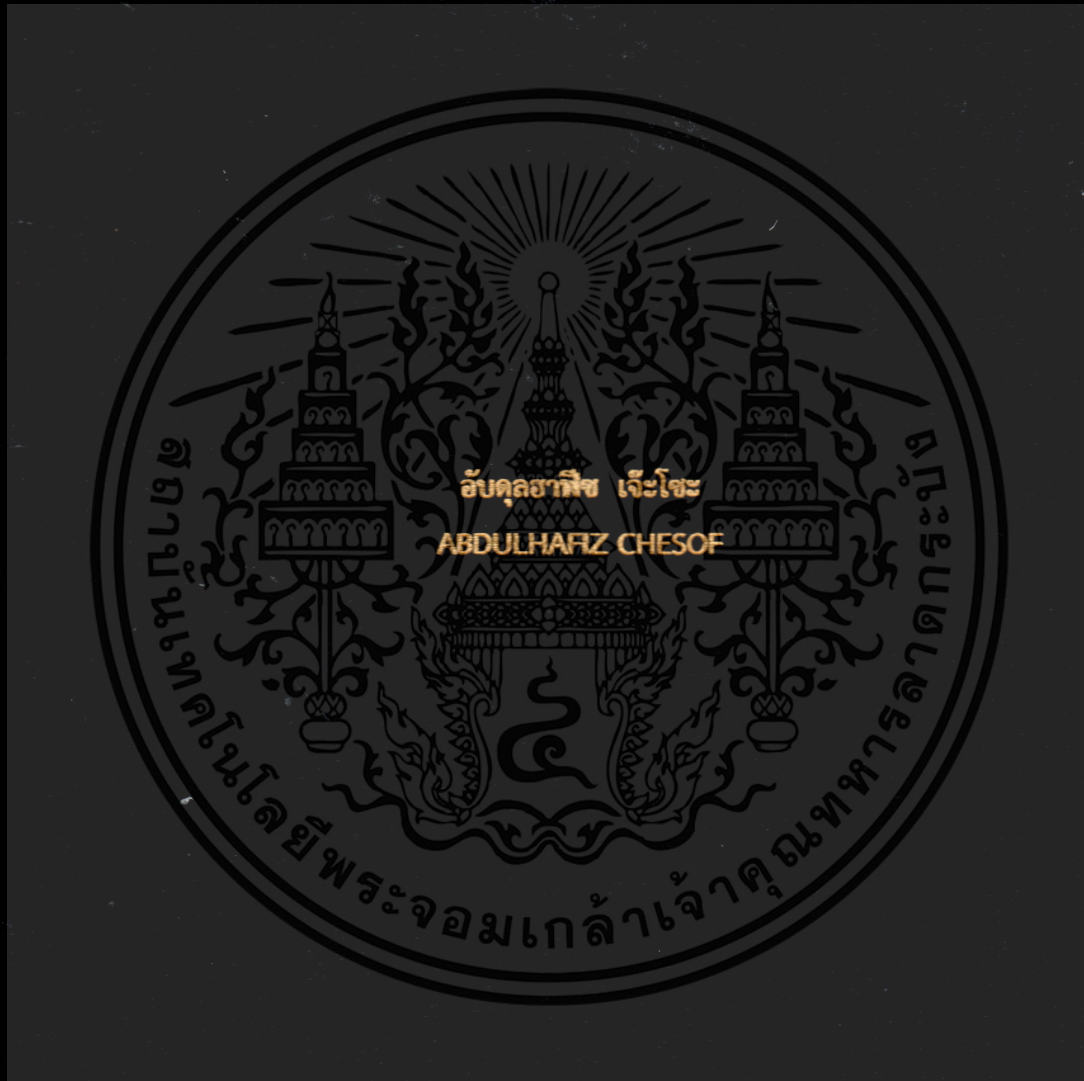


การระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์สำหรับหุ่นยนต์
ขับเคลื่อนสี่ล้อแบบอิสระ

INTEGRAL BASED IDENTIFICATION FOR FOUR WHEEL
INDEPENDENT DRIVE ROBOT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2563

KMITL-2020-EN-M-080-002

การระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์สำหรับหุ่นยนต์
ขับเคลื่อนสี่ล้อแบบอิสระ

