ Reduced-Order Observer ที่ทำให้ตัวแปรในการคำนวณน้อยลง ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการประมวลผลของระบบควบคุมลงด้วย ดังจะเห็นได้ว่า เวลาที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของเรือค่ายคในMATLAB/Simulink โดยเป็นเวลาในการจำลองการเคลื่อนที่จากจุดพิกัดหนึ่งไปยังอีกจุดพิกัดหนึ่งที่มีระยะห่างกัน 20 เมตร

# บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

#### 3.2.1 เรือ Atlantis12 พร้อม พอดพรอเพาส์ชั้นและใบพัด

คุณสมบัติทางกายภาพ

ความยาว	3.85	m
ความกว้าง	68	cm
น้ำหนัก	18.50	kg
รับน้ำหนักได้สูงสุด	104.30	kg



ภาพที่ 3.2 เรือ Atlantis12 [6]

#### 3.2.2 DC motor และอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน



ภาพที่ 3.3 การติดตั้ง พอดพรอเพาส์ชั้นและอุปกรณ์ควบคุม

### 3.2.3 เซนเซอร์รับสัญญาณ GPS เพื่อบอกตำแหน่ง

GPS (Global Positioning System) คือระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกผ่านดาวเทียม โดยพิกัดบนพื้นโลกที่ได้ จะมาจากการคำนวณสัญญาณนาฬิกาที่ส่งจากดาวเทียม มาที่เครื่องรับสัญญาณ GPS ดาวเทียม GPS ที่สามารถใช้ระบุตำแหน่งได้นั้น จะถูกออกแบบมาโดยเฉพาะให้โคจรรอบโลก เพื่อส่งข้อมูลที่จะนำไปใช้คำนวณพิกัดออกมาตลอดเวลา ระบบ GPS จะทำงานได้นั้นต้องประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ

1) สถานีฐาน : มีหน้าที่ควบคุมการทำงาน รวมถึงวงโคจรของดาวเทียม และให้ค่าสัญญาณ นาฬิกาที่ถูกต้อง กับดาวเทียม GPS

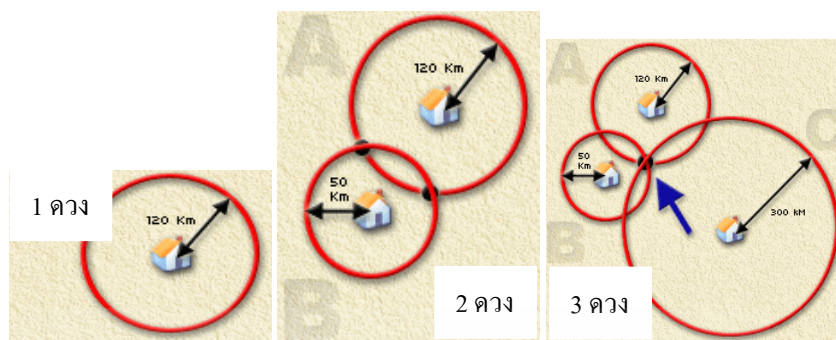
2) ดาวเทียม GPS : ส่วนของดาวเทียม GPS ในปัจจุบันนั้น จะมาจาก 3 ชาติหลักๆ คือ

- NAVSTAR : จากของประเทศอเมริกา มีทั้งหมด 24 ดวง โคจรรอบโลกด้วยความเร็ว 12 ชั่วโมงต่อ 1 รอบ
- Galileo : ถูกพัฒนาโดยสหภาพยุโรป ร่วมกับประเทศจีน อิสราเอล อินเดีย โมร็อกโก ซาอุดีอาระเบีย เกาหลีใต้ และยูเครน รวมจำนวน 27 ดวง
- GLONASS : (GLObal NAvigation Satellite System) ที่พัฒนาโดยรัสเซีย
- Beidou : เป็นดาวเทียม GPSที่กำลังพัฒนาโดยประเทศจีน

3) เครื่องรับสัญญาณ GPS : ผู้ใช้งานสามารถรับสัญญาณ GPS ได้จากอุปกรณ์หลายๆ อย่าง เช่น โทรศัพท์มือถือที่รับสัญญาณ GPS ได้, GPS Receiver (ต่อกับ computer, มือถือ) หรือเครื่อง PNA (Personal Navigation Assistant) หรือเรียกง่ายๆว่า GPS Navigator, GPS ดิจิตอล

การทำงานและประโยชน์ของระบบ GPS แรกเริ่มนั้นการระบุตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียมถูกพัฒนาขึ้นเพื่อจุดประสงค์ทางการทหารเป็นหลัก แต่ต่อมาทางการสหรัฐอเมริกา ได้เปิดให้ประชาชนทั่วไปได้ใช้ประโยชน์ จากข้อมูลที่ส่งออกมาจาก ดาวเทียมGPS ได้ฟรี บริษัทต่างๆจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้ระบุพิกัด จากการรับสัญญาณ GPS เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในหลายๆทาง เช่น ใช้ในการนำทางยานพาหนะ ติดตามยานพาหนะหรือบุคคล หรือใช้ในการอ้างอิงสถานที่ในการเดินทาง และอื่นๆความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของ GPS

ตัวรับสัญญาณ GPS นั้นจะสามารถระบุตำแหน่งของเราได้แม่นยำแค่ไหน ขึ้นอยู่กับจำนวนดาวเทียม ที่สามารถรับสัญญาณได้ในขณะนั้น การระบุพิกัดขั้นต่ำ ต้องการดาวเทียมอย่างน้อย 3 ดวง เพื่อระบุตำแหน่ง ให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง โดยตัวเครื่อง GPS จะนำสัญญาณนาฬิกา ที่ได้รับจากดาวเทียมทั้ง 3 ดวง มาคำนวณห้วงของเครื่องรับสัญญาณ GPS กับดาวเทียมเพื่อแจ้งพิกัดปัจจุบัน



ภาพที่ 3.4 แผนภาพการระบุตำแหน่งจากดาวเทียม 1 ดวง 2 ดวง และ 3 ดวง

จากภาพด้านบนจะเห็นได้ว่า หากรับสัญญาณ GPS จากดาวเทียมได้เพียงดวงเดียว เราจะได้พิกัดในลักษณะเป็นวงกว้าง ไม่สามารถระบุตำแหน่งได้ แต่ภาพที่ 2 เมื่อรับสัญญาณ GPS จากดาวเทียมได้ 2 ดวง จะทำให้สามารถระบุพิกัดได้ แต่จะมีพิกัดจำนวน 2 จุดที่เกิดจากการตัดกันของสัญญาณ GPS จากดาวเทียม 2 ดวง ซึ่งก็ยังไม่สามารถระบุตำแหน่งที่ชัดเจนได้ และภาพที่ 3 จะสามารถระบุพิกัดบนพื้นโลกได้อย่างชัดเจน เนื่องจากเครื่องรับสัญญาณ GPS สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้ 3 ดวง ทำให้ตัวเครื่องสามารถคำนวณหาพิกัด ซึ่งเกิดจากจุดตัดจากสัญญาณดาวเทียมทั้ง 3 ดวงได้ ดังนั้นการแสดงผลพิกัดที่ถูกต้อง ตัวเครื่องที่ใช้รับสัญญาณ GPS จะต้องรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ได้อย่างน้อย 3 ดวงขึ้นไป (ยิ่งมากยิ่งดี)

GPS Topcon [8] เป็น GPS ความแม่นยำสูงที่นิยมใช้ในการสำรวจและจัดทำแผนที่ที่มีขนาดกว้างxสูงxยาว เป็น159x173x113mm น้ำหนัก 1.65 kg สามารถต่อได้ทั้ง พอร์ตอนุกรม และยูเอสบีซีได้ การแปลรหัสสัญญาณจาก GPS ของ Topcon ที่ได้รับเข้ามาจะอยู่ในภาพแบบดังนี้

```
$GPGGA,hhmmss.ss,Latitude,N,Longitude,E,FS,NoSV,HDOP,msl,m,Altfref,m,DiffAge,DiffStation,DiffStation*cs<CR><LF>
```

ตารางที่ 3.1 การแปลรหัสสัญญาณของ GPS ของ Topcon รุ่น Hiper G-Series เฉพาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้ [10]

ชื่อ	ASCII String		คำอธิบาย
	ภาพแบบ	ตัวอย่าง	
\$GPGGA	ตัวอักษร(String)	\$GPGGA	ค่าขึ้นต้นชนิดของ GPS
hhmmss.ss	hhmmss.ss	092725.00	เวลาปัจจุบัน (เวลาUTC)
Latitude	dddmm.mmmm	4717.11399	ละติจูด : องศา+ลิปดา
N	ตัวอักษร(String)	N,S	ระบุ: N=เหนือ ,S=ใต้
Longitude	dddmm.mmmm	10039.0000	ลองจิจูด : องศา+ลิปดา
E	ตัวอักษร(String)	E,W	ระบุ : E= ตะวันออก , W= ตะวันตก

### 3.2.4 เซนเซอร์วัดมุมเอียง Inertia Measurement Unit(IMU)

IMU เป็นอุปกรณ์ประเภท เซนเซอร์วัดมุมเอียงซึ่งสามารถวัดมุมรอบแกน X (Roll), รอบแกน Y (Pitch) และรอบแกน Z (Yaw) และความเร่งเชิงมุมได้ ในงานวิจัยนี้ใช้ IMU ของ Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2 ในการวัดมุมรอบแกน Z(Yaw) และความเร่งเชิงมุม ( $r$ )



ภาพที่ 3.5 Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2 [9]

### ตารางที่ 3.2 ข้อมูลคุณสมบัติของ Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2 [9]

การวัดมุมเอียง (Roll, Pitch, Yaw)	360° about all axes
ช่วงการใช้งานการวัดความเร่ง (Accelerometer Range)	Accelerometers: $\pm 5$ g มาตรฐาน, $\pm 18$ g
ความไม่เป็นเชิงเส้นของการวัดความเร่ง (Accelerometer Nonlinearity)	0.20%
ช่วงการใช้งานการวัดมุมเอียง	$\pm 300^\circ/\text{sec}$ มาตรฐาน, $\pm 1200^\circ/\text{sec}$ , <math>0.1^\circ</math> minimum
ความสามารถในการวัดซ้ำ	0.20°
ชนิดของผลลัพธ์	ความเร่ง, ความเร่งเชิงมุม, และมุม(Roll,Pitch,Yaw)

#### 3.2.5 คอมพิวเตอร์ สำหรับประมวลผล

การประมวลผลทั้งในการจำลองพลศาสตร์ทางคณิตศาสตร์ของเรือใน MATLAB/Simulink และการควบคุมเรือจริงโดยใช้ LabVIEW ได้ใช้คอมพิวเตอร์ Note Book Aspire 4736G Intel Core2 Duo Processor (2.1 GHz)

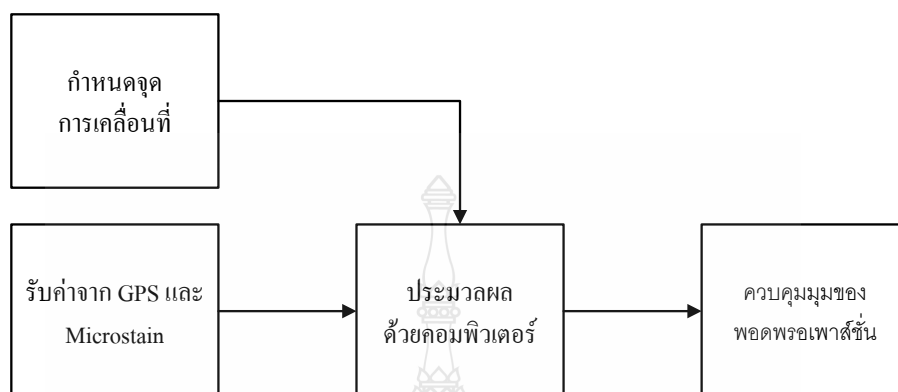
### 3.3 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือให้เป็นที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด โดยเรือคายัคจะติดตั้ง พอดพรอเพาส์ชั้นเป็นตัวขับเคลื่อนเรือ และใช้ระบบควบคุมแบบ Full-State Feedback ร่วมกับ Observer ในการควบคุมแรงขับเคลื่อน  $F_x$  และ  $F_y$  ของพอดพรอเพาส์ชั้นเพื่อใช้เป็น อินพุตในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือให้เป็นที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด ระบบควบคุม จะมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวประมวลผลหลัก โดยตัวควบคุมหลักจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ

1. การควบคุมการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนด
2. การควบคุมมุมการหมุนและแรงผลักของพอดพรอเพาส์ชั้น



โดยทั้ง 2 ส่วนจะทำงานร่วมกันเพื่อควบคุม มุมของพอดพรอเพาส์ชั้นเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของเรือคายัคไปตามจุดพิกัดที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 3.6

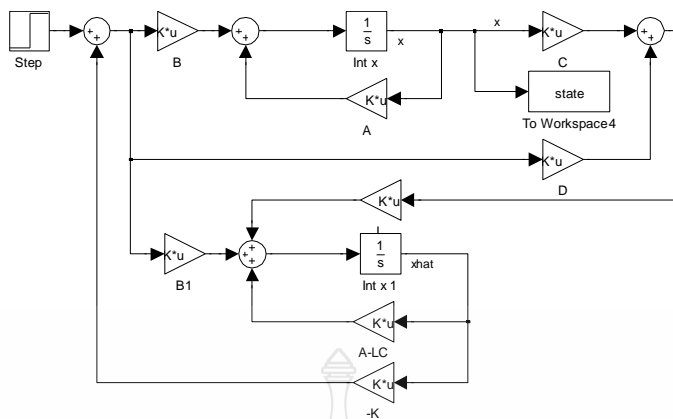


ภาพที่ 3.6 การทำงานของตัวควบคุมหลัก

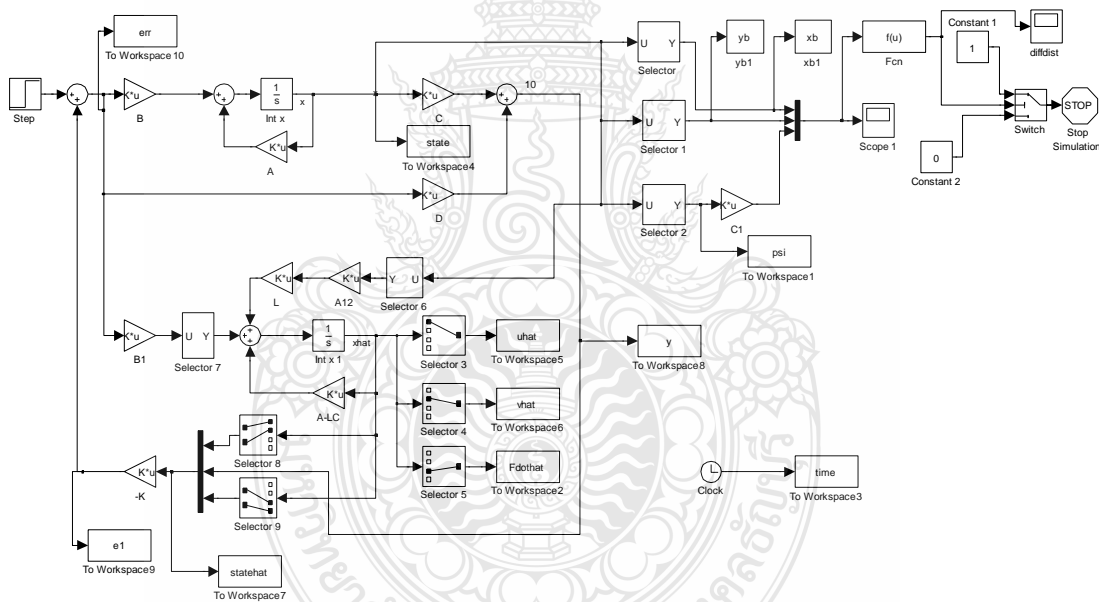
### 3.3.1 การจำลองด้วย MATLAB/Simulink

การจำลองการเคลื่อนที่ในที่นี่ใช้ โปรแกรม MATLAB ในการ จำลองการเคลื่อนที่ โดยสร้างพารามิเตอร์ต่างๆของเรือไว้ใน M-File และเรียกใช้ Simulink ในการแก้สมการเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ของ ตัวแปรสถานะ ที่เวลาต่างๆ โดยการใช้ระบบควบคุมแบบ Full-State Feedback ร่วมกับ Full-Order Observer ดังแสดงในภาพที่ 3.7 และการควบคุมแบบ Full-State Feedback ร่วมกับ Reduced-Order Observer ดังแสดงในภาพที่ 3.8

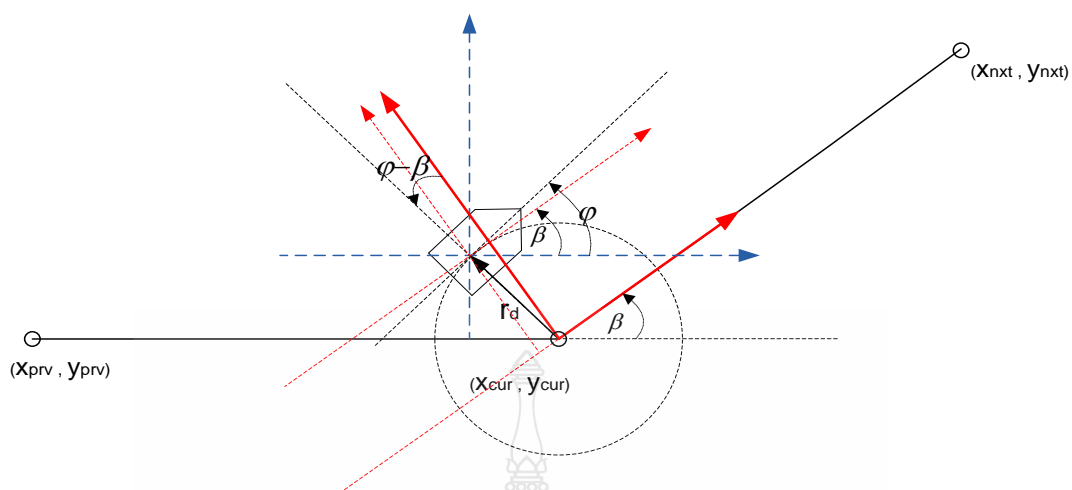
การเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ไปยังแนวการเคลื่อนที่ใหม่ นั้นจะพิจารณาได้ดังนี้ เดิมการเคลื่อนที่ของเรือ จะอยู่ในแนวเส้นตรงระหว่างจุดพิกัด  $(x_{prv}, y_{prv})$  กับ  $(x_{cur}, y_{cur})$  และกำลังจะเปลี่ยนการเคลื่อนที่ไปในแนวเส้นตรงที่สองระหว่างจุดพิกัด  $(x_{cur}, y_{cur})$  กับ  $(x_{nxt}, y_{nxt})$  เราจะสร้างวงกลมรัศมี  $r_d$  เป็นตัวช่วยบ่งบอกการสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงแรกและจะเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงที่สอง ดังแสดงในภาพที่ 3.9 โดย  $\varphi$  คือทิศทางของการเคลื่อนที่ของหัวเรือ



ภาพที่ 3.7 Block Diagram ของระบบการควบคุมแบบ Full-State Feedback พร้อมกับ Full-Order Observer ที่สร้างในโปรแกรม MATLAB/ Simulink



ภาพที่ 3.8 Block Diagram ของระบบการควบคุมแบบ Full-State Feedback พร้อมกับ Reduced-Order Observer ที่สร้างในโปรแกรม MATLAB/ Simulink



ภาพที่ 3.9 การเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ จากแนวเส้นตรงแรกไปยังแนวเส้นตรงที่สอง

จากภาพที่ 3.9 เราจะได้ว่า มุมสัมพัทธ์ระหว่างแนวการเคลื่อนที่เก่า และใหม่ ( $\beta$ ) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\beta = \tan^{-1} \frac{(y_{nxt} - y_{cur})}{(x_{nxt} - x_{cur})} - \tan^{-1} \frac{(y_{cur} - y_{prv})}{(x_{cur} - x_{prv})} \quad (3.1)$$

เราสามารถกำหนดค่ามุมเริ่มต้นของเรือเทียบกับพิกัดใหม่ได้เป็น

$$\varphi_{new} = \varphi - \beta \quad (3.2)$$

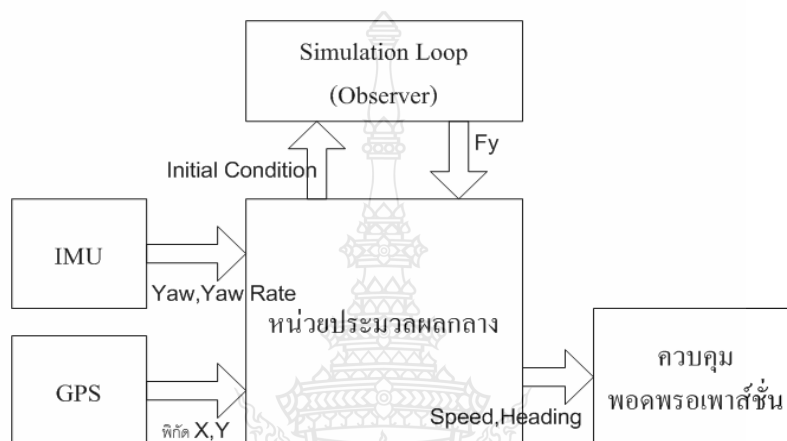
และสามารถกำหนด ตำแหน่งเริ่มต้นเทียบกับพิกัดใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} x_{new} &= -r_d \cos(\varphi - \beta) \\ y_{new} &= r_d \sin(\varphi - \beta) \end{aligned} \quad (3.3)$$

ในการจำลองการเคลื่อนที่ เราจะเขียนคำสั่งใน M-File ให้มีการกำหนดค่าเริ่มต้นของ  $\varphi, x, y$  ใหม่เมื่อเรือเข้ามาอยู่ในรัศมีของวงกลม  $r_d$  จะเกิดการเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดใหม่ ทำให้แบบจำลองเรือสามารถเคลื่อนที่ไปตามจุดต่างๆ ที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง

### 3.3.2 การใช้โปรแกรม LabVIEW ในการทดสอบกับเรือจริง

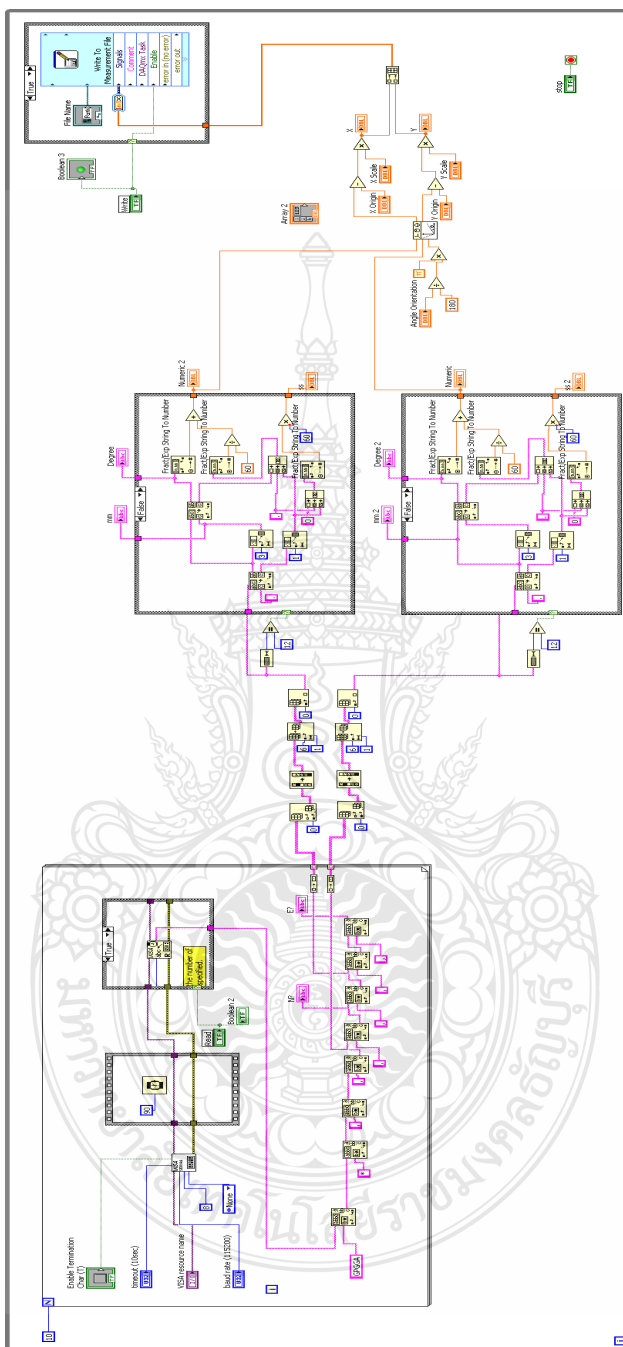
โปรแกรม LabVIEW เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบแอปพลิเคชัน โดยมีภาพแบบการเข้ารหัสแบบโค้ดภาพแทนการเขียนด้วยตัวหนังสือ ทำให้การพัฒนาแอปพลิเคชัน เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ในการใช้โปรแกรม LabVIEW ในการประมวลผลเพื่อควบคุมเรือจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือส่วนรับค่าสัญญาณจาก GPS , ส่วนรับค่าสัญญาณจาก IMU , ส่วนการประมาณค่าโดยใช้ระบบObserver , ส่วนควบคุมหลัก และส่วนควบคุมพอดพรอเพาส์ชั้น



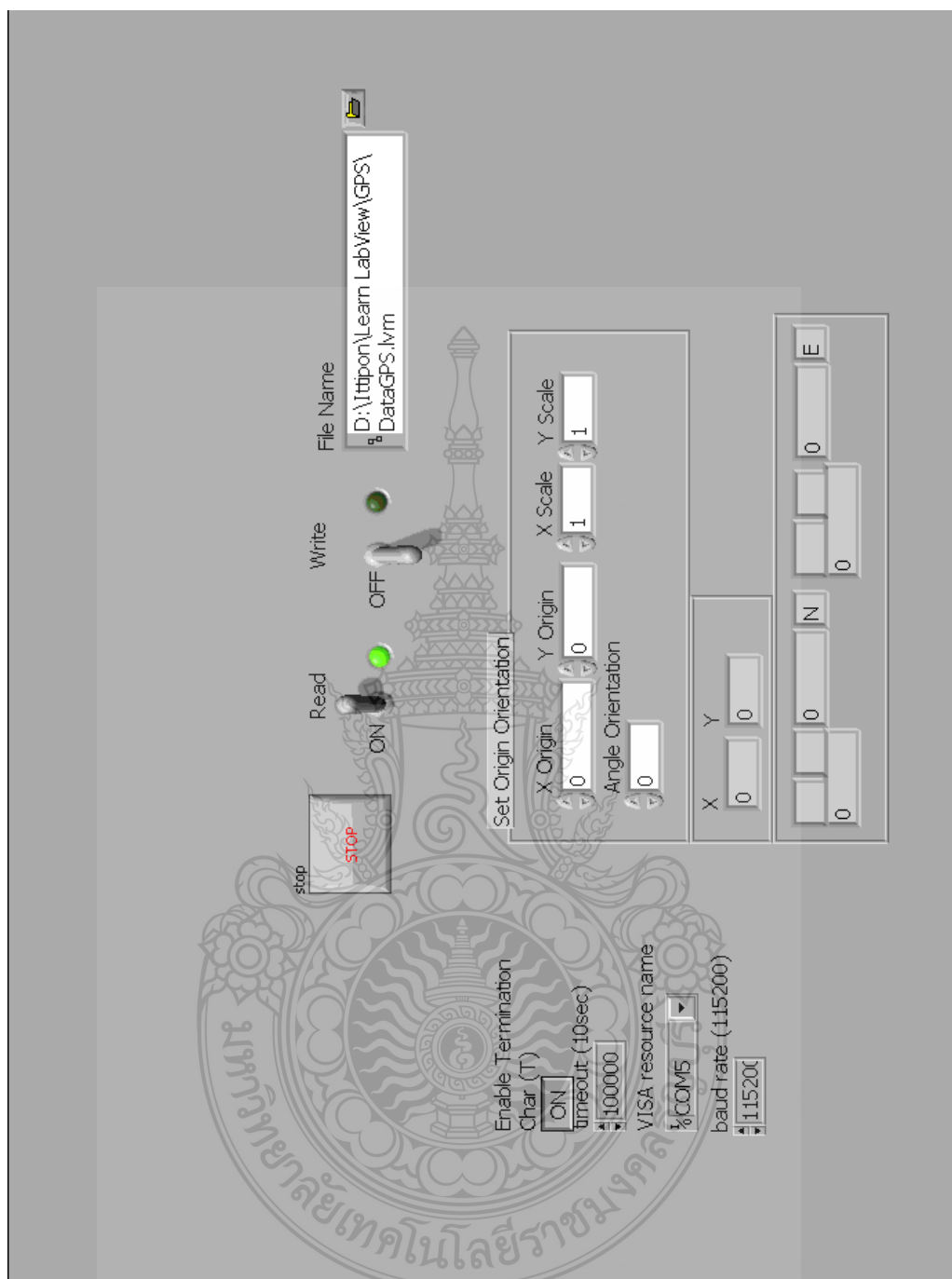
ภาพที่ 3.10 การทำงานร่วมกันของโปรแกรมควบคุมที่สร้างขึ้น