INTEGRAL BASED IDENTIFICATION FOR FOUR WHEEL
INDEPENDENT DRIVE ROBOT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2563

KMITL-2020-EN-M-080-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTEGRAL BASED IDENTIFICATION FOR FOUR WHEEL
INDEPENDENT DRIVE ROBOT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2020

KMITL-2020-EN-M-080-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2020

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์ สำหรับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้อแบบอิสระ
นักศึกษา	นายอัปดุลฮาฟิซ เจ๊ะโซ๊ะ
รหัสนักศึกษา	59601213
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม
พ.ศ.	2563
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สังวาล บกสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.นภศูล วงษ์วานิช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการระบุคุณลักษณะเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีพื้นฐานปริพันธ์เพื่ออธิบายการสั่นสะเทือนของหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระที่ใช้ในงานด้านการเกษตร ความท้าทายของปัญหาการวิจัยคือความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบการสั่นสะเทือน ซึ่งทำให้วิธีการระบุคุณลักษณะการสั่นสะเทือนเชิงเส้นด้วยระบบมวล สปริง และตัวหน่วงไม่สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการที่นำเสนอแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นโดยการแบ่งผลตอบสนองเป็นช่วงเวลาย่อยและใช้สมการอนุพันธ์อันดับสองที่มีโครงสร้างเช่นเดียวกับระบบมวล สปริง และตัวหน่วง อธิบายการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาย่อยนั้นและคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นอย่างง่ายที่สามารถประมาณพารามิเตอร์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ได้นำเสนอช่วยลดความซับซ้อนในการระบุคุณลักษณะของการสั่นสะเทือนและจากการทดลองแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องอย่างน้อยร้อยละ 96.17 ในขณะที่วิธีระบุคุณลักษณะการสั่นสะเทือนเชิงเส้นโดยวิธีไร้โครงสร้างในความถูกต้องที่ร้อยละ 52.68 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการระบุคุณลักษณะเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีพื้นฐานปริพันธ์มีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับอธิบายการสั่นสะเทือนของหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระ

Thesis Title	Integral Based Identification for Four Wheel Independent Drive Robot
Student	Mr. Abdulhafiz Chesof
Student ID.	59601213
Degree	Master of Engineering
Program	Control Engineering
Year	2020
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Sungwan Boksuwan
Thesis Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Napasool Wongvanich

ABSTRACT

This thesis presents an integral based system identification methodology as a platform to mathematically describe the vibration incurred by an independent four wheeled drive agricultural robot. The main challenge of this research is the complex nonlinearities of the vibration system, such that the widely used system identification methods comprising of only simple mass spring damper structure fails to yield an effective model. The presented solution to this issue is to segment the responses into piecewise sections in time, where each section is described by its own mass-spring-damper subsystem. The parameters of each subsystem are identified by an integral based methodology, which reformulates a nonlinear and non-convex optimization problems into linear ones that can be estimated with the linear least square method. Results show that the developed methodology reduces the complexities in the system identification of the vibration system. Specifically, the developed model gives a 96.17% match to the experimental data, while the black box identification method gives only a 52.68% match to the corresponding data. The experimental results thus demonstrate that the developed integral based system identification platform yields a corresponding mathematical model that is effective in describing the dynamics of the four wheeled independent drive robot.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สังวาล บกสุวรรณ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.นภศุล วงษ์วานิช ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหา ข้อบกพร่องในงานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ทั้งในด้านการเรียนตลอดจนการ ดำรงชีวิต และขอขอบคุณอาจารย์ พี่ ๆ และน้อง ๆ ประจำห้องปฏิบัติการ Mechatronics Action Lab ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะและให้การช่วยเหลือตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ คุณน้ำ นูริยา เจ๊ะเล็ง ที่ให้ความเมตตาและให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลา ตั้งแต่เข้าศึกษาระดับอุดมศึกษาจนศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรมสั่งสอน เป็นกำลังใจ และสนับสนุนการศึกษา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