3.3.2.1 ส่วนรับค่าจาก GPS

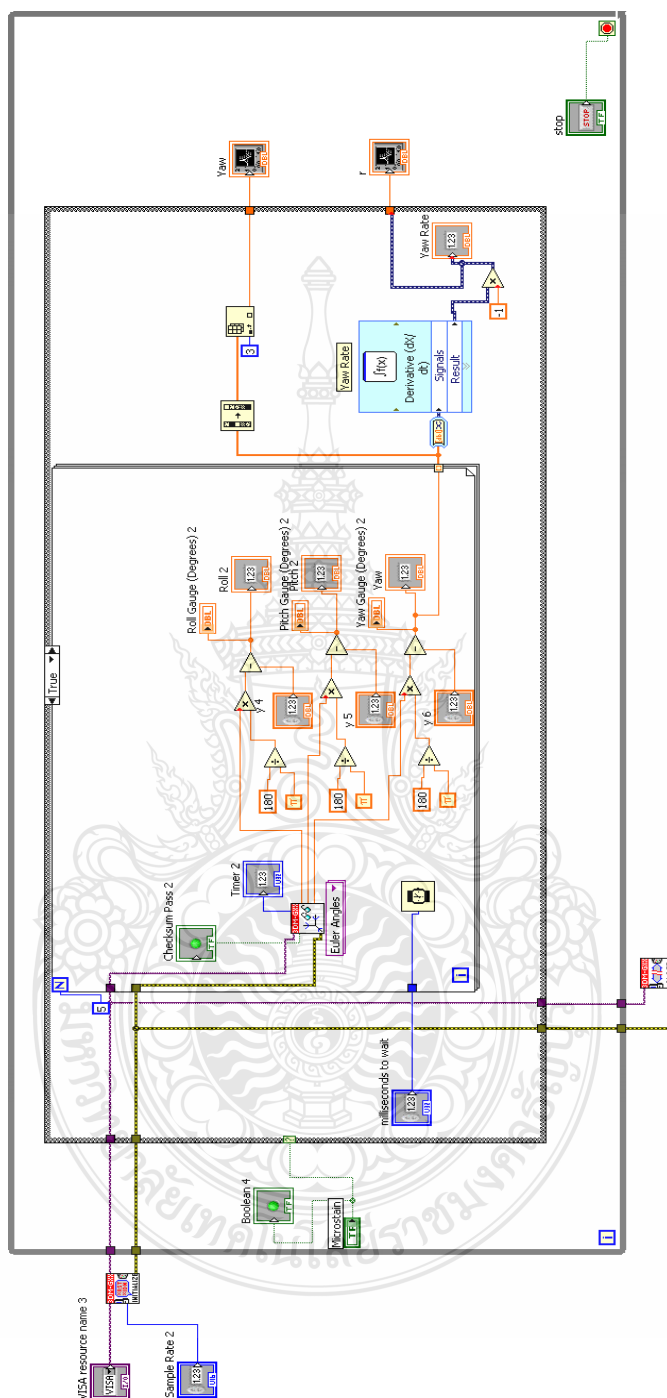


ภาพที่ 3.11 Block-Diagram ของโปรแกรมรับค่าจาก GPS จาก Topcon รุ่น Hiper G-Serie

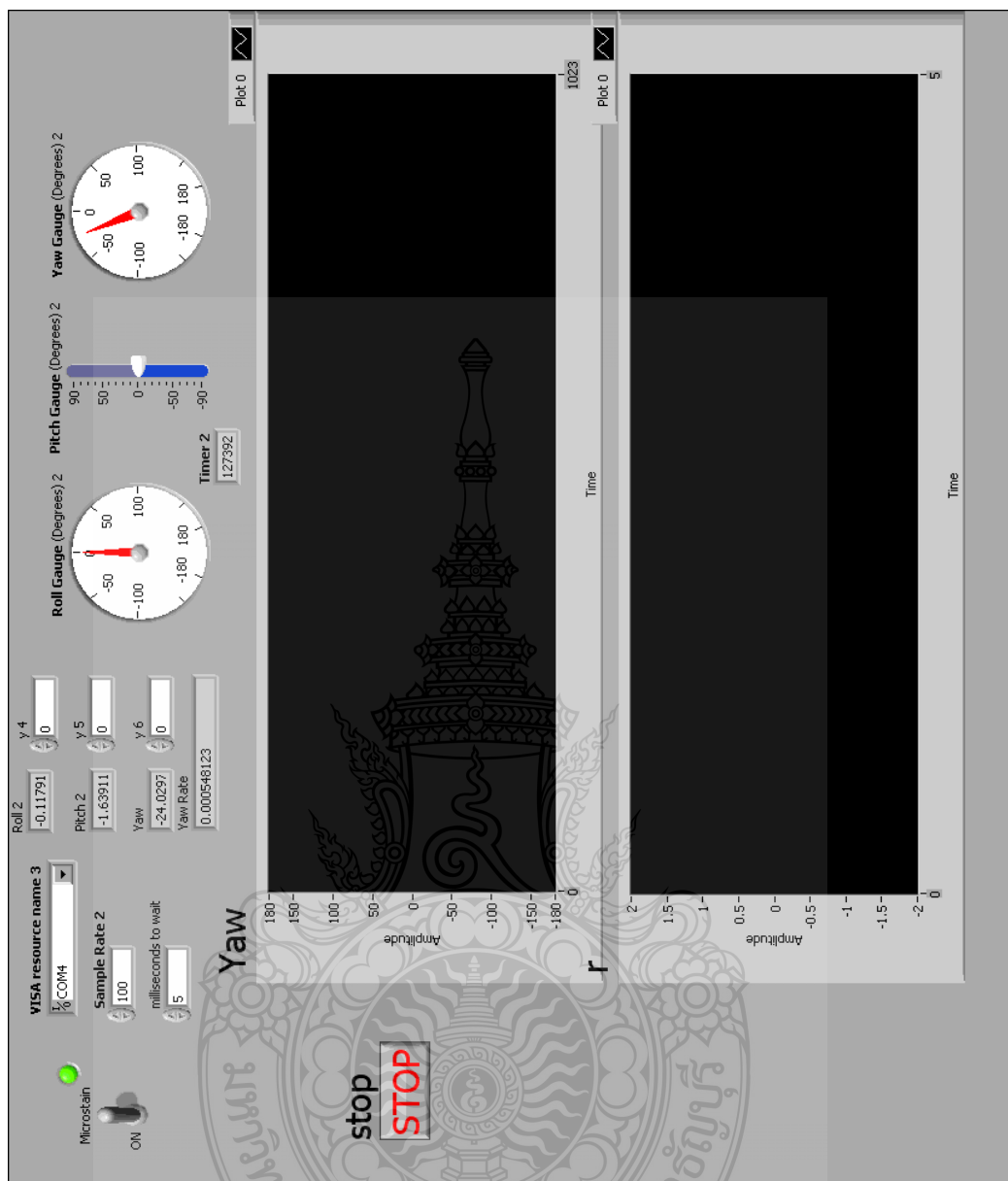


ภาพที่ 3.12 Front Panel การรับค่าจาก GPS

### 3.3.2.2 ส่วนรับค่าจากเซนเซอร์วัดมุมเอียง IMU ของ Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2



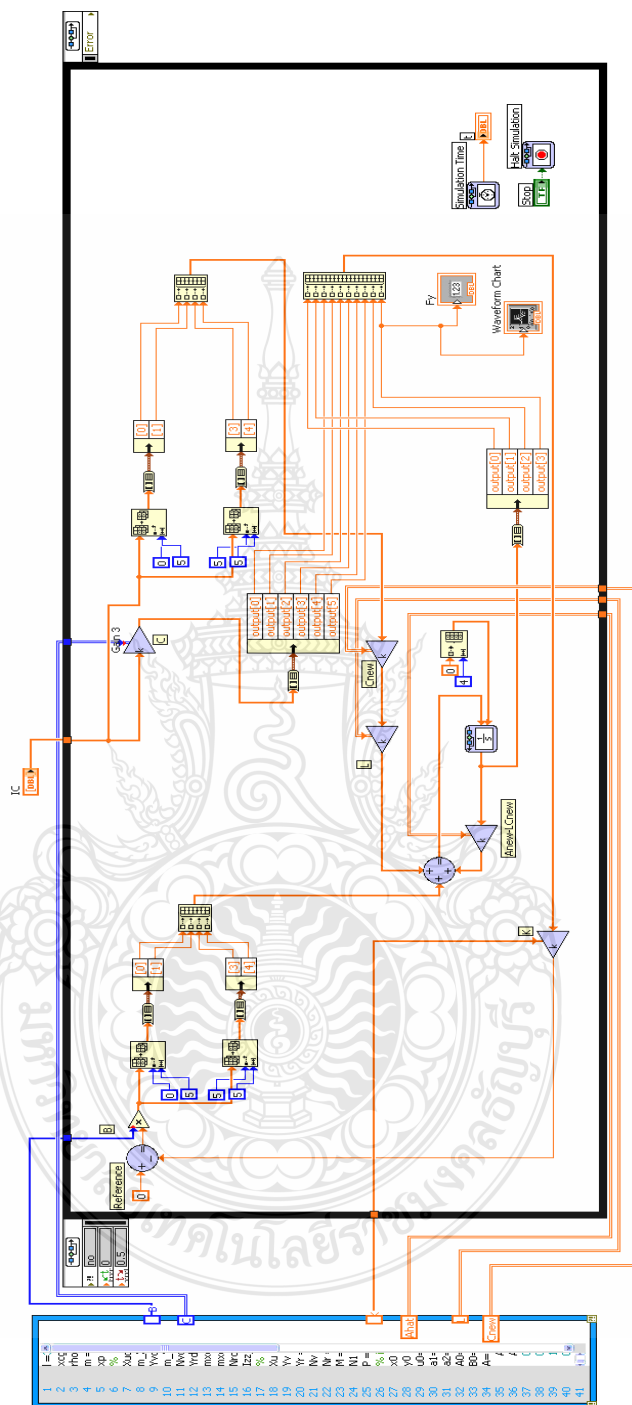
ภาพที่ 3.13 Block-Diagram ของโปรแกรมรับค่าจาก เซนเซอร์วัดมุมเอียง IMU ของ Micro- Strain รุ่น 3DM-GX2



ภาพที่ 3.14 Front Panel รับค่าจาก จาก เซนเซอร์วัดมุมเอียง IMU ของ Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2

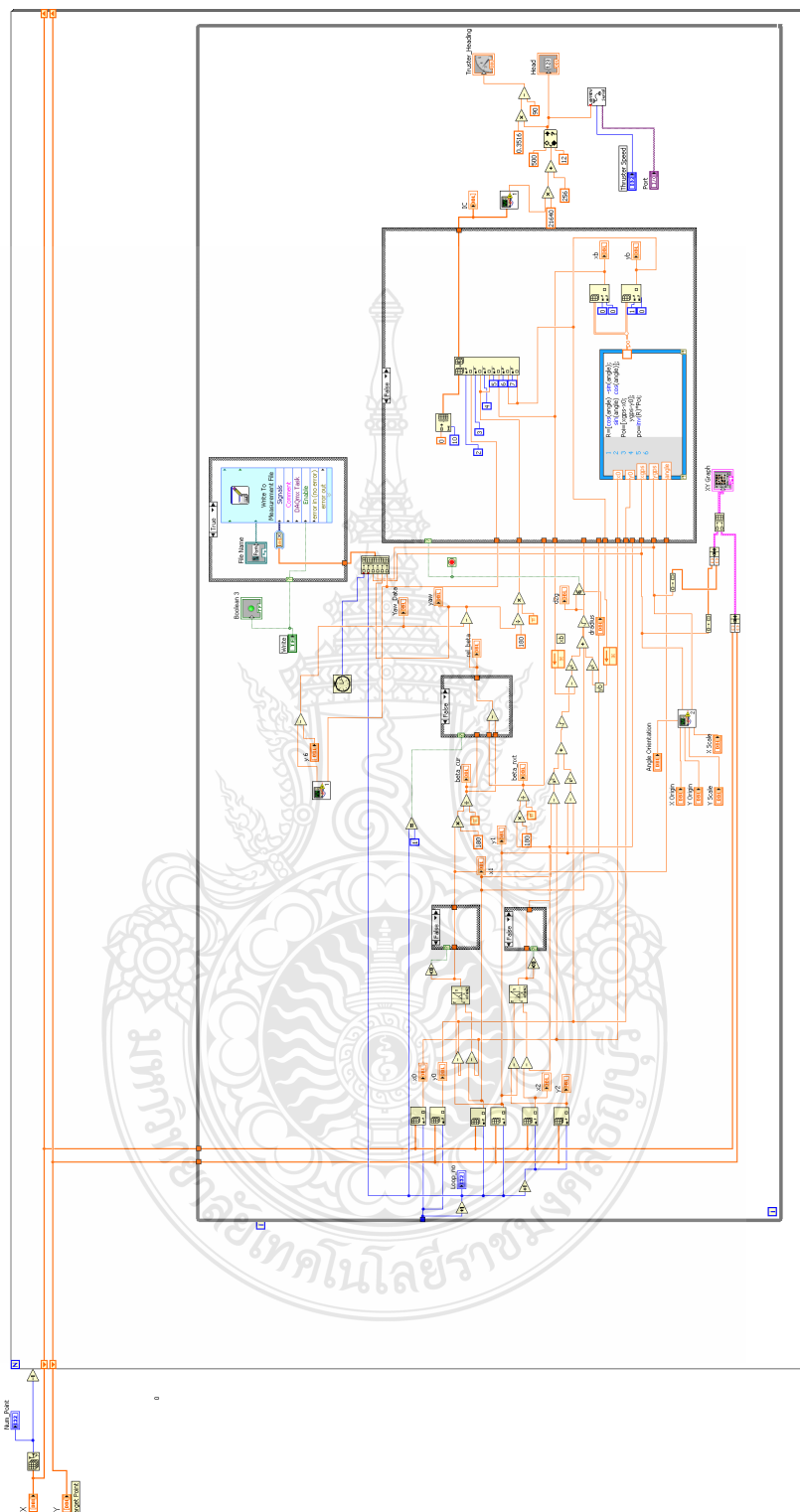


### 3.3.2.3 ส่วนการประมาณค่าโดยใช้ Reduced-Order Observer

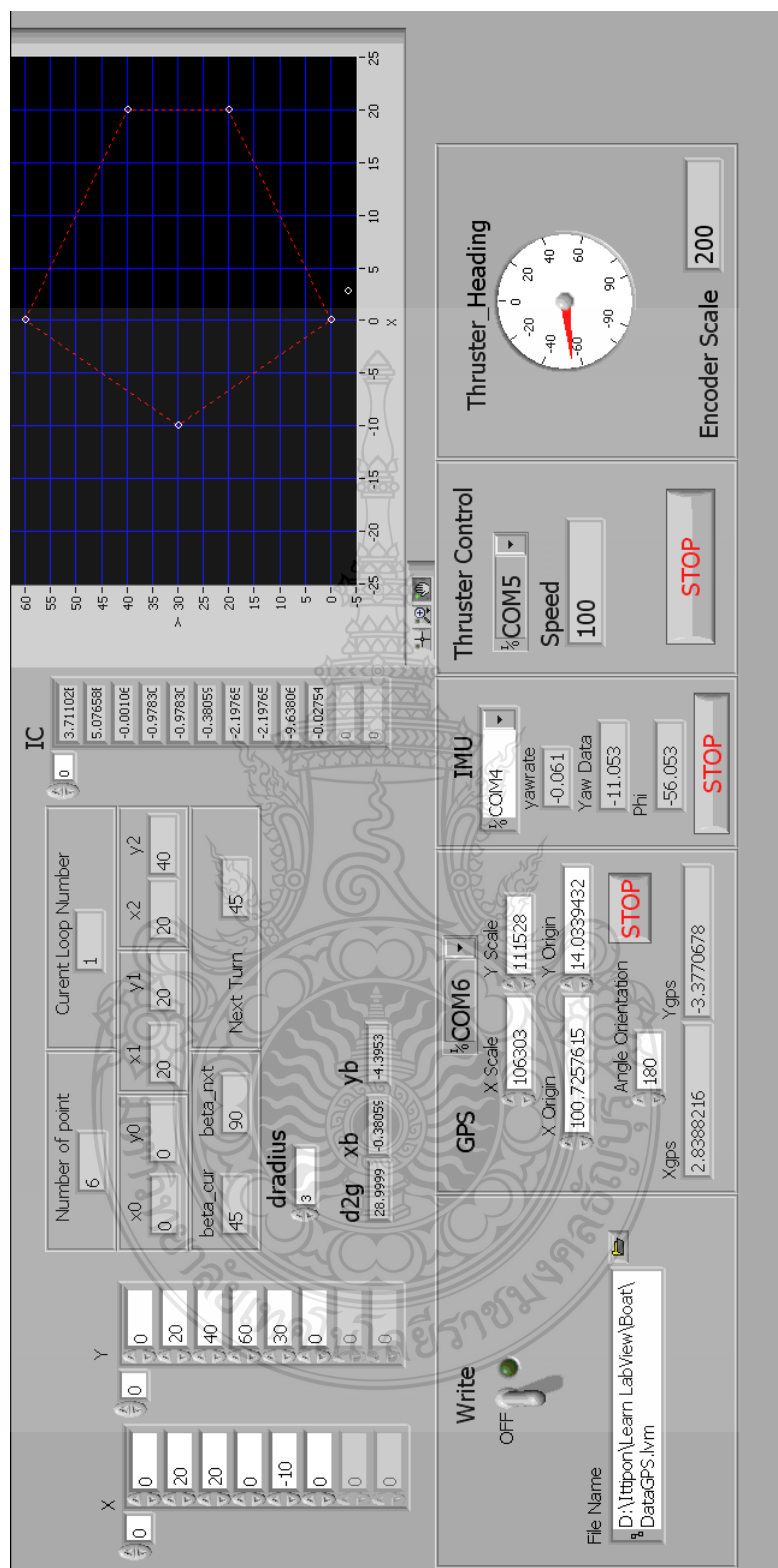


ภาพที่ 3.15 Block-Diagram ในส่วนการประมาณค่าโดยใช้ Reduced-Order Observer

### 3.3.2.4 ส่วนระบบควบคุมหลัก

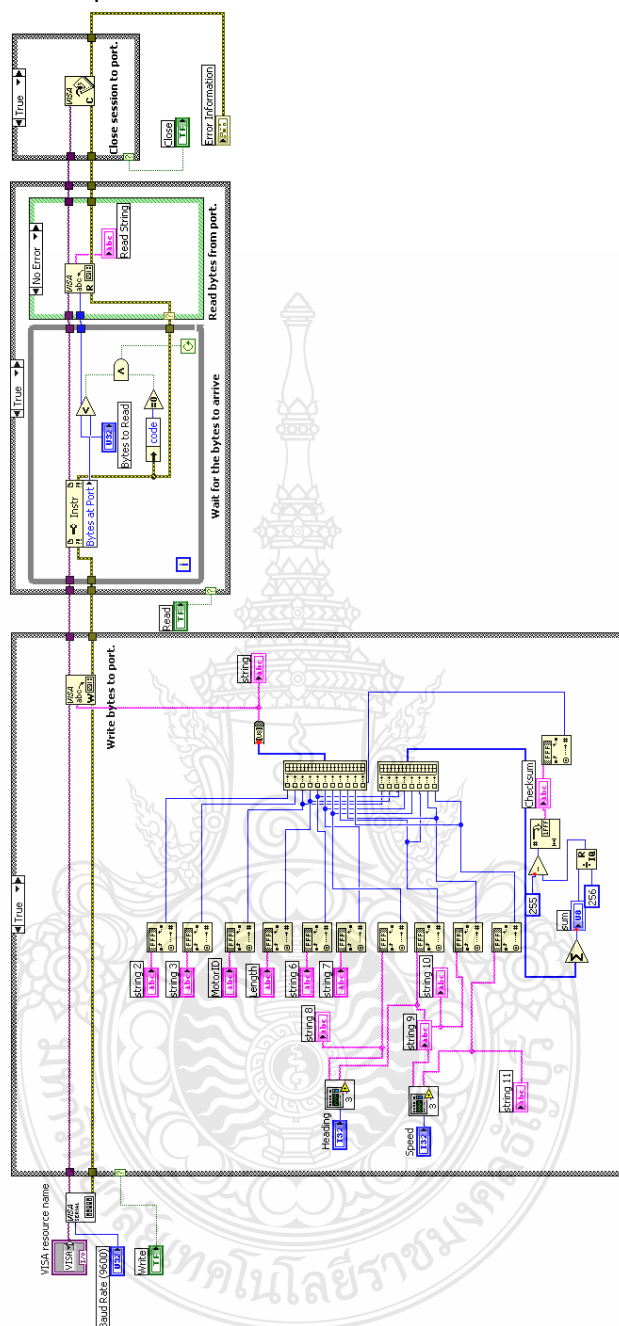


ภาพที่ 3.16 Block-Diagram ในส่วนควบคุมหลัก

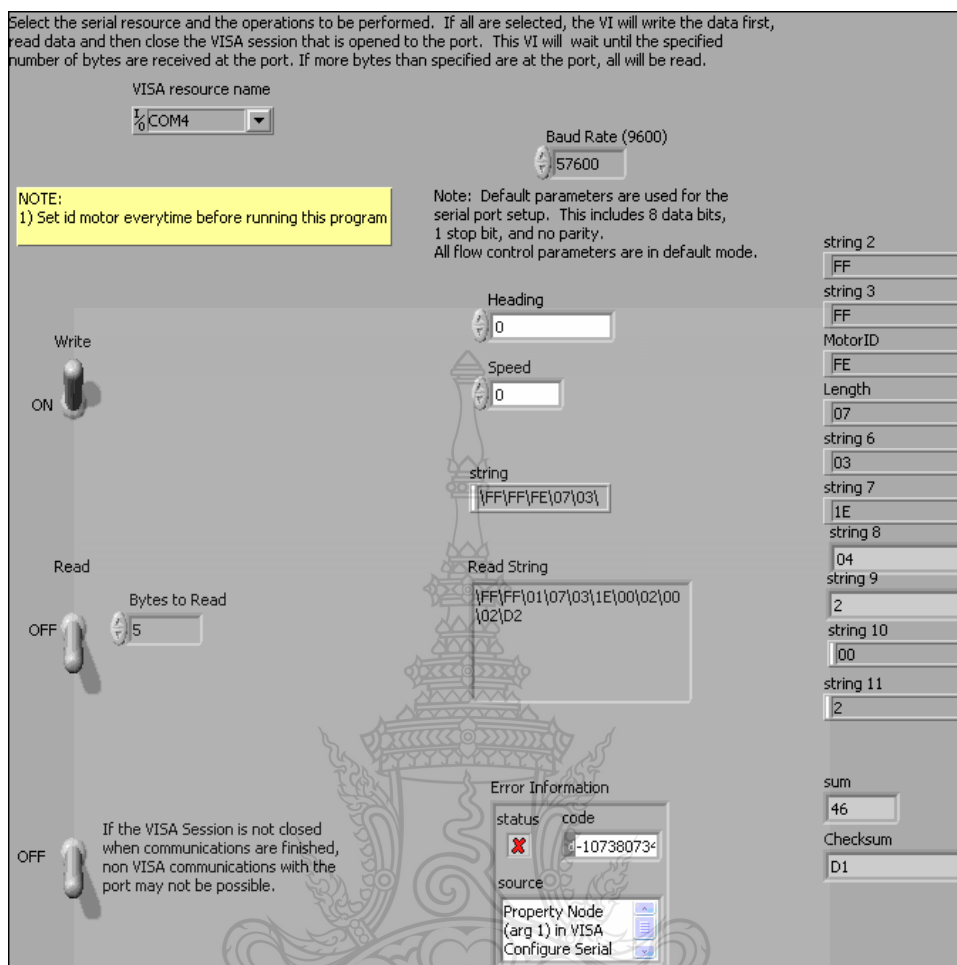


ภาพที่ 3.17 Front Panel ในส่วนควบคุมหลัก

## 3.3.2.5 ส่วนควบคุมพอดพรอเฟาส์ชั้น



ภาพที่ 3.18 Block-Diagram ในส่วนควบคุมพอดพรอเฟาส์ชั้น



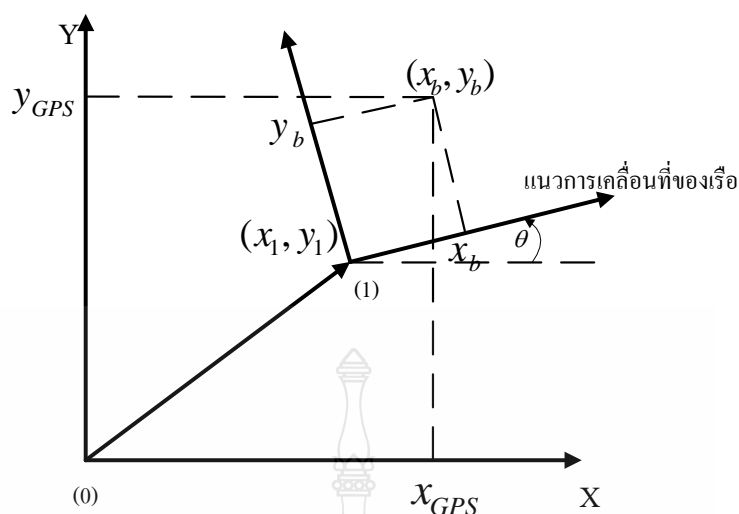
ภาพที่ 3.19 Front Panel ในส่วนควบคุมพอดพรอเพาล์ชั่น

การแปลงพิกัดที่อ่านได้จาก GPS ซึ่งเป็นพิกัดที่เทียบกับพิกัดโลก ไปเป็นพิกัดบนแนวการเคลื่อนที่ของเรือ สามารถทำได้ดังนี้พิจารณาภาพที่ 3.20 จากการแปลงพิกัดใน 2 มิติจะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} x_{GPS} \\ y_{GPS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + {}^{01}R \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

โดย

$${}^{01}R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$



ภาพที่ 3.20 พิกัดจาก GPS และพิกัดบนแนวการเคลื่อนที่ของเรือ

หากเราต้องการแปลงพิกัดจากค่าที่อ่านได้จาก GPS ไปเป็นพิกัดบนแนวการเคลื่อนที่ของเรือสามารถหาได้จาก

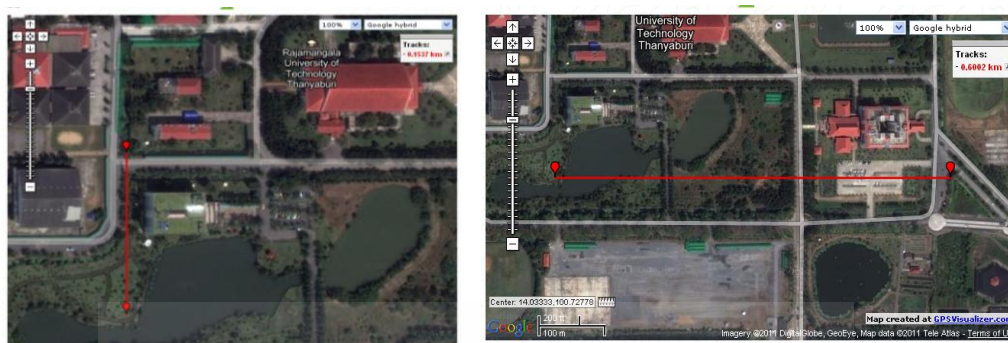
$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} = 01R^{-1} \left( \begin{bmatrix} x_{GPS} \\ y_{GPS} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \right) \quad (3.6)$$

การแปลงค่าจากเซนเซอร์รับสัญญาณ GPS เป็นพิกัด X,Y ใช้โปรแกรม GPS Distance Map จาก <http://www.gpsvisualizer.com/calculators> เป็นเครื่องมือคำนวณระยะทางบนพื้นโลกแล้วทำการคำนวณหาค่าอัตราส่วนระยะทาง  $X_{scale}$  และ  $Y_{scale}$

โดย

$$X_{scale} = \frac{\text{ระยะทางบนผิวโลก(m)}}{\Delta \text{Longitude}} \quad (3.7)$$

$$Y_{scale} = \frac{\text{ระยะทางบนผิวโลก(m)}}{\Delta \text{Latitude}} \quad (3.8)$$



ภาพที่ 3.21 การใช้ โปรแกรม GPS Distance Map จาก <http://www.gpsvisualizer.com/calculators>

จะได้ว่า

$$x = (Point_{Longitude} - Origin_{Longitude}) \times X_{scale} \quad (3.9)$$

และ

$$y = (Point_{Latitude} - Origin_{Latitude}) \times Y_{scale} \quad (3.10)$$

จากการใช้โปรแกรม GPS Distance Map จะได้ว่าในบริเวณที่จะทดสอบเรื่องจริง  $X_{scale} = 108036$  และ  $Y_{scale} = 110664$  ซึ่งเป็นค่าที่เราใช้ในการคำนวณค่าจุดพิกัด (x,y) และจากการทดสอบโดยสร้างจุดสองจุดห่างกัน 5 เมตรและใช้โปรแกรมที่สร้างขึ้นเก็บค่าจุดพิกัด (x,y) ปรากฏว่าโปรแกรมที่สร้างขึ้นสามารถอ่านค่าได้ 5.04 เมตรซึ่งถือว่ามีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้

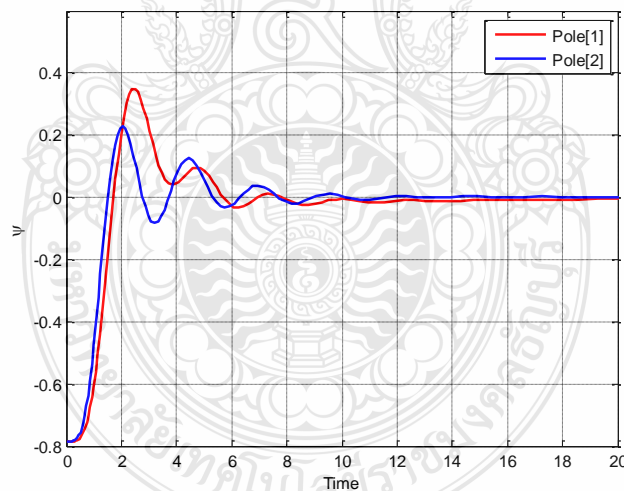
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการจำลองใน MATLAB/Simulink

##### 4.1.1 ผลการตอบสนองของระบบ

ภาพที่ 4.1 แสดงผลตอบสนองเมื่อเงื่อนไขเริ่มต้นมี  $\varphi_0 = -45^\circ$  ผลตอบสนองเมื่อใช้ Pole ชุดที่ (2) ได้จากการเลือก Pole Placement ที่ไปทางด้านซ้ายมือของ S-Plane มากกว่า จะมีความรวดเร็ว มากกว่าผลตอบสนองเมื่อใช้ Pole ชุดที่ (1) และจะเห็นว่าระบบมีขนาดที่มีการแกว่งน้อยลง ถ้า Pole ที่เลือกไปทางด้านซ้ายมากขึ้น หรือใช้ Pole ชุดที่ (2) โดยจะพิจารณากรณีที่หนึ่งมีค่าเป็น Pole ชุดที่ (1)=[-5; -1+1i; -1-1i; -1+1i; -1-1i; -0.5+1i; -0.5-1i; -0.1+0.1i; -0.1-0.1i; -5]; และจะพิจารณากรณีที่สองมีค่าเป็น Pole ชุดที่ (2)=[-10; -3+3i; -3-3i; -3+3i; -3-3i; -1+2i; -1-2i; -0.3+0.3i; -0.3-0.3i; -10];



ภาพที่ 4.1 ผลตอบสนองของมุมของเรอกระทำกับพิกัดอ้างอิงแบบเฉลี่ย ( $\varphi$ )

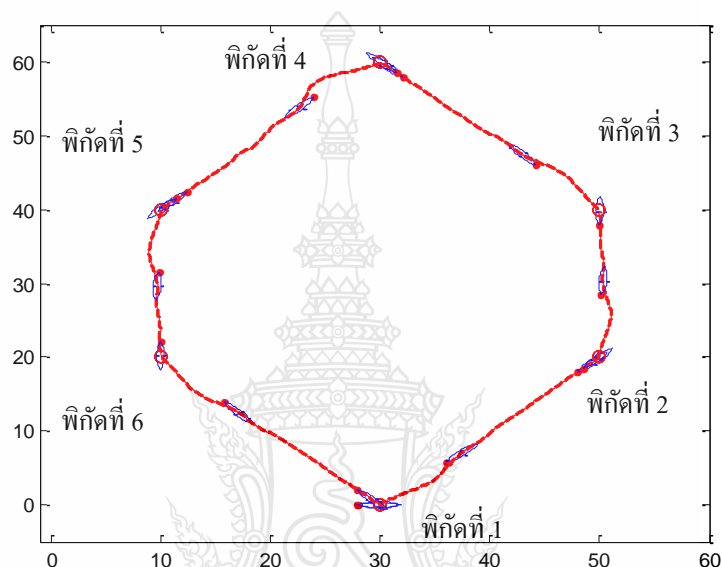
ถ้าเงื่อนไขเริ่มต้น ที่  $\varphi_0 = -45^\circ$  เมื่อใช้ Poleชุดที่(1) และ Poleชุดที่(2)



#### 4.1.2 การจำลองการเคลื่อนที่

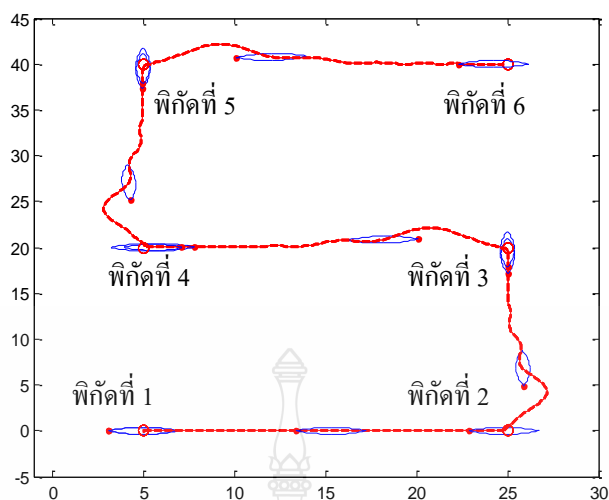
การจำลองการเคลื่อนที่ได้กำหนดให้เรือเคลื่อนที่ไปตามจุดพิกัดที่กำหนด (Waypoint Tracking) โดยทดลองการเคลื่อนที่เป็น 2 ลักษณะคือ

1. แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปร่างกลม (Circular Configuration)
2. แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นแบบรูปตัว S หรือแบบ Grid



ภาพที่ 4.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ แบบที่ 1 เป็นรูปร่างกลม

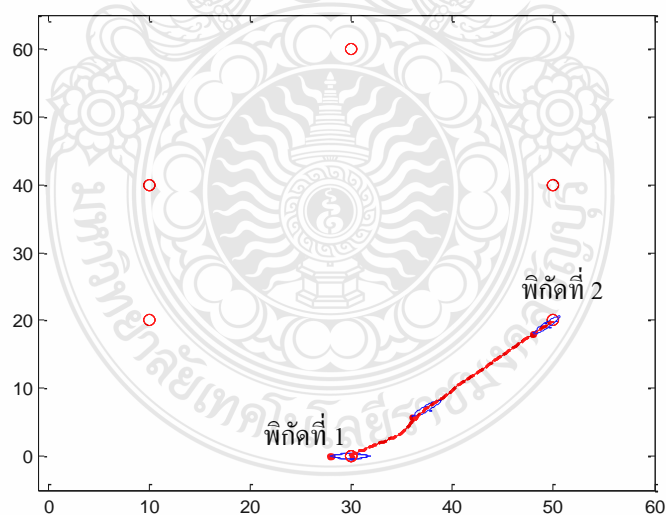
ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของทั้งสองแบบแสดงในภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.3 จะเห็นว่าแบบจำลองการควบคุมเรือทางคณิตศาสตร์สามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดได้ โดยเส้นสีแดง แสดงถึงเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางของเรือ ส่วนจุดสีแดงแสดงถึงตำแหน่งของ Trolling Motor ที่ใช้ขับเคลื่อนเรือและจุดวงกลมคือจุดพิกัดที่ต้องการให้เรือเคลื่อนที่ผ่านทั้ง 6 จุด



ภาพที่ 4.3 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ แบบที่ 2 เป็นแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นแบบ S หรือแบบ Grid

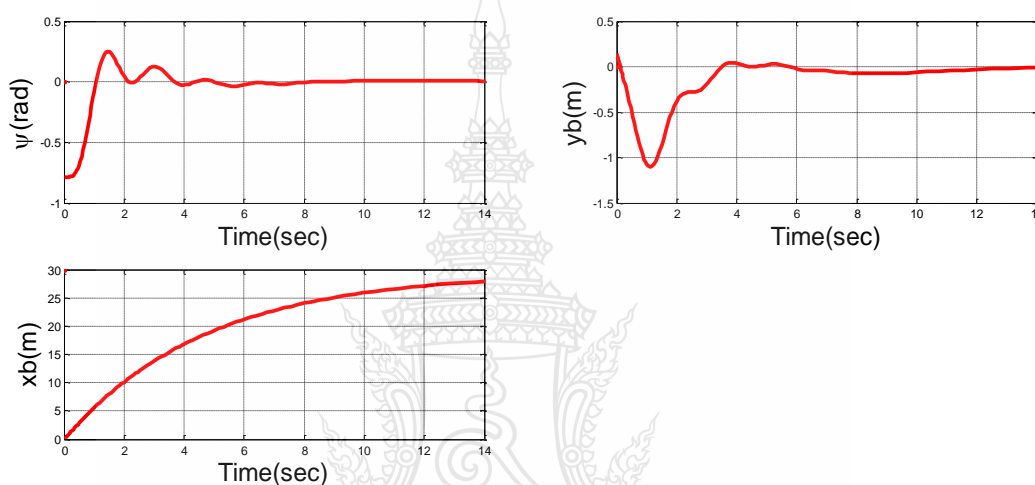
#### 4.1.3 เปรียบเทียบ ตัวแปรสถานะ State และ Estimate State

เมื่อพิจารณาเฉพาะการจำลองการเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม (Circular Configuration) เฉพาะในช่วงที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 4.4



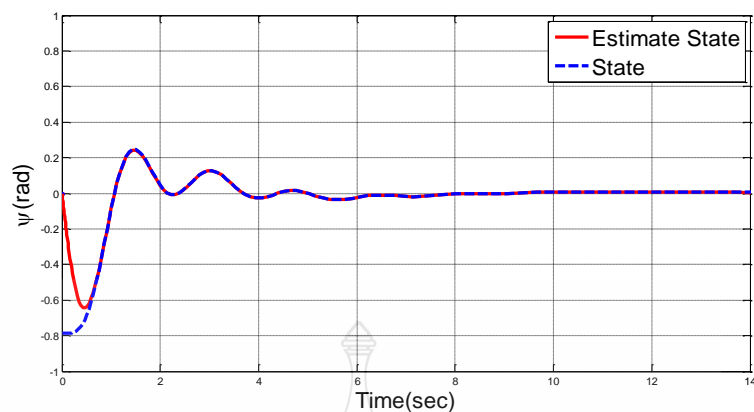
ภาพที่ 4.4 การเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม ในช่วงที่ 1

การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะ  $\varphi, x_b, y_b$  จะเห็นว่าทิศทางของหัวเรือเมื่อเริ่มต้นมีค่า -45 องศา และจะถูกปรับเปลี่ยนจนเป็น 0 องศา เมื่อทิศทางของหัวเรือเข้าสู่ทิศทางที่ต้องการ ส่วน  $x_b$  เมื่อเริ่มต้นมีค่า เท่ากับ 0 หลังจากนั้นค่า  $x_b$  จะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ ตามเวลาจนถึงเวลาที่มีการเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ใหม่ ส่วน  $y_b$  เมื่อเริ่มต้นมีค่า เท่ากับ 0 หลังจากนั้นก็จะเปลี่ยนไปและกลับเป็น 0 อีกครั้งเมื่อเรือเคลื่อนเข้าใกล้จุดพิถีติปลายทางที่ต้องการดังแสดงในภาพที่ 4.5

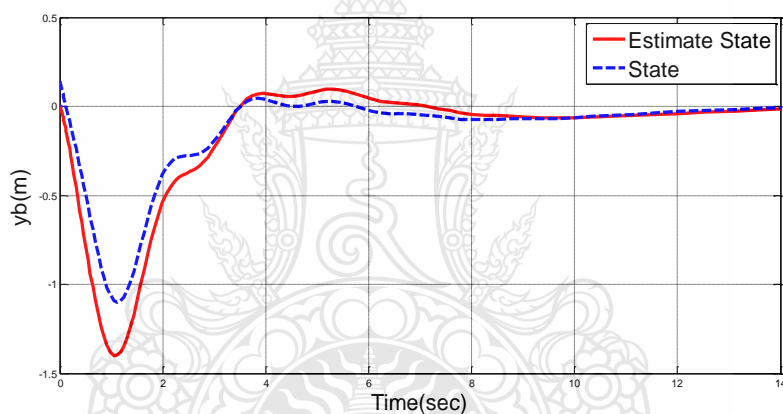


ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของ ตัวแปรสถานะ:  $\varphi, x_b, y_b$