อับดุลฮาฟิซ เจ๊ะโซะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 ความสำคัญของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	4
2.2 การหาแบบจำลองโดยวิธีการระบุคุณลักษณะระบบ.....	5
2.3 การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีมินิมอลโมเดลลิง.....	12
2.4 เกณฑ์ในการวัดความแม่นยำของแบบจำลอง.....	13
บทที่ 3 การระบุคุณลักษณะระบบพลวัตด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์.....	14
3.1 ระบบมวลสปริงและตัวหน่วง.....	14
3.2 สมการอนุพันธ์อันดับสอง.....	15
3.3 การประมาณพารามิเตอร์ด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์.....	16
3.4 กรณีกำหนดให้มีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า.....	20
3.5 อัตราขยายดีซี.....	22

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดสอบระบบวงเปิด	23
4.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	23
4.2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ	24
4.3 การเตรียมการทดสอบ.....	26
4.4 การดำเนินการทดสอบ	27
4.5 ผลการทดสอบระบบวงเปิด	27
4.6 การเตรียมข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์.....	29
บทที่ 5 ผลการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์.....	31
5.1 ผลการทดสอบกรณีมีสามพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า.....	31
5.2 ผลการทดสอบกรณีมีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า.....	34
5.3 การระบุคุณลักษณะด้วยวิธีไร้โครงสร้าง.....	38
5.4 สรุปผลการทดสอบ.....	40
บทที่ 6 สรุป.....	41
6.1 สรุปการวิจัย.....	41
6.2 ข้อเสนอแนะ	42
เอกสารอ้างอิง	43
ภาคผนวก.....	45
ภาคผนวก ก. ฟังก์ชันสำหรับการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์	46
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	50
ประวัติผู้เขียน.....	56

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดช่วงเวลา Δt และค่า NRMSE ของแบบจำลอง.....	36
5.2 ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ c และ k ด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์.....	37



สารบัญรูปร่าง

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบพลวัตอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรเอาต์พุต $y(t)$ กับตัวแปรอินพุตทั้งอินพุตที่ควบคุมได้ $u(t)$, w และอินพุตที่ไม่สามารถควบคุมได้ v	4
2.2 กระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการระบุคุณลักษณะ	5
2.3 ขั้นตอนการระบุคุณลักษณะ	6
2.4 โครงสร้างของแบบจำลองพลวัตเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	7
2.5 โครงสร้างแบบจำลองเออาร์เอ็กซ์	8
2.6 โครงสร้างแบบจำลองเออาร์แมก.....	10
3.1 ระบบมวล สปริงและ ตัวหน่วง	14
3.2 ความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นตามสมการที่ 3.14	17
4.1 ขั้นตอนการทดสอบระบบวงเปิด	23
4.2 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระที่ใช้ในการวิจัย	24
4.3 กลไกที่ใช้สำหรับยกล้อของหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระ	25
4.4 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระในสภาวะปกติ.....	25
4.5 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระเมื่อมีการยกล้อ	26
4.6 ระบบการเก็บข้อมูลการทดสอบ	26
4.7 รูปแบบการทดสอบระบบวงเปิด	27
4.8 สัญญาณอินพุต d_f และ d_r	28
4.9 สัญญาณเอาต์พุต ω_f และ ω_r	28
4.10 ข้อมูลที่ได้จากการปรับพันธ์ ω_f และ ω_r	29
4.11 ข้อมูลจากการทดลองที่ได้รับการชดเชยด้วยสมการถดถอยเชิงเส้น	30
5.1 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลอง $\theta_{\text{model},i}(t)$ กับข้อมูลจากการวัด θ_r สำหรับล้อซ้ายกรณีมีสามพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า.....	32
5.2 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลอง $\theta_{\text{model},i}(t)$ กับข้อมูลจากการวัด θ_r สำหรับล้อขวากรณีมีสามพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า	32
5.3 ค่า m , c และ k สำหรับแบบจำลองส่วนล้อซ้ายกรณีมีสามพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า	33
5.4 ค่า m , c และ k สำหรับแบบจำลองส่วนล้อขวากรณีมีสามพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า	33
5.5 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลอง $\theta_{\text{model},i}(t)$ กับข้อมูลจากการวัด θ_r สำหรับล้อซ้ายกรณีมีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า	34

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลอง $\theta_{\text{model},i}(t)$ กับข้อมูลจากการวัด θ_r สำหรับล้อยวากรณีมีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า	35
5.7 ค่า c และ k สำหรับแบบจำลองส่วนล้อยวากรณีมีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า	35
5.8 ค่า c และ k สำหรับแบบจำลองส่วนล้อยวากรณีมีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า	36
5.9 ผลการตอบสนองของแบบจำลองสำหรับล้อยวาคู่โดยใช้ค่าเฉลี่ย $c = 0.0322$ และ $k = 2.9910$	37
5.10 ผลการตอบสนองของแบบจำลองสำหรับล้อยวาคู่โดยใช้ค่าเฉลี่ย $c = 0.0141$ และ $k = 2.6379$	38
5.11 เปรียบผลการตอบสนองของแบบจำลองส่วนล้อยวาคู่โดยการระบุคุณลักษณะ ด้วยวิธีไร้โครงสร้าง กำหนดให้จำนวนโพลเท่ากับ 2	39
5.12 เปรียบผลการตอบสนองของแบบจำลองส่วนล้อยวาคู่โดยการระบุคุณลักษณะ ด้วยวิธีไร้โครงสร้าง กำหนดให้จำนวนโพลเท่ากับ 2	39

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความจำเป็นและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนของหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระ หลังจากนั้นจะกล่าวถึงขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย และส่วนสุดท้ายจะเป็นส่วนของรายละเอียดเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

1.1 ความจำเป็นของงานวิจัย

หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระ เป็นหุ่นยนต์ที่สามารถควบคุมความเร็วและตำแหน่งมุมของล้อได้อย่างอิสระต่อกัน โครงสร้างของตัวหุ่นยนต์มีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น การใช้งานในภาคการเกษตร โครงสร้างของตัวหุ่นยนต์ต้องมีความยืดหยุ่นสามารถเคลื่อนที่ในสภาพพื้นดินที่ขรุขระและสามารถเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางได้ ในการเคลื่อนที่ข้ามสิ่งกีดขวางต้องอาศัยการยกตัวของล้อ ซึ่งสิ่งที่ตามมาคือเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นกับโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์ การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์ลดลง อีกทั้งจะก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างของหุ่นยนต์ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องศึกษาทำความเข้าใจกับปรากฏการณ์การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการสั่นสะเทือนและเพื่อออกแบบตัวควบคุมสำหรับการชดเชยหรือลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ซึ่งการอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเป็นตัวแทนพลวัตของระบบ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพลวัตสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละระบบว่าควรใช้วิธีใด เช่น กรณีที่ทราบโครงสร้างและพารามิเตอร์ของระบบอย่างชัดเจนการสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบดังกล่าวจะสามารถทำได้โดยการใช้กฎทางฟิสิกส์ ถ้าหากเป็นกรณีที่ไม่ทราบโครงสร้างและพารามิเตอร์ของระบบ การสร้างแบบจำลองพลวัตสำหรับระบบดังกล่าวต้องอาศัยวิธีการระบุคุณลักษณะ (Identification) ซึ่งเป็นวิธีการที่ต้องอาศัยการตั้งสมมติฐานในการแทนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในบางครั้งสมมติฐานไม่ตรงกับความเป็นจริงทำให้ไม่สามารถหาพลวัตของระบบได้ วิธีในการระบุคุณลักษณะมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เช่น วิธีการวิเคราะห์ของโพนี (Prony's Analysis) [1-2] ซึ่งมีหลักการเหมือนกันกับการแปลงฟูเรียร์ แต่แตกต่างกันที่มีเทอมของเอ็กโพเนนเชียลเพิ่มเข้ามาอย่างฮาร์โมนิก นอกจากนี้ยังมีวิธีการที่มีพื้นฐานจากวิธีการประมาณด้วยคาลมาน (Kalman Based Estimation) [3] และวิธีการอื่น ๆ เช่น วิธีเมทริกซ์ปากกา (Matrix Pencil Method) [4] ซึ่งเป็นการปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ของโพนี การแยกโดเมนความถี่อย่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสม (Distributed Frequency Domain Optimization) [5] และการปรับอันดับสองแบบทั่วไป (Second Order Generalized Integrator : SOGI) [6-8] ปัจจุบันมีเครื่องมือสำหรับการระบุคุณลักษณะของระบบ ซึ่งทำให้มีความสะดวกต่อการสร้างแบบจำลองพลวัตแต่ต้องอาศัยการสุ่มโครงสร้าง ซึ่งแบบจำลองพลวัตที่ได้ไม่สะท้อนความหมายทางกายภาพของระบบ

เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องเพียงพอและสะท้อนถึงความหมายทางกายภาพ วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงนำเสนอวิธีการระบุคุณลักษณะการสั่นสะเทือนที่เกิดกับโครงสร้างของหุ่นยนต์ โดยการใช้วิธีมินิมอลโมเดลลิง (Minimal Modelling) ซึ่งเป็นวิธีการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายเพื่ออธิบายโครงสร้างของระบบที่มีความซับซ้อน ในขณะเดียวกันแบบจำลองดังกล่าวต้องอธิบายพลวัตของระบบได้อย่างถูกต้อง และใช้วิธีพื้นฐานปรับอันดับในการคำนวณพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายการสั่นสะเทือนของโครงสร้างหุ่นยนต์ให้มีความถูกต้องเพียงพอและเหมาะสำหรับการออกแบบระบบควบคุม
2. เพื่อพัฒนาฟังก์ชันสำเร็จรูป สำหรับการระบุคุณลักษณะระบบโดยวิธีพื้นฐานปรับอันดับ

1.3 ขอบเขต

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายการสั่นสะเทือนของโครงสร้างหุ่นยนต์ 4 ล้ออิสระจากการเอียงของตำแหน่งล้อ ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะต้องมีโครงสร้างที่มีความหมายทางกายภาพและเหมาะสำหรับการนำไปออกแบบตัวควบคุม
2. วิธีการระบุคุณลักษณะของระบบเพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ เหมาะสมสำหรับการคำนวณแบบเวลาจริง
3. ทดสอบประสิทธิภาพโดยการเปรียบเทียบร้อยละความถูกต้องกับการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีไร้โครงสร้าง (Black Box)

1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 เป็นกล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่ใช้ในการระบุคุณลักษณะระบบและใช้ในการพัฒนาวิธีการระบุคุณลักษณะการสั้นสะเทือนด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์

บทที่ 3 จะกล่าวถึงการพัฒนาวิธีการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบระบบวงเปิด ซึ่งเริ่มจากการสร้างระบบเซ็นเซอร์ รายละเอียดองค์ประกอบของระบบที่ใช้ในการทดสอบ การเก็บข้อมูลและการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้สำหรับการระบุคุณลักษณะ

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดสอบการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์และปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของแบบจำลอง

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนางานวิจัยในขั้นตอนต่อไป ส่วนสุดท้ายวิทยานิพนธ์เป็นภาคผนวก ซึ่งประกอบด้วยการอธิบายฟังก์ชันสำหรับการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์และบทความที่ได้รับการตีพิมพ์

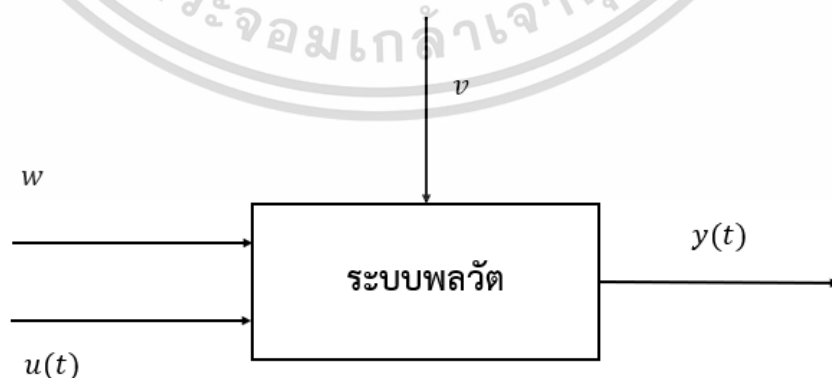
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความสำคัญของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทฤษฎีและหลักการที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการระบุคุณลักษณะระบบ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างแบบจำลองรูปแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการระบุคุณลักษณะระบบ การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และเกณฑ์ที่ใช้ในการวัดความถูกต้องของแบบจำลอง