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของ ตัวแปรสถานะ (x) และ การประมาณตัวแปรสถานะ (x) ในที่นี้พิจารณาเฉพาะ ตัวแปรสถานะ:  $\varphi, x_b, y_b$  ในการจำลองการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม ในช่วงที่ 1 ภาพที่ 4.6 แสดง การเปลี่ยนแปลงของ  $\varphi$  เทียบกับ  $\hat{\varphi}$  จะเห็นว่าเมื่อเริ่มต้นค่าประมาณของทิศทางหัวเรือจะมีค่า = 0 องศา ตามที่กำหนดไว้หลังจากนั้น ก็จะเปลี่ยนแปลงไปจนมีค่าเข้าใกล้ ตัวแปรสถานะ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าว ก็มีลักษณะเช่นเดียวกันสำหรับ ตัวแปรสถานะ  $y_b$  ดังแสดงในภาพที่ 4.7

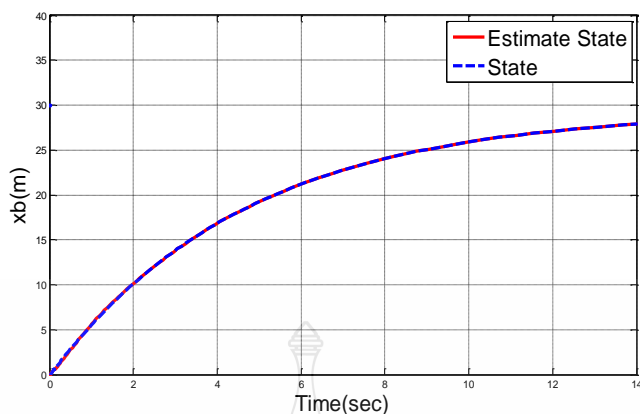


ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของ  $\psi$  เทียบกับ  $\hat{\psi}$

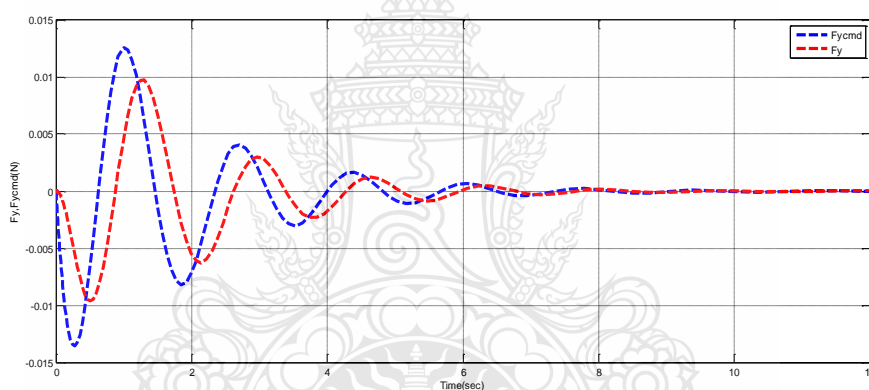


ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของ  $y_b$  เทียบกับ  $\hat{y}_b$

ส่วนการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสภาวะ และ ค่าประมาณของตัวแปรสภาวะ ของ  $x_b$  นั้นมีค่าเท่ากันตลอดเนื่องจาก  $x_b$  นั้นไม่ได้ถูกควบคุมโดย  $F_{y_{cmd}}$  จึงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตาม ความเร็วเริ่มต้น และ  $F_{x_{cmd}}$  โดยเป็นอิสระจาก  $F_{y_{cmd}}$  ดังแสดงในภาพที่ 4.8  $F_y$  จะมีการแกว่งที่น้อยกว่า  $F_{y_{cmd}}$  เนื่องจากในสมการพลศาสตร์ได้ถูกกรองสัญญาณด้วย low-pass filter อันดับสอง ดังแสดงในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของ  $x_b$  เทียบกับ  $\hat{x}_b$



ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของ  $F_y$  เทียบกับ  $F_{ycmd}$

#### 4.1.4 เปรียบเทียบ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer

##### 4.1.4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติ

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่าง Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าขนาดของเมตริกซ์ (แสดงค่าในวงเล็บ) ของ Reduced-Order Observer มีขนาดน้อยกว่า ซึ่งเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งของ Reduced-Order Observer ที่ทำให้ใช้เวลาหรือตัวแปรในการคำนวณน้อยลง ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการประมวลผลลงด้วยดังจะเห็นว่า เวลาที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของเรือคายัคใน MATLAB/Simulink เวลาในการคำนวณของ Reduced-Order Observer ในหนึ่ง Loop น้อยกว่าเวลาในการคำนวณของ Full-

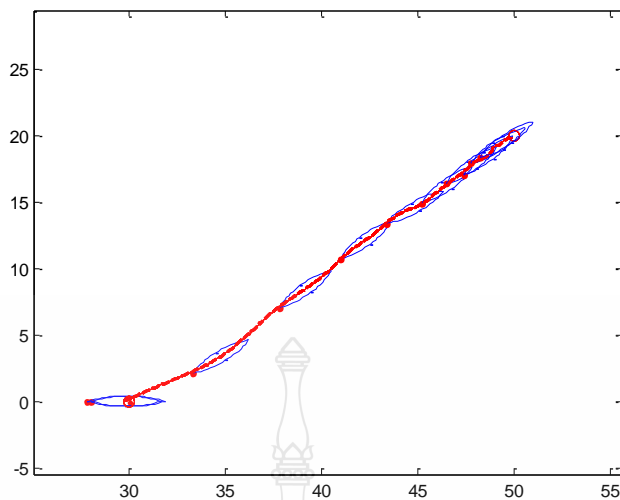
Order Observer ประมาณ 37% โดยเป็นเวลาในการจำลองการเคลื่อนที่ในแต่ละช่วงจุดของวงกลม จากจุดพิกัดหนึ่งไปยังอีกจุดพิกัดหนึ่งที่มีระยะห่างกัน 20 เมตร

**ตารางที่ 4.1** เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer จากระบบของเรือที่ใช้ในการวิจัยนี้

หัวข้อ	Full-Order Observer	Reduced-Order Observer
ตัวแปรสถานะ	X (10x1)	X2 (4x1)
อินพุต	Bu (10x1)	$\{A_{21}x_1 + B_2u\}$ (4x1)
เมตริกซ์ของระบบ	A (10x10)	A22 (4x2)
เอาท์พุต	C (10x10)	A12 (6x2)
สัญญาณเอาท์พุต	y (10x1)	$\{x_1 - A_{11}x_1 - B_1u\}$ (6x1)
สัญญาณอินพุต	Du	-----
ค่าเฉลี่ยของเวลาในการประมวลผล*	0.794 วินาที	0.421 วินาที

\* ค่าเฉลี่ยของเวลาในการประมวลผลของการจำลองการเคลื่อนที่ที่ใช้โปรแกรม MATLAB /Simulink จากการจำลองการเคลื่อนที่ โดยคอมพิวเตอร์ใช้ Note Book Aspire 4736G ซึ่งมีหน่วยประมวลผลเป็น Intel Core2 Duo processor (2.1 GHz)

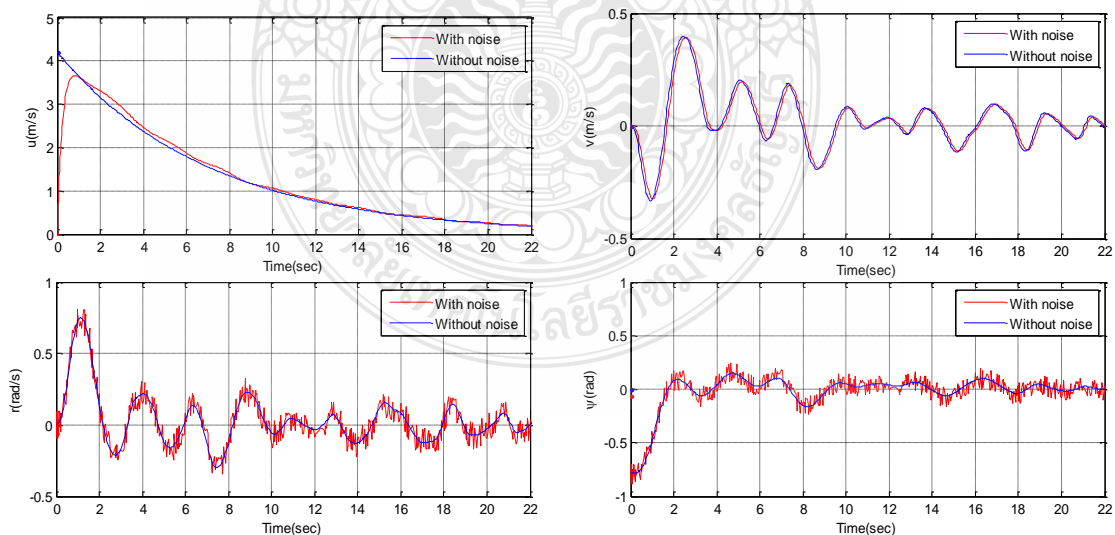
4.1.4.2 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนภายนอก (Noise) ของสัญญาณ GPS และ IMU



ภาพที่ 4.10 การเคลื่อนที่ของเรือจากจุดพิกัดที่ 1 ไป 2 โดยจำลองให้มี สัญญาณรบกวน

$$IMU(\varphi, r) = \pm 0.1 \text{ rad และสัญญาณรบกวน GPS } [(x)_b, (y)_b] = \pm 1 \text{ m}$$

จะเห็นว่าแม้ว่าเซนเซอร์ จะได้รับสัญญาณรบกวนสูงกว่าในระดับที่ระบุไว้ในตารางคุณสมบัติของอุปกรณ์นั้นๆเล็กน้อย ระบบก็ยังคงสามารถถูกควบคุมได้อยู่ และระบบยังคงค่าประมาณของตัวแปรสถานะเมื่อใช้ Full-State Feedback Control ร่วมกับ Full-Ordered Observer ในการควบคุมการเคลื่อนที่จากจุดพิกัดที่ 1 ไปยังจุดพิกัดที่ 2 ได้ดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.11 ผลการตอบสนองของ  $u, v, r, \varphi$  โดยจำลองให้มีสัญญาณรบกวน

$$IMU(\varphi, r) = \pm 0.1 \text{ rad และสัญญาณรบกวนGPS } [(x)_b, (y)_b] = \pm 1 \text{ m}$$

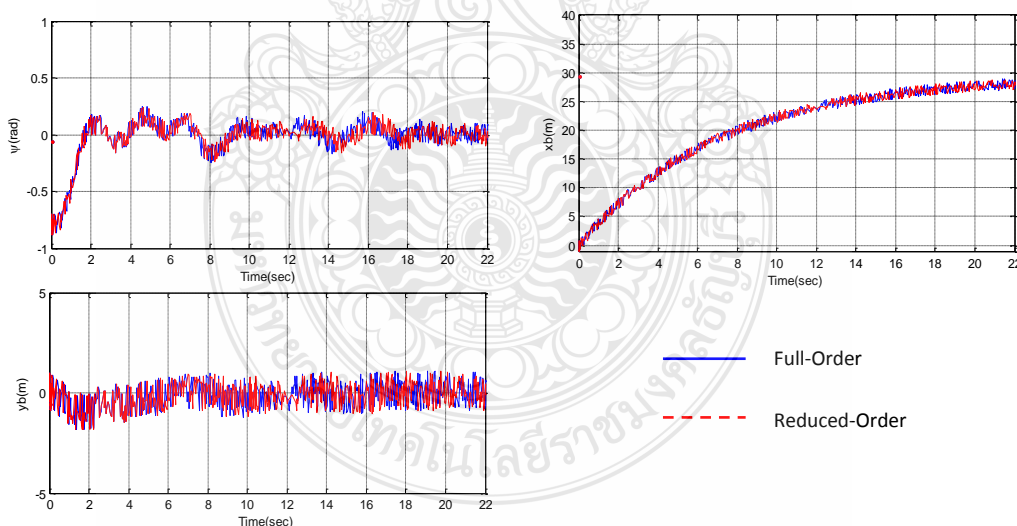
#### 4.1.4.3 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อ Noise ระหว่าง Full-Order และ Reduced-Order

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบ Error ( $y_b$ ) ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer เมื่อจำลองให้  $\varphi, r, x_b, y_b$  มีสัญญาณรบกวนดังนี้ IMU ( $\varphi, r$ ) และสัญญาณรบกวน GPS ( $x_b, y_b$ ) โดยนิยาม ค่าความผิดพลาดของ  $y_b$  จากแนวการเคลื่อนที่เส้นตรงระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดปลายว่า Error  $y_b$

โดยที่

$$\text{Error } y_b = \sqrt{\sum (y_b)^2}$$

ซึ่งสามารถใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer ได้โดยจากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า Error ( $y_b$ ) ของทั้ง Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer มีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนัก และไม่สามารถบ่งชี้ได้ชัดเจนว่า แบบไหนมีประสิทธิภาพในการควบคุมเรือได้ดีกว่ากัน ถ้ามีสัญญาณรบกวนภายนอกเข้ามารบกวน



ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนระหว่าง Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer

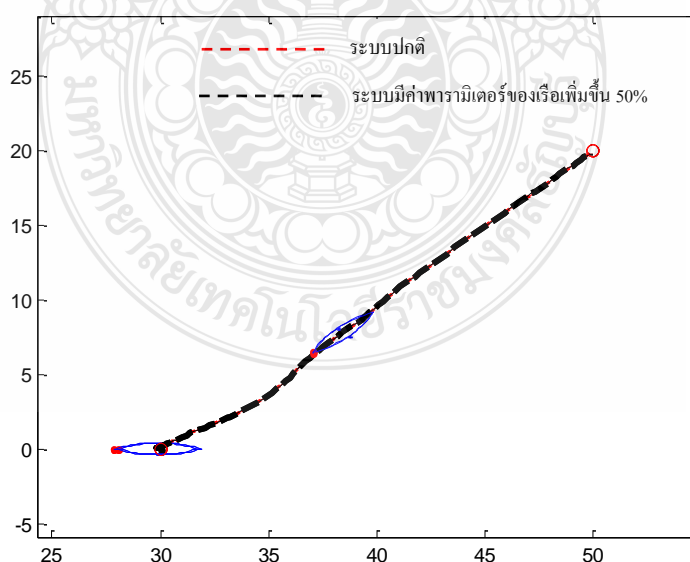


จากภาพที่ 4.12 จะเห็นว่า  $\varphi, x_b, y_b$  ของทั้ง Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer มีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนักกล่าวคือทั้ง Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer มีประสิทธิภาพในการควบคุมได้ดีพอๆกัน เมื่อระบบมีสัญญาณรบกวนภายนอกเข้ามารบกวน

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบ Error ( $y_b$ ) ของ Full Order Observer และ Reduced Order Observer เมื่อมีสัญญาณรบกวน

ระดับสัญญาณรบกวน	Error $y_b$	
	เมื่อใช้เทคนิค	เมื่อใช้เทคนิค
	Full-Order Observer	Reduced-Order Observer
0.01	4.5747	4.5631
0.10	6.3917	6.6098
1.00	16.2703	15.4844
5.00	59.1271	62.7242

#### 4.1.5 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของเรือเมื่อพารามิเตอร์ของเรือคายัคมีค่าเพิ่มขึ้น 50%



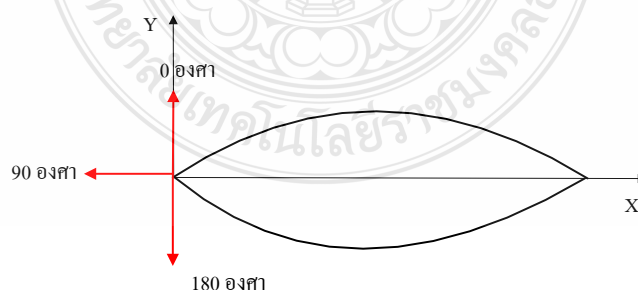
ภาพที่ 4.13 เปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่เมื่อ พารามิเตอร์ของเรือคายัคมีค่า เพิ่มขึ้น 50%

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบ Error  $\|y\|_b$  ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer เมื่อพารามิเตอร์ของเรือเพิ่มจาก 0% ถึง 50%

พารามิเตอร์เรือเพิ่มขึ้น	Error $\ y\ _b$	
	เมื่อใช้เทคนิค	เมื่อใช้เทคนิค
	Full-Order Observer	Reduced-Order Observer
0%	4.44	4.34
10%	4.52	4.36
20%	4.62	4.39
30%	4.71	4.41
40%	4.82	4.41
50%	4.93	4.42

จากตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาด  $\|y\|_b$  ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer เมื่อพารามิเตอร์ของเรือเพิ่ม จะเห็นว่า Reduced-Order Observer มีความสามารถในการควบคุมเรือ เมื่อพารามิเตอร์ของเรือเปลี่ยนแปลงไปดีกว่าแบบ Full-Order Observer เล็กน้อย

#### 4.2 ผลการทดสอบแรงเมื่อพอดพรวดพุ่งขึ้น หมุนไปที่มุมต่างๆ



ภาพที่ 4.14 แสดงการกำหนดมุมต่างๆที่ทำการวัดแรง

จากการทดสอบแรงที่เกิดจากพอดพรอเพาส์ชั้น เมื่อหันพอดพรอเพาส์ชั้นไปที่มุมต่างๆ จะได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แรงที่เกิดจากพอดพรอเพาส์ชั้น เมื่อหันพอดพรอเพาส์ชั้นไปที่มุมต่างๆ [11]

แรงในแกน (N)	มุม $\delta$ (องศา)		
	0	90	180
$F_x$	-6.131	487.525	13.704
$F_y$	-570.844	2.786	527.226
$F_z$	23.5785	23.2095	23.4355

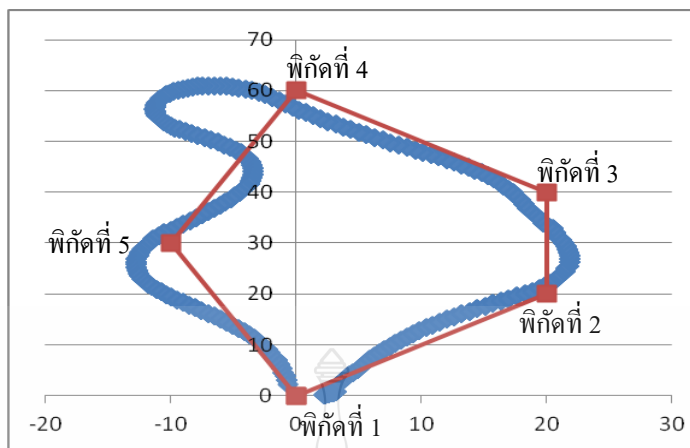
จากตาราง 4.4 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่าง  $F_y$  (N) และ  $\delta$  (Radian) จะได้ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ระหว่าง  $F_y$  (N) และ  $\delta$  (Radian) ดังนี้

$$\delta = 0.0029F_y + 1.6104 \quad (4.1)$$

### 4.3 ผลการทดสอบเรือจริง

#### 4.3.1 แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม (Circular Configuration)

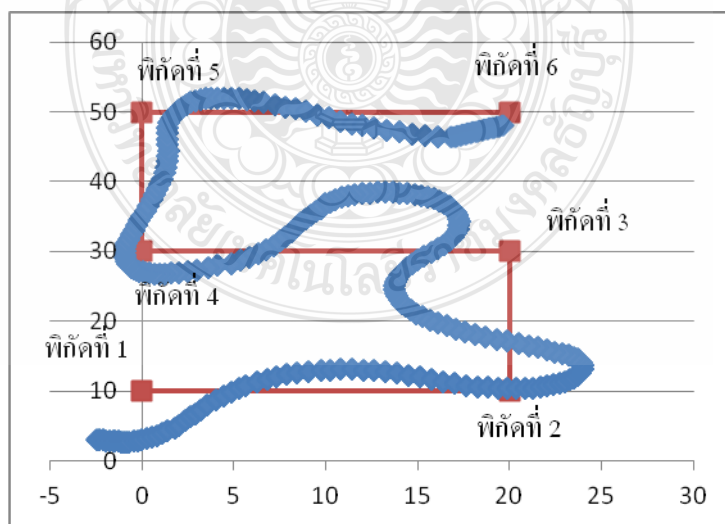
ในการทดสอบกับเรือคายัคจริง โดยทดสอบแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม โดยควบคุมให้เคลื่อนที่จากจุดพิกัดที่ 1 ไปยังจุดพิกัดที่ 2, 3, 4, 5 และกลับมายังจุดพิกัดที่ 1 ตามลำดับ โดยจุดเริ่มต้นไม่ได้เริ่มจากจุดที่ 1 จริงๆ แต่เป็นจุดใกล้เคียงเท่านั้นเนื่องจากการที่จะให้เรือคายัคเริ่มเคลื่อนที่จากจุดที่ 1 นั้นทำได้ยากมากเพราะลมพัดแรงมากและมีเพียงเรือลำที่จะทดสอบลำเดียวเท่านั้นที่อยู่ในน้ำจึงไม่สามารถนำเรือไปยังจุดที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ ผลการทดสอบจะเห็นว่าเรือคายัคสามารถเคลื่อนที่ไปตามจุดพิกัดที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้องแต่ความแม่นยำในการเข้าถึงจุดพิกัดที่กำหนด อาจจะต้องได้รับการปรับปรุง นอกจากนี้ในการทดสอบยังพบว่าถ้าหากความเร็วของเรือยิ่งมาก ค่า Overshoot ในการเลี้ยวของเรือเมื่อเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่ยิ่งมากตามไปด้วย



ภาพที่ 4.15 ผลการทดสอบเรือจริง ในการเคลื่อนที่แบบวงกลม

#### 4.3.2 แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นแบบรูปตัว S หรือแบบ Grid

ในการทดสอบกับเรือคายัคจริง โดยทดสอบแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นแบบรูปตัว S พบปัญหาในการเข้าจุดเริ่มต้นเช่นเดียวกับการทดสอบแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม แต่ผลการทดสอบก็ยังคงแสดงให้เห็นว่าเรือคายัคสามารถเคลื่อนที่ไปตามจุดพิกัดที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้อง โดยมีปัญหาในเรื่องความแม่นยำในการเข้าสู่จุดพิกัดที่กำหนดเช่นเดียวกัน นอกจากนี้เนื่องจากบั้งที่ทำการทดสอบนี้มีขนาดจำกัดไม่สามารถกำหนดระยะห่างระหว่างจุดสองจุดใดๆ ให้มากกว่านี้ได้ทำให้เรือมีระยะทางในการปรับตัวเข้าสู่เส้นทางน้อยเกินไป ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการปรับค่า  $r_d$  ให้มีขนาดมากขึ้น



ภาพที่ 4.16 ผลการทดสอบเรือจริง ในการเคลื่อนที่แบบ Grid

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัยและการอภิปรายผล

##### 5.1.1 ผลการตอบสนองของระบบ

ในการออกแบบ Observer ซึ่งเราเลือก Pole ที่ห่างไปทางด้านซ้ายมือของ S-Plane มากเท่าไรโดยที่ตำแหน่งของ Pole เอียงทำมุมกับแนวนอนเท่าเดิมระบบจะมี ขนาดของการแกว่งน้อยลง และมีผลการตอบสนองไวขึ้น

##### 5.1.2 การจำลองการเคลื่อนที่ของเรือคายัคด้วยสมการพลศาสตร์ทางคณิตศาสตร์

การควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนด เราสามารถประยุกต์ใช้ Full-State Feedback Controller ในการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ได้ โดยสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้ง Full-Order และ Reduced-Order Observers ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะเพื่อป้อนให้แก่ Controller โดย Reduced-Order Observer ในระบบนี้ใช้เวลาในการประมวลผลในแต่ละ Loop น้อยกว่า Full-State Feedback Controller ประมาณ 37%

##### 5.1.3 เปรียบเทียบ ตัวแปรสถานะ State และ Estimate State

พบว่า ค่าประมาณของ State จะมีค่าเข้าใกล้ State จริง เมื่อเวลามากขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ Luenberger Observer ตามที่แสดงไว้ในหัวข้อ 2.3 และในผลการทดลองข้อ 4.1.3

##### 5.1.4 เปรียบเทียบ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer

###### 5.1.4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติ

จากการจำลองการเคลื่อนที่ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ใน MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นได้ว่าเวลาในการจำลองการเคลื่อนที่ด้วย MATLAB/Simulink เมื่อใช้ Reduced-Order Observer ในระบบควบคุมของงานวิจัยนี้จะใช้เวลาน้อยกว่าของ Full-Order Observer ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับงานควบคุมที่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเมตริกขนาดใหญ่ๆ ถ้าสามารถนำการประมาณค่าแบบ Reduced-Order Observer ไปประยุกต์ใช้ในงานจริงได้ ก็จะสามารถประหยัดเวลาและกำลังในการประมวลผลได้มาก

###### 5.1.4.2 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนภายนอก

จะเห็นว่า แม้ว่า เซนเซอร์ GPS และ IMU จะได้รับสัญญาณรบกวนในระดับสูงกว่าที่ระบุใน Data Sheet ของอุปกรณ์นั้นๆ เล็กน้อย ระบบควบคุมก็ยังคงสามารถควบคุมให้เรือ

เคลื่อนที่ไปตามจุดพิกัดที่กำหนดได้อยู่ และระบบยังคงประมาณค่าตัวแปรสถานะได้ดีอยู่ กระบวนการทดสอบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตัดสินใจเลือกใช้เซ็นเซอร์เพื่อนำมาใช้เป็น ตัววัดสัญญาณในการควบคุมได้ โดยสร้างแบบจำลองที่มีสัญญาณรบกวน แล้วทดสอบว่าผลการตอบสนองของระบบที่ถูกควบคุมยังสามารถทำงานได้ตามคำสั่งหรือไม่ ซึ่งจะทำให้มั่นใจว่า สามารถใช้อุปกรณ์วัดสัญญาณนั้นๆ ได้ในระบบควบคุมที่เราต้องการ

#### 5.1.4.3 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนภายนอก

ระหว่างเมื่อใช้ Full-Order Observer และเมื่อใช้ Reduced- Order Observer ไม่มี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

#### 5.1.5 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของเรือเมื่อพารามิเตอร์ของเรือเพิ่มขึ้น 50%

ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

#### 5.1.6 เปรียบเทียบการทดลองเรือจริงกับการทดลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากผลการทดลองเรือค่ายจริง จะเห็นว่าเรือเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนดไว้ได้ แต่ความแม่นยำในการเคลื่อนที่เข้าหาจุดที่กำหนดไว้ของเรือที่ทดสอบมีความแม่นยำน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการควบคุมอัตโนมัติ เราสามารถใช้ Observer ทำงานแทนอุปกรณ์วัดสัญญาณได้ แต่ทั้งนี้ความแม่นยำในการประมาณค่านี้ ขึ้นโดยตรงกับความแม่นยำในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่จะทำการควบคุม

การที่ผลการทดลองเรือค่ายจริงมีความแม่นยำในการเคลื่อนที่เข้าหาจุดที่กำหนดไว้ น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากเราไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงของเรือค่าย แต่เราสามารถปรับปรุงการเคลื่อนที่ของเรือ ให้มีความแม่นยำมากขึ้นได้ โดยการปรับค่าคงที่ (Gain) ของระบบป้อนกลับ หรือเลือกตำแหน่ง Pole ของระบบควบคุมใหม่

เนื่องจากสถานที่ในการทดสอบเรือค่ายจริงมีพื้นที่น้อยเกินไป จึงทำให้ดูเหมือนว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของเรือค่ายจริงมีความแม่นยำน้อย ในการใช้งานจริงถ้านำไปประยุกต์ใช้งานในพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ๆ ระยะระหว่างจุดมากกว่า 100 เมตร ความแม่นยำในการเข้าหาจุดที่กำหนดไว้ จะสูงขึ้นกว่าที่เห็นในการทดสอบนี้

## รายการอ้างอิง

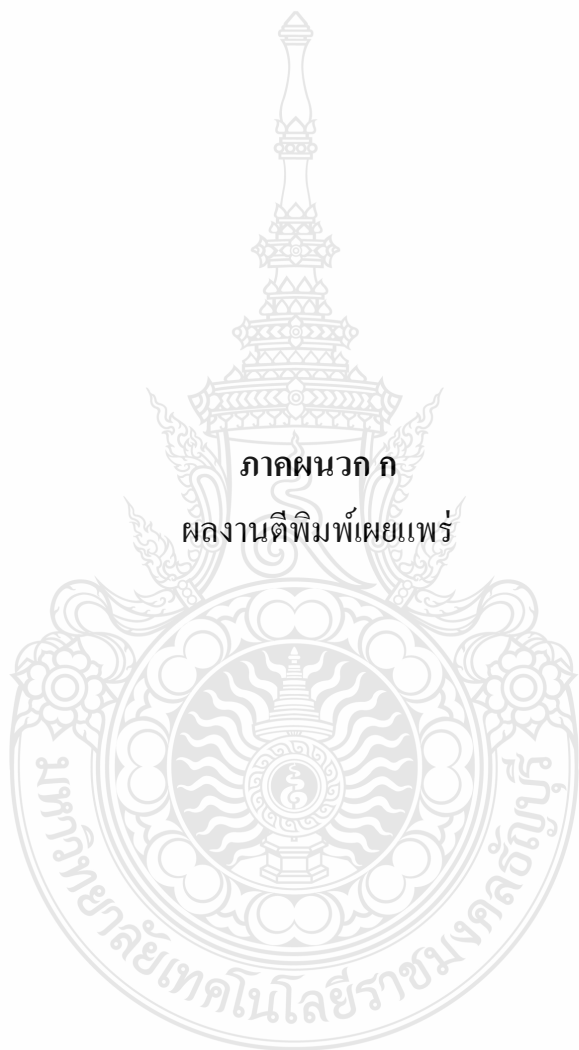
- [1] Jeffrey W. Stettler, “**Steady and Unsteady Dynamics of an Azimuthing Podded Propulsor Related to Vehicle Maneuvering.**” Phd. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [2] M.B. Greytak, “**High Performance Path Following for Marine Vecicles Using Azimuthing Podded Propulsion.**” M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [3] M. Bibuli, G. Bruzzone, M. Caccia, G. Indiveri, and A.A. Zizzari, “**Line Following Guidance Control : Application to the Charlie Unmanned Surface Vehicle**”., Intelligent Robots and System, 2008 *IROS* 2008, *IEEE/RSJ* International Conference on 2008.
- [4] J. Curcio, J. Leonard, and A. Patrikalakis,” **SCOUT - a Low Cost Autonomous Surface Platform for Research in Cooperative Autonomy.** *IEEE OCEANS*, 2005.
- [5] Richard C. Dorf., Robert H. Bishop., **Modern Control Systems**, 11<sup>th</sup> edition, Pearson Education, Inc., 2008.
- [6] Thai Kayak Center, (Online), Available: <http://thaikayakcenter.com>
- [7] AE3145 Electrical Resistance StrainGageCircle,(Online), Available:  
<http://soliton.ae.gatech.edu/people/jcraig/classes/ae3145/Lab2/bridge-measure.pdf>
- [8] Hiper G-Serie.\\Topcon Position Systems Inc, (Online), Available:  
<http://www.topconpositioning.com/products/gps/receivers/hiper-ga>
- [9] Technical Product Overview.\\ MicroStrain Inc, (Online), Available: <http://www.microstrain.com>
- [10] Crossbow 440 User’s Manual.\\Crossbow Technology Inc, (Online), Available:  
<http://www.xbow.com>
- [11] ชีรชาติ พรรณเศรษฐ, สุภโชค ต้นตวิทัศน์, และ ณิชพร พุ่มมา, การควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือคายัคด้วยรีโมทควบคุม, วิทยานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, หน้า 67-68

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



สมาคมวิชาการหุ่นยนต์แห่งประเทศไทย  
Thai Robotics Society



การประชุมวิชาการ  
ทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ ๒๕๕๔  
๒๖-๒๗ พฤษภาคม ๒๕๕๔

26-27 May 2011

2011 TRS Conference

on Robotics and Industrial Technology

ณ จตุรัสวิทยาศาสตร์ อพวช. อาคารจตุรัสสามบุรี กรุงเทพมหานคร  
NSM Science Square, Chamchuri Square, Bangkok, Thailand



## การประชุมวิชาการทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ ๒๕๕๔

๒๖ - ๒๗ พฤษภาคม ๒๕๕๔

ณ จัตุรัสวิทยาศาสตร์ อพวช. อาคารจัตุรัสจามจุรี กรุงเทพฯ

URL: <http://www.tris.or.th>

### คณะกรรมการจัดงาน

#### ประธานคณะกรรมการ

ดร.ถิศา มณีวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

#### ประธานจัดประชุมวิชาการ

ผศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### คณะกรรมการฝ่ายจัดงาน

รศ.ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.สยาม เจริญเสียง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร.ภูติส ลักษณะเจริญ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.วรา วราวิทย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.สัญญา มิตรเอม

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.ชนินทร์ บุญลักษณ์สรณ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผศ.ดร.สาทิสส์ ทรงชน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผศ.ดร.ธีรนุช จันทโสภีพันธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผศ.ดร.ชัยพล ธงชัยสุรศักดิ์กุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.ดร.จักรกฤษณ์ ศุทธากรณ์

มหาวิทยาลัยมหิดล

ดร.ปาษาณ กุลวานิช

กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

น.ท.ดร.กฤติวัฒน์ สุทธิวารี ร.น.

กองวิจัยและพัฒนา กรมอิเล็กทรอนิกส์ทหารเรือ กองทัพเรือ

ดร.หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.เชิดพงษ์ ดีเลิศไพบุลย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดร.ปัทมาสรี ฤทธิประวัตติ

มหาวิทยาลัยมหิดล

อ.ปัญญา เหล่าอนันต์ธนา

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อ.อรรถพล กัณหเวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

อ.ธีรวัฒน์ย์ ปานกลาง

มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

## คณะกรรมการฝ่ายวิชาการพิจารณาบทความ

รศ.ดร.รัชทิน จันท์เจริญ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.สยาม เจริญเสียง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ภูติส ลักษณะเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ชนินทร์ บุญลักษณ์สรณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ปิยะต สุรักษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.สุพจน์ สุขไพฑารมณี	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
ผศ.ดร.สาทิสส์ ทรงชน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ชัยพล ชงชัยสุรชด์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.เริงวุฒิ ชูเมือง	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.ปานาน กุลวานิช	กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
น.ท.ดร.กฤติวัฒน์ สุทธิวารี ร.น.	กองวิจัยและพัฒนา กรมอิเล็กทรอนิกส์ทหารเรือ กองทัพเรือ
ดร.กวิตา มณีวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.เชิดพงษ์ ดีเลิศไพบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ปรัชญา เปรมปรานีรัชต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.พนัส นฤฤทธิ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ชัยวัฒน์ หนูทอง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.นิรุช จิรสวรรณกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.วรชาติ แซ่ก๊ก	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## คณะกรรมการที่ปรึกษา

ศ.ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.ชิต เหล่าวัฒนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.มนูกิจ พานิชกุล	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ดร.สุธี ผู้เจริญชนะชัย	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

## ผู้ประสานงาน

นายเอกลักษณ์ ศุภมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
---------------------	---------------------------------------

- C06 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบระบบควบคุมแบบคาดคะเนกำลังโดยตรงล่วงหน้ากับการคาดคะเนกระแส  
ล่วงหน้าสำหรับคอนเวอร์เตอร์สามเฟส 63  
Analysis and Comparison of a Predictive Direct Power Control and Predictive Current Control for a  
Three-Phase Converter  
ศุภชัย เรืองเรือง ทวีธรรม สอนลาย และ สุขสันต์ นุ่นงาม  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- C07 การควบคุมความสมดุลเรือแบบฟัซซี่ 69  
Fuzzy Control of Ship Stabilizer System  
มานพ ห่างภัย และ ชัยยพล ชงชัยสุรชัตกุล  
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- C08 การออกแบบตัวควบคุมคาสเคดแบบคงทนกำหนดโครงสร้างได้แบบใหม่สำหรับวงจรลดทอนแรงดันโหมด 75  
กระแส  
Fixed-Structure Robust Cascade Control for Current Mode Buck Converter  
พิษณุ ศรีธงชัย<sup>1</sup> และ สมยศ เกียรติวนิชวิไล<sup>12</sup>  
<sup>1</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
<sup>2</sup>ศูนย์นวัตกรรมระบบพลังงาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- R01 Experimental Study of Tactile Stimulating System in Back Area for Warning Purpose 81  
Suthinanth Rattanachotithavorn<sup>1</sup>, Pattarawit Sae-Ong<sup>1</sup> and Witaya Wannasuphprasit<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>International School of Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University  
<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
- R02 Steering Control of an Intelligent Vehicle Using Fuzzy based Gain Tuning PD Control 89  
Somphong Thanok, Somphop Limsoonthrakul and Manukid Parnichkun  
School of Engineering and Technology, Asian Institute of Technology
- R03 A Possibility for Expressing Multi-Emotion on Robot Faces 93  
Trin Veerasiri and Djitt Laowattana  
Institute of Field robotics, King Mongkut's University of Technology Thonburi
- R04 การเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดของเรือคายัคด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ 98  
Waypoint-Tracking of Kayak Boat Using State Variable Feedback Controller  
กิตต์เฉลิม ธรรมไชยธรรมศ<sup>1</sup> ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์<sup>1</sup> มนูญศักดิ์ งานทอง<sup>1</sup> และ ปาษาน กุลวานิช<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
<sup>2</sup>กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

## การเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดของเรือคายัคด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ Waypoint-Tracking of Kayak Boat Using State Variable Feedback Controller

นายกิตต์เฉลิม ธรรมไชยธรรม<sup>1</sup> ดร. ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์<sup>2</sup> ดร. มนุศักดิ์ जानทอง<sup>2</sup> ดร. ปาษาณ กุลวานิช<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

โทร 0-2996-0230 โทรสาร 0-2996-0230 อีเมล [kitchalerm@gmail.com](mailto:kitchalerm@gmail.com)

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี 12110

โทร 0-2594-3430 โทรสาร 0-2594-3432 อีเมล [p pradya@gmail.com](mailto:p pradya@gmail.com)

<sup>3</sup> กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรุงเทพฯ 10400

โทร 0-2201-7388 โทรสาร 0-2201-7388 อีเมล [pasan@fibo.kmutt.ac.th](mailto:pasan@fibo.kmutt.ac.th)

Mr.Kitchalerm Thamchaitas<sup>1</sup>, Pradya Premprenerach<sup>2</sup>, Manusak Janthong<sup>2</sup>, Pasan Kulvanit<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Mechanical Engineering Department Rajamangala University of Technology Thanyaburi,  
Phatumthani, 12110, Thailand

Tel: 0-2996-0230, Fax: 0-2996-0230, E-mail: [kitchalerm@gmail.com](mailto:kitchalerm@gmail.com)

<sup>2</sup> Mechanical Engineering Department Rajamangala University of Technology Thanyaburi,  
Phatumthani, 12110, Thailand

Tel: 0-2594-3430, Fax: 0-2594-3432, E-mail: [p pradya@gmail.com](mailto:p pradya@gmail.com)

<sup>3</sup> Department of Science Service (DSS), Ministry of Science and Technology, Ratchatewi,  
Bangkok, 10400, Thailand

Tel: 0-2201-7388, Fax: 0-2201-7388, E-mail: [pasan@fibo.kmutt.ac.th](mailto:pasan@fibo.kmutt.ac.th)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือคายัค ตามจุดพิกัดที่กำหนด ด้วยระบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ(State Variable Feedback Control) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเรือและสร้างระบบควบคุมแบบ Full-State Feedback Control โดยมี Observer เป็นตัวจำลองสถานะ State และได้จำลองการเคลื่อนที่ โดยกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ เป็นแบบวงกลมและแบบGrid ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเรือเคลื่อนที่ผ่านจุดพิกัดที่กำหนดไว้อย่างแม่นยำ

### Abstract

In this research, a waypoint-tracking controller using State Variable Feedback Control is implemented and applied to control kayak motion. Mathematical kayak model is used for testing a Full State Feedback Control using Observer to estimate kayak's states. Two configuration of waypoints, Circular configuration and Grid configuration were tested the results showed that the kayak was able to track 2 type waypoint configuration accurately.

### 1. บทนำ

การควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ เป็นหัวข้อสำคัญในงานวิจัยด้าน Motion Control ซึ่งอาจแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ Dynamic System Modeling และ Trajectory Tracking โดย Jeffrey W.Stettler [1] ได้ศึกษา Dynamics ของ Azimuthing Podded Propulsion นอกจากนี้ Matthew B. Greytak [2] ได้ศึกษา การควบคุมแบบ Path Following สำหรับเรือคายัค โดยใช้ Azimuthing Podded Propulsion และ M.Bibuli [3] ได้นำเสนอระบบควบคุม โดยการ Stabilized Error Variable ให้เป็นศูนย์ เพื่อควบคุมเรือให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด โดยเขาได้ประยุกต์สร้างตัวควบคุมให้กับเรือ Charlie USV (Unmanned Surface Vehicle) ซึ่งพัฒนาโดย CNR-ISSIA ในงานวิจัยนี้จำลองการเคลื่อนที่ของเรือคายัค ซึ่งเป็นSurface Vehicle โดยใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับหรือ Full-State Feedback Control ร่วมกับ Observer (ดูอธิบายในหัวข้อที่ 2) และจะจำลองการเคลื่อนที่ของเรือให้เป็นไปตามจุดต่างๆที่กำหนดไว้ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

2. Dynamics ของเรือคายัค และ Controller

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเรือคายัคสามารถเขียนอยู่ในรูป State Space Model ได้ดังนี้

$$\dot{\vec{X}} = A\vec{X} + B\vec{U} \tag{1}$$

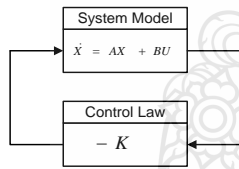
โดย State (x) ของระบบ คือ

$$x = [u \ v \ r \ \varphi \ \varphi_{int} \ x_b \ y_b \ y_{bint} \ \dot{F}_y \ F_y]^T \tag{2}$$

โดย  $u, v$  คือความเร็วในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ของเรือ และ  $r, \varphi$  คือ อัตราเร็วเชิงมุม และองศาการหมุนของหัวเรือ และ  $x_b, y_b$  คือตำแหน่งของเรือ ณ เวลาต่างๆ และ  $\dot{F}_y, F_y$  คือแรงที่มากระทำจาก Podded Propulsion และ  $\varphi_{int}, y_{bint}$  คือเงื่อนไขเริ่มต้นของเรือในช่วงการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจากพิกัดเริ่มต้นไปยังพิกัดปลายและรายละเอียดของ Matrix A และ B แสดงในภาคผนวก

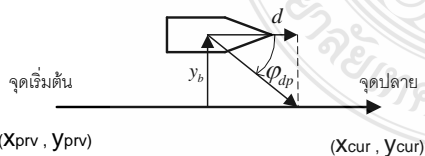
ในขั้นแรก จะแสดงการออกแบบ ค่า Gain ในการควบคุมแบบป้อนกลับโดย ถ้าพิจารณา Feedback State Model ดังรูปที่ 1 โดยกำหนด Control Law ให้เป็นแบบ PID Control แรงในแนวแกน  $y (F_{ycmd})$  เพื่อควบคุม ให้เรือเคลื่อนที่ ตามแนวเส้นตรงจากจุดพิกัดเริ่มต้น ไปยังจุดพิกัดปลาย โดยจะนิยาม ดังนี้

$$F_{ycmd} = -K_{pH}(\varphi - \varphi_d) - K_{dH}r - K_{iH} \int (\varphi - \varphi_d) dt \tag{3}$$



รูปที่ 1 Full State Feedback Block Diagram

พิจารณาในขณะที่เรือเคลื่อนที่โดยอยู่นอกเส้นทางเป็นระยะ  $y_b$  ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพขณะเรือเคลื่อนที่อยู่นอกเส้นทาง

จะได้ว่า 
$$\varphi_{dp} = -\tan^{-1} \frac{y_b}{d} \tag{4}$$

ถ้ามุมมีขนาดเล็กๆ สมการที่(4) สามารถ Linearize ได้เป็น

$$\varphi_{dp} = -\frac{1}{d} y_b = -K_p y_b \tag{5}$$

ซึ่งค่า  $1/d$  ก็คือ Proportional Gain ( $K_p$ ) ของ Control Law ส่วน Integral Control และ Derivative Control ถูกรวมเข้าไปใน Control Law เพื่อชดเชยแรงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มากระทำกับเรือ เช่น

คลื่น ลม และเพื่อให้ระบบมี Damping เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยที่ทิศทางของหัวเรือที่ต้องการ เนื่องจาก Integral Control คือ

$$\varphi_{di} = -K_i y_{bint} \tag{6}$$

และทิศทางของหัวเรือที่ต้องการเนื่องจาก Derivative Control คือ

$$\varphi_{dd} = -K_d (v + u_0 \varphi) \tag{7}$$

ดังนั้นทิศทางของหัวเรือที่ต้องการเนื่องจาก Control ทุกตัวเขียนได้เป็น

$$\varphi_d = \varphi_{dp} + \varphi_{di} + \varphi_{dd} \tag{8}$$

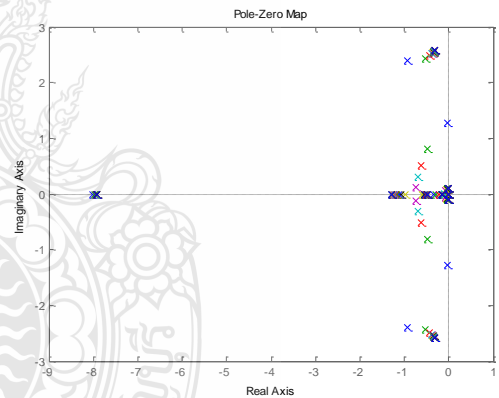
นำ (5),(6),(7) และ (8) แทนใน (3) และจัดรูปใหม่จะได้

$$F_{ycmd} = -Kx \tag{9}$$

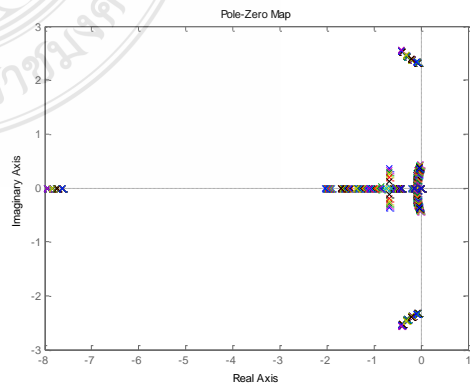
โดยที่

$$K = [0 \ K_{pH}K_d \ K_{dH} \ K_{pH}(1 + K_d u_0) \ K_{iH} \ 0 \ K_{pH}K_p \ K_{pH}K_i \ 0 \ 0] \tag{10}$$

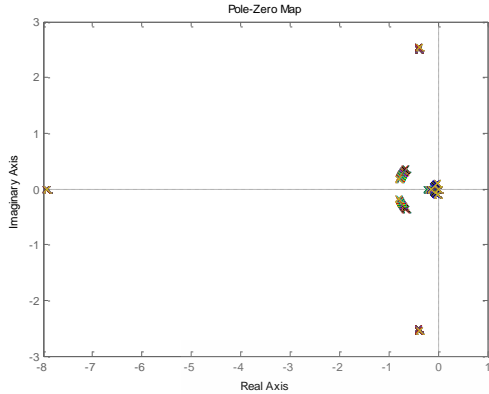
จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ Close-Loop Pole-Zero เมื่อค่า  $d$  เปลี่ยนแปลงจะได้ว่าค่า  $d$  ที่ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1-15 ( $K_p$  อยู่ในช่วง 0.066-1) ดังแสดงในรูปที่ 3 ในงานวิจัยนี้ได้เลือก  $d=4$  ( $K_p=0.25$ ) เมื่อใช้  $d=4$  และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ Close-Loop Pole-Zero เมื่อ  $K_i, K_d$  และ  $K_{iH}$  เปลี่ยนแปลงจะได้ว่าค่า  $K_i$  ที่ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพ มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 0.15 และ  $K_d$  มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 0.3 ดังแสดงในรูปที่ 4 และ  $K_{iH}$  มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 0.004 ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 3 Close-Loop Pole-Zero ของ d=1 ถึง 15



รูปที่ 4 Close-Loop Pole-Zero เมื่อ  $d=4, k_p=[0-0.15]$  และ  $k_d=[0-0.3]$



รูปที่ 5 Close-Loop Pole-Zero เมื่อ  $d=4, k_f=[0-0.15],$

$k_d=[0-0.3]$  และ  $K_H=[0-0.004]$

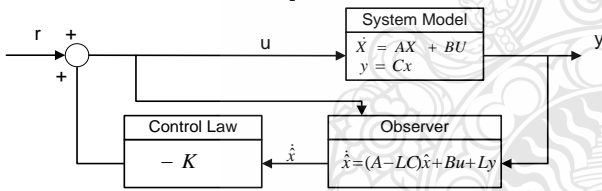
จากงานวิจัยของ Greytak [2] ได้ให้ความสัมพันธ์  $K_{pH}$  และ  $K_{dH}$  ที่สัมพันธ์กับตัวแปรของเรือไว้ดังนี้

$$K_{dH} = \frac{2\lambda[(I]_{zz} - N_f) + N_f}{x_p} \tag{11}$$

$$K_{pH} = \frac{\lambda^2(I_{zz} - N_f)}{x_p} \tag{12}$$

ในงานวิจัยนี้ ถ้าใช้ตัวแปรของเรือที่สร้างขึ้นจะได้  $K_{pH}=-0.0183$   $K_{dH}=-0.226$  ซึ่งจะเห็นว่าค่าใกล้เคียงกับค่า  $K_f, K_d$  และ  $K_H$  ที่เราเลือกใช้

Observer ได้ถูกนำมาใช้เพื่อประมาณค่า State ของเรือเพื่อใช้ร่วมกับ Control Law ดังแสดงใน รูปที่ 6



รูปที่ 6 Block Diagram ของ Controller และ Observer

State Space ของระบบเรือสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{13}$$

DG Luenberger ได้ให้นิยามของ Observer ของระบบไว้ดังนี้

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \tag{14}$$

โดย  $\hat{x}$  คือ ค่าประมาณของ State (X) และ L คือ Observer Gain Matrix โดย Observer มี อินพุต 2 ตัวคือ  $u$  และ  $y$  และให้ เอาพุตเป็น  $\hat{x}$  เนื่องจากเราไม่รู้ค่าเริ่มต้นของ  $x(t_0)$  เราจึงต้องกำหนด ค่าเริ่มต้น  $\hat{x} = 0$  ให้แก่ Observer ด้วย ตามหลักการของ Observer เมื่อ  $t \rightarrow \infty$  ค่าประมาณของ State จะมีค่าเข้าใกล้ค่า State ( $\hat{x} \rightarrow X$ ) ค่าความผิดพลาดของค่าประมาณที่ได้จาก Observer,  $e(t)$  แสดงได้ดังนี้

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \tag{15}$$

และค่าความผิดพลาดจะเข้าใกล้ศูนย์เมื่อ  $t \rightarrow \infty$  จะได้  $e(t) \rightarrow 0$

เราจึงสามารถหาค่า L ที่ทำให้ Tracking Error มีความเสถียรได้จากสมการ (15) หาค่าสัมพันธ์ของความผิดพลาด(e) จะได้

$$\dot{e} = \dot{x} + \dot{\hat{x}} \tag{16}$$

แทน (13) และ (14) ลงใน (16) จะได้

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \tag{17}$$

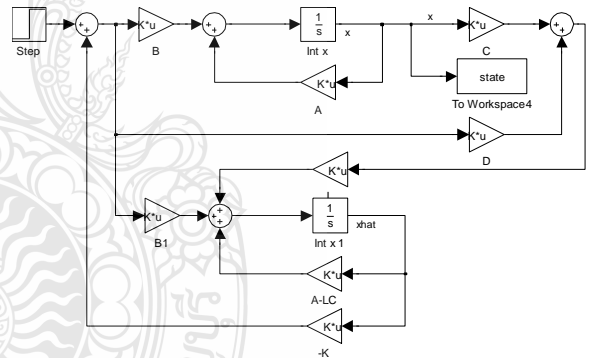
จะได้ว่า ทุกค่า  $e(t_0)$  ใดๆ เมื่อ  $t \rightarrow \infty$  จะได้ว่า  $e(t) \rightarrow 0$  ถ้าหากสมการ(18) มีรากอยู่ด้านซ้ายมือของ S-Plane

$$\det(\lambda I - (A - LC)) = 0 \tag{18}$$

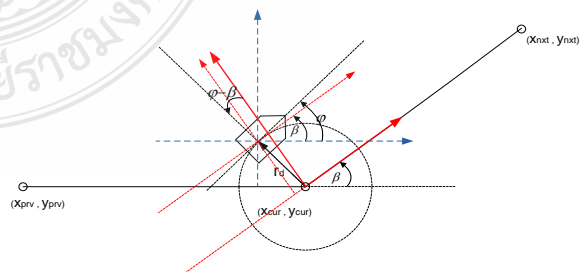
จึงนำมาใช้ในการปรับค่า L จากตำแหน่ง Pole ที่ต้องการได้

### 3. การจำลองด้วย MATLAB

การจำลองการเคลื่อนที่ในที่นี่ใช้ โปรแกรม MATLAB ในการจำลองการเคลื่อนที่ โดยสร้างพารามิเตอร์ต่างๆของเรือไว้ใน M-File และเรียกใช้ Simulink ในการแก้สมการเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ของ State(x) ที่เวลาต่างๆ โดยการสร้าง Full-State Feedback Controller แสดงในรูปที่ 7 การเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ไปยังแนวการเคลื่อนที่ใหม่นั้นจะพิจารณาได้ดังนี้ เดิมการเคลื่อนที่ของเรือ จะอยู่ในแนวเส้นตรงระหว่างจุดพิกัด  $(x_{prv}, y_{prv})$  กับ  $(x_{cur}, y_{cur})$  และกำลังจะเปลี่ยนการเคลื่อนที่ไปในแนวเส้นตรงที่สองระหว่างจุดพิกัด  $(x_{cur}, y_{cur})$  กับ  $(x_{nxt}, y_{nxt})$  เราจะสร้างวงกลมรัศมี  $r_d$  เป็นตัวช่วยบ่งบอกการสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงแรกและจะเปลี่ยนเส้นทาง เป็นแนวเส้นตรงที่สอง ดังแสดงในรูปที่ 8 โดย  $\varphi$  คือทิศทางของการเคลื่อนที่ของหัวเรือ



รูปที่ 7 Block Diagramของ Full-State Feedback Controller ที่สร้างในโปรแกรม Simulink / MATLAB



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ จากแนวเส้นตรงแรกไปยังแนวเส้นตรงที่สอง

จากรูปที่ 8 เราจะได้ว่า มุมสัมพันธ์ระหว่างแนวการเคลื่อนที่เก่าและใหม่ ( $\beta$ ) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



$$\beta = \tan^{-1} \frac{(y_{next} - y_{cur})}{(x_{next} - x_{cur})} - \tan^{-1} \frac{(y_{cur} - y_{prv})}{(x_{cur} - x_{prv})} \quad (19)$$

เราสามารถกำหนดค่ามุมเริ่มต้นของเรือเทียบกับพิกัดใหม่ได้เป็น

$$\varphi_{new} = \varphi - \beta \quad (20)$$

และสามารถกำหนด ตำแหน่งเริ่มต้นเทียบกับพิกัดใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} x_{new} &= -r_d \cos(\varphi - \beta) \\ y_{new} &= r_d \sin(\varphi - \beta) \end{aligned} \quad (21)$$

ในการ จำลองการเคลื่อนที่ เราจะเขียนคำสั่งใน M-File ให้มีการ กำหนดค่าเริ่มต้นของ  $\varphi, x, y$  ใหม่ ในทุกๆครั้งที่มีการเปลี่ยนแนว การเคลื่อนที่ ทำให้แบบจำลองเรือสามารถเคลื่อนที่ไปตามจุดต่างๆที่ กำหนดได้อย่างถูกต้อง

4. ผลการทดลอง

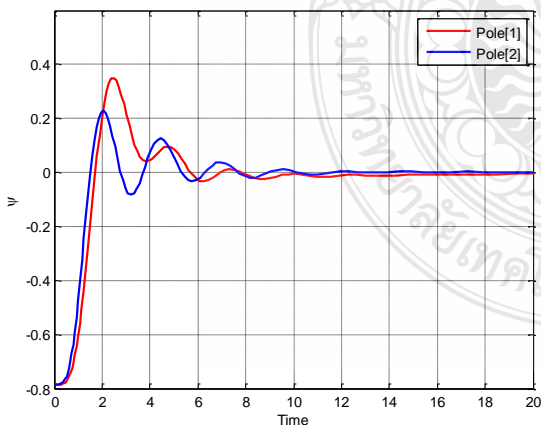
รูปที่ 9 แสดงผลตอบสนองเมื่อเงื่อนไขเริ่มต้นมี  $\varphi_0 = -45^\circ$  ผลตอบสนองเมื่อใช้ Pole[2] ได้จากการเลือก Pole Placement ที่ไปทางด้านซ้ายมือของ S-Plane มากกว่า จะมีความ รวดเร็ว มากกว่าผลตอบสนองเมื่อใช้ Pole[1] และจะเห็นว่าระบบมี ขนาดที่มีการแกว่งน้อยลง ถ้า Pole ที่เลือกไปทางด้านซ้ายมากขึ้น หรือ ใช้ Pole[2]

โดยจะพิจารณากรณีที่มีค่าเป็น

Pole[1]=[-5; -1+1i; -1-1i; -1+1i; -1-1i; -0.5+1i; -0.5-1i; -0.1+0.1i; -0.1-0.1i; -5];

และจะพิจารณากรณีที่สองมีค่าเป็น

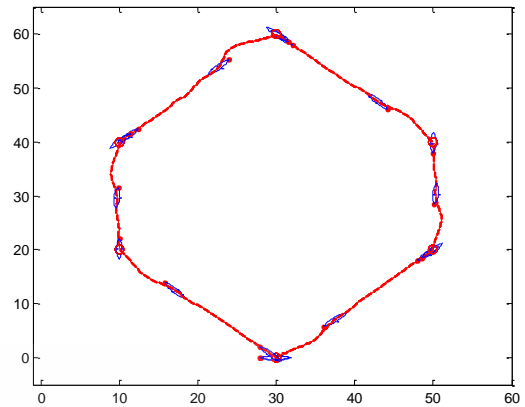
Pole[2]=[-10; -3+3i; -3-3i; -3+3i; -3-3i; -1+2i; -1-2i; -0.3+0.3i; -0.3-0.3i; -10];



รูปที่ 9 ผลตอบสนองของ  $\varphi$  ถ้าเงื่อนไขเริ่มต้น ที่  $\varphi_0 = -45^\circ$  เมื่อใช้ Pole[1] และ Pole[2]

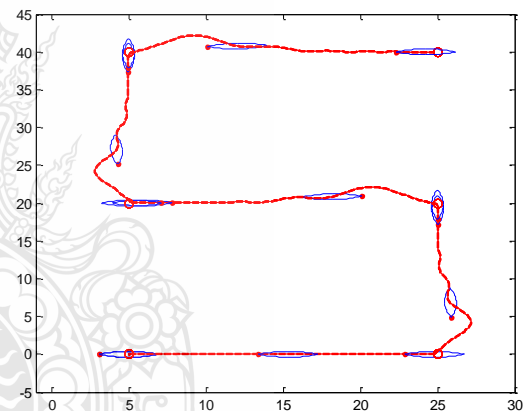
การจำลองการเคลื่อนที่ ที่ได้กำหนดให้เรือเคลื่อนที่ไปตามจุดพิกัดที่ กำหนด Waypoint Tracking โดยทดลองการเคลื่อนที่เป็น 2 ลักษณะคือ

1. แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม (Circular configuration)
2. แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นแบบ Grid (Grid configuration)

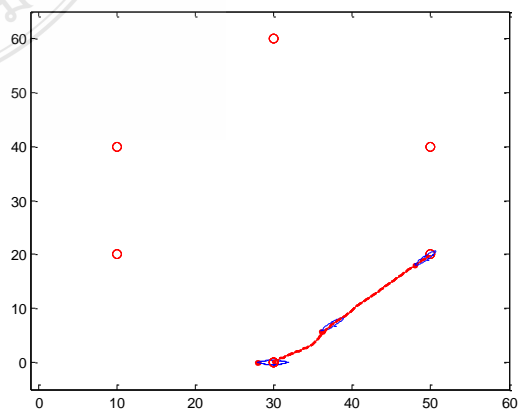


รูปที่ 10 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ แบบที่1 เป็นรูปวงกลม

ผลการ จำลองการเคลื่อนที่ของทั้งสองแบบแสดงในรูปที่ 10 และ 11 จะเห็นว่าระบบสามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดได้ โดยเส้น สีแดง แสดงถึงเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางของเรือ ส่วนจุดสี ดำแสดงถึงตำแหน่งของ Trolling Motor ที่ใช้ขับเคลื่อนเรือ

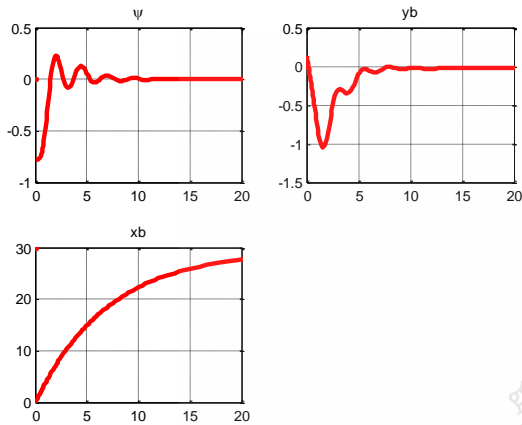


รูปที่ 11 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ แบบที่2 เป็นแบบ Grid เมื่อพิจารณาเฉพาะการจำลองการเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่อง เป็นรูปวงกลม (Circular configuration) ในช่วงที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 12



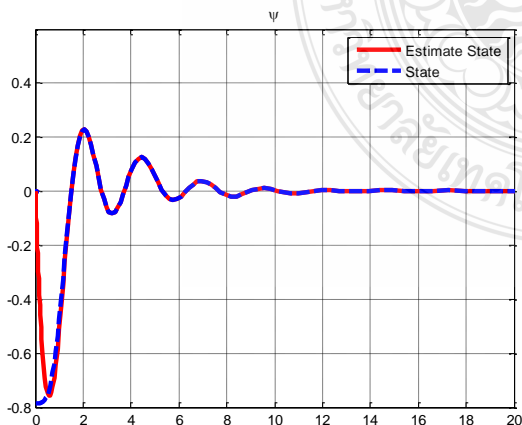
รูปที่ 12 การเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม ในช่วงที่ 1

การเปลี่ยนแปลงของState(x)ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะ  $\varphi, x_b, y_b$  จะเห็นว่า ทิศทางของหัวเรือเมื่อเริ่มต้นมีค่า -45 องศา และจะถูกปรับเปลี่ยนแปลงจนเป็น 0 เมื่อ ทิศทางของหัวเรือเข้าสู่ทิศทางที่ต้องการ ส่วน  $x_b$  เมื่อเริ่มต้นมีค่า เท่ากับ 0 หลังจากนั้นค่า  $x_b$  จะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆตามเวลาจนถึงเวลาที่มีการเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ใหม่ ส่วน  $y_b$  เมื่อเริ่มต้นมีค่า เท่ากับ 0 หลังจากนั้นก็จะเปลี่ยนไปและกลับเป็น 0 อีกครั้งเมื่อเรือเคลื่อนเข้าใกล้จุดพิกัดปลายทางที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 13

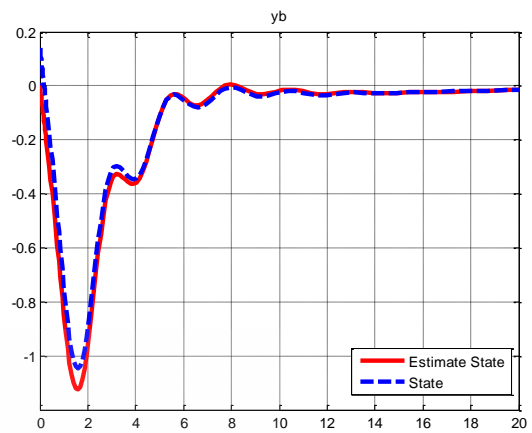


รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงของ State(x) :  $\varphi, x_b, y_b$

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของ State และ Estimated State ในที่นี้พิจารณาเฉพาะ State:  $\varphi, x_b, y_b$  ในการจำลองการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม ในช่วงที่ 1 รูปที่ 14 แสดง การเปลี่ยนแปลงของ  $\varphi$  เทียบกับ  $\hat{\varphi}$  จะเห็นว่าเมื่อเริ่มต้น ค่าประมาณของทิศทางหัวเรือจะมีค่า=0 ตามที่กำหนดไว้หลังจากนั้น ก็จะเปลี่ยนแปลงไปจนมีค่าเข้าใกล้ Actual State ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าว ก็มีลักษณะเช่นเดียวกันสำหรับ State( $y_b$ ) ดังแสดงในรูปที่ 15

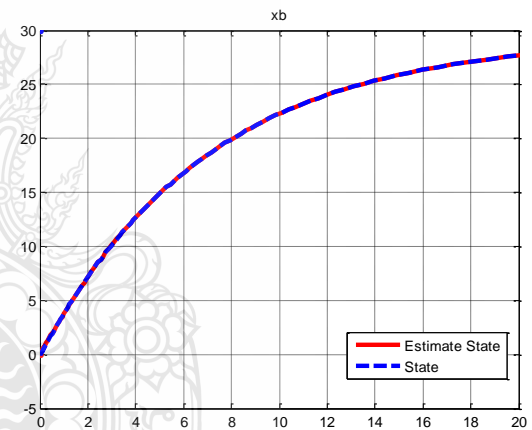


รูปที่ 14 การเปลี่ยนแปลงของ  $\varphi$  เทียบกับ  $\hat{\varphi}$



รูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลงของ  $y_b$  เทียบกับ  $\hat{y}_b$

ส่วนการเปลี่ยนแปลงของ State และ ค่าประมาณของ State ของ  $x_b$  นั้นมีค่าเท่ากันตลอดเนื่องจาก  $x_b$  นั้นไม่ได้ถูกควบคุมโดย  $F_{ycmd}$  จึงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตาม ความเร็วเริ่มต้น และ  $F_{xcmd}$  โดยเป็นอิสระจาก  $F_{ycmd}$  ดังแสดงในรูป 16



รูปที่ 16 การเปลี่ยนแปลงของ  $x_b$  เทียบกับ  $\hat{x}_b$

### 5. สรุป

การควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนด เราสามารถประยุกต์ใช้ Full-State Feedback Controller ในการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ได้ โดยสามารถประยุกต์ใช้ Observer ในการประมาณค่า State เพื่อป้อนให้แก่ Controller ได้ โดยในการออกแบบ Observer ยิ่งเราเลือก Pole ที่ห่าง ไปทางด้านซ้ายมือของ S-Plane มากเท่าไรระบบจะมี ขนาดของการแกว่งน้อยลง และมีผลการตอบสนองไวขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าประมาณของ State จะมีค่าเข้าใกล้ Stateจริง เมื่อเวลามากขึ้นซึ่งเป็นคุณสมบัติของ Observer ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น

## 6. ภาคผนวก

Full-State Feedback Model แสดงได้ในรูป

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (22)$$

โดย

$$x = [u \ v \ r \ \varphi \ \varphi_{int} \ x_b \ y_b \ y_{bint} \ \dot{F}_y \ F_y]^T \quad (23)$$

และ

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & u_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\lambda_1 + \lambda_2) & -\lambda_1 \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

และ

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \lambda_1 \lambda_2 \ 0]^T \quad (25)$$

และ

$$u = F_{ycmd} \quad (26)$$

โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้

$$\lambda_1 = 6, \lambda_2 = 4, u_0 = 1$$

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ ปี2552

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jeffrey W. Stettler, "Steady and Unsteady Dynamics of an Azimuthing Podded Propulsor Related to Vehicle Maneuvering." Phd. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [2] M.B. Greytak, "High Performance Path Following for Marine Vecicles Using Azimuthing Podded Propulsion." M.S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [3] M. Bibuli, G. Bruzzone, M. Caccia, G. Indiveri, and A.A. Zizzari, "Line Following Guidance Control: Application to the Charlie Unmanned Surface Vehicle", Intelligent Robots and System, 2008 IROS 2008, IEEE/RSJ International Conference on 2008.
- [4] J. Curcio, J. Leonard, and A. Patrikalakis, "SCOUT- a Low Cost Autonomous Surface Platform for Research in Cooperative Autonomy. IEEE OCEANS, 2005.
- [5] Richard C. Dorf., Robert H. Bishop., **Modern Control Systems**, 11<sup>th</sup> edition, Pearson Education, Inc., 2008.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายกิตต์เฉลิม ธรรมไชยธรรมศ
วัน เดือน ปีเกิด	18 กุมภาพันธ์ 2516
ที่อยู่	261 ซอยรังสิต-นครนายก 27 ตำบลประชาธิปัตย์ อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12130
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปี พ.ศ. 2540
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2542 วิศวกรฝ่ายผลิต บริษัท ชันจิริน ประเทศไทย จำกัด พ.ศ. 2546 วิศวกรฝ่ายผลิต บริษัท สยามมิชลิน จำกัด มหาชน พ.ศ. 2554-ปัจจุบัน ผู้จัดการฝ่ายผลิต บริษัท แบน โด แมนูแฟกเจอร์ริง ประเทศไทย จำกัด