2.1 ความสำคัญของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต รูปที่ 2.1 เปรียบเสมือนตัวแทนของระบบที่อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ของระบบ แบบจำลองดังกล่าวมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ การออกแบบระบบควบคุม ซึ่งแบบจำลองพลวัตอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ (Differential Equations) สามารถหาได้โดยอาศัยกฎทางฟิสิกส์พื้นฐาน ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือได้สมการอนุพันธ์ที่สมบูรณ์เหมาะสมต่อการวิเคราะห์และทำความเข้าใจระบบแต่ก็จะมีข้อเสียเป็นเชิงเส้น ไม่เหมาะกับการออกแบบตัวควบคุม อีกวิธีหนึ่งคืออาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดลองแล้วนำมาวิเคราะห์เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์ วิธีนี้เรียกว่า การระบุคุณลักษณะระบบ วิธีนี้สมการอนุพันธ์ที่ได้จะเหมาะกับการนำไปออกแบบระบบควบคุมเพราะสามารถสร้างแบบจำลองเฉพาะช่วงหรือเฉพาะจุดให้มีความเป็นเชิงเส้น



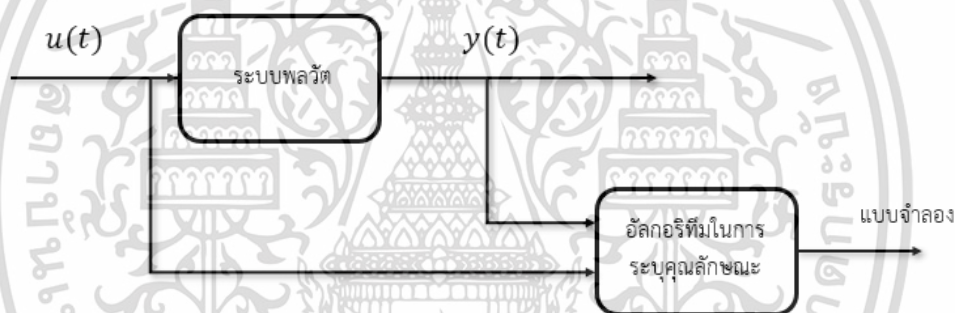
รูปที่ 2.1 ระบบพลวัตอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรเอาต์พุต $y(t)$ กับตัวแปรอินพุตทั้งอินพุตที่ควบคุมได้ $u(t)$, w และอินพุตที่ไม่สามารถควบคุมได้ v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบโดยทั่วไปมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงการอธิบายระบบด้วยกฎทางฟิสิกส์จะนำไปสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนและใช้เวลาในการพัฒนามาก แต่ถ้าระบบดังกล่าวสามารถกระตุ้นด้วยสัญญาณอินพุต $u(t)$ และทำการวัดสัญญาณเอาต์พุต $y(t)$ ข้อมูลดังกล่าวก็สามารถนำไปสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ได้เช่นเดียวกัน แต่ความถูกต้องนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างแบบจำลอง

2.2 การหาแบบจำลองโดยวิธีการระบุคุณลักษณะระบบ

การระบุคุณลักษณะระบบเป็นกระบวนการในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโดยการใช้ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตระบบโดยการป้อนสัญญาณอินพุต $u(t)$ ตามรูปที่ 2.2 ให้กับระบบและวัดสัญญาณเอาต์พุต $y(t)$ ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.2 กระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการระบุคุณลักษณะ

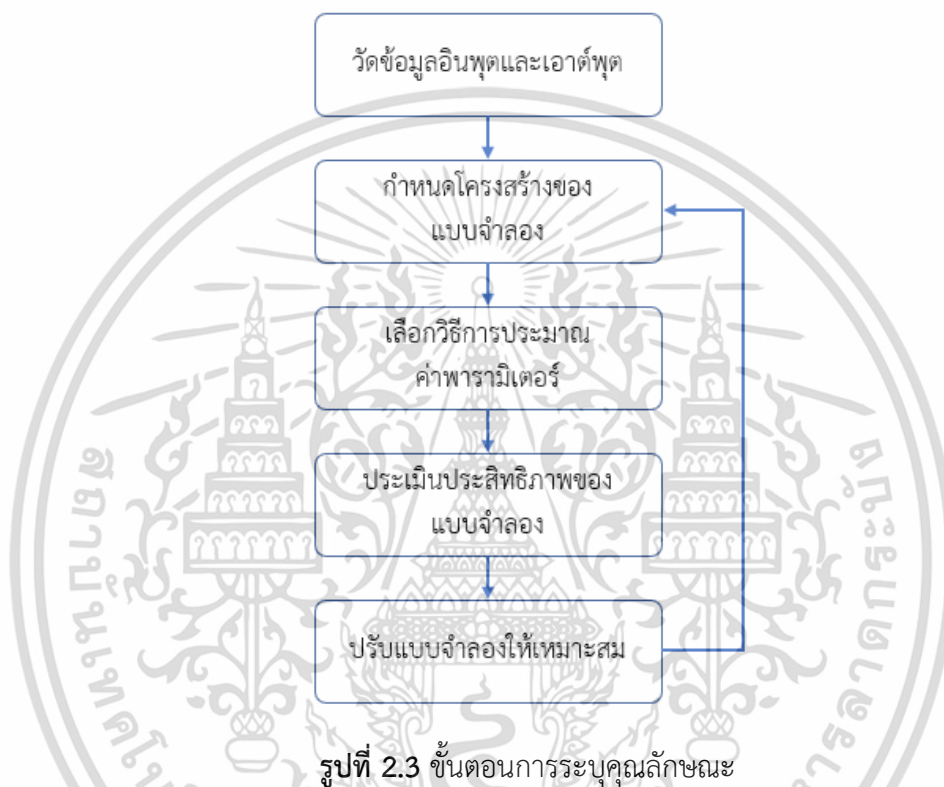
การระบุคุณลักษณะของระบบสามารถจำแนกตามโครงสร้างของแบบจำลองที่จะนำมาอธิบายระบบ แบ่งได้ 2 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองชนิดกำหนดโครงสร้าง (Grey Box) เป็นการสร้างแบบจำลองโดยหาค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ทราบโครงสร้างของระบบบางส่วน หรือสามารถเขียนสมการอนุพันธ์แทนระบบเพียงแต่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ ซึ่งวิศวกรจำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบการทดลอง เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ต่อไป อนึ่ง การสร้างแบบจำลองแบบกำหนดโครงสร้างนี้ จะใช้ได้ดีเมื่อทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางคณิตศาสตร์ และทราบถึงข้อจำกัดของแบบจำลอง และสามารถออกแบบการทดลองเพื่อบรรลุเงื่อนไขของข้อจำกัดเหล่านั้น

2. แบบจำลองชนิดไร้โครงสร้าง เป็นวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางพลศาสตร์ โดยการใช้ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบโดยที่ไม่ทราบโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ของระบบนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาศัยการปรับข้อมูล โดยวิธีการนี้วิศวกรจะสร้างโครงสร้างทางคณิตศาสตร์แบบใด ๆ ก็ตามที่มีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูง ตัวแบบจำลองที่สร้างมานั้นไม่ได้เกิดจากการอาศัยหลักการทางฟิสิกส์เพื่อสร้างแบบจำลอง แต่เน้นการปรับแบบจำลองให้ตรงกับข้อมูลที่สุด ซึ่งวิธีการนี้อาจจะทำให้ได้ตัวแบบจำลองที่ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพได้ และอาจจะไม่สามารถทำให้ได้ตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพ



ขั้นตอนการระบุคุณลักษณะของระบบ รูปที่ 2.3 โดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองชนิดกำหนดโครงสร้าง หรือชนิดไร้โครงสร้างประกอบด้วย 5 ขั้นตอน

1. วัดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบ เป็นข้อมูลในโดเมนเวลาหรือความถี่ ความแม่นยำของแบบจำลองจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของการวัดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบ
2. กำหนดโครงสร้างของแบบจำลอง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ในการเลือกโครงสร้างจำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์และความเข้าใจในการเลือก
3. เลือกวิธีการประมาณสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า วิธีที่นิยมใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์คือ การประมาณด้วยวิธีความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด

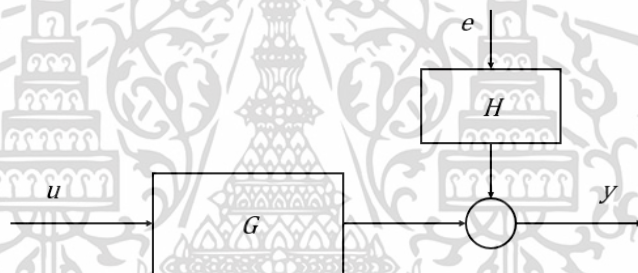
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยการวัดความแตกต่างระหว่างการตอบสนองของแบบจำลองและการตอบสนองของระบบจริง

5. หากตัวแบบจำลองนั้นยังไม่ถูกต้องเพียงพอ ก็ต้องปรับแก้แบบจำลอง ให้สอดคล้องกับข้อมูลมากยิ่งขึ้น

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตในกรณีใดโครงสร้าง การเลือกโครงสร้างเป็นหนึ่งในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองที่ต้องอาศัยการคาดเดาจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวัด ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์และความเข้าใจของวิศวกรผู้สร้างแบบจำลอง

โครงสร้างของแบบจำลองพลวัตเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะประกอบด้วยองค์ประกอบพลวัตสองส่วนด้วยกันตามรูปที่ 2.4 องค์ประกอบส่วนแรก G ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุต u กับเอาต์พุตและองค์ประกอบส่วนที่สอง H ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนจากภายนอกต่อ e สัญญาณเอาต์พุต y [9-10] ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแบบจำลองพลวัตเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t) \quad (2.1)$$

โครงสร้างแบบจำลองเออาร์เอ็กซ์ (Autoregressive Exogeneous : ARX) ประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนเออาร์ (Autoregressive) ซึ่งเป็นการกำหนดรูปแบบว่าค่า $y(t)$ ขึ้นอยู่กับค่าสังเกตก่อนหน้าที่เวลา $t-1, t-2, t-3, \dots, t-n_a$ โดยที่ n_a คือ อันดับของพหุนามเอาต์พุต $A(q)$ ส่วนที่สองเรียกว่าส่วนของตัวแปรภายนอก (Exogeneous Variable) โดยที่ n_b คืออันดับของพหุนามอินพุต $B(q)$ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างอินพุต $y(t)$ และเอาต์พุต $u(t)$ ตามสมการที่ 2.2

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) = b_1 u(t-1) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b) + e(t) \quad (2.2)$$

กำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \quad (2.3)$$

และ

$$B(q) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b} \quad (2.4)$$

โดย q เป็นตัวดำเนินการขยับเวลา (Time Shift Operator) จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ 2.1 ได้โดยที่

$$G(q) = \frac{B(q)}{A(q)} = \frac{b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b}}{1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a}} \quad (2.5)$$

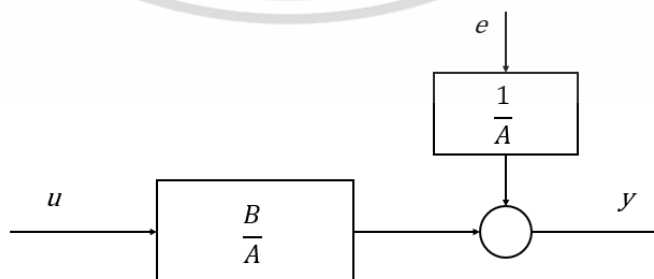
และ

$$H(q) = \frac{1}{A(q)} \quad (2.6)$$

แทนสมการที่ 2.5 และ 2.6 ในสมการที่ 2.1 จะได้ว่า

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)}u(t) + \frac{1}{A(q)}e(t) \quad (2.7)$$

รูปที่ 2.5 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองตามสมการที่ 2.7 ซึ่งโครงสร้างของแบบจำลองดังกล่าวเรียกว่าโครงสร้างแบบเออาร์เอ็ทซ์



รูปที่ 2.5 โครงสร้างแบบจำลองเออาร์เอ็ทซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองเออาร์แมก (Autoregressive Moving Average with Exogenous Variable : ARMAX) เป็นโครงสร้างที่พัฒนาต่อมาจากแบบจำลองเออาร์เอ็กซ์โดยมีองค์ประกอบของค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) เพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของค่าคลาดเคลื่อน โครงสร้างนี้สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุต $y(t)$ และเอาต์พุต $u(t)$ ดังสมการที่ 2.8

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} (y - n_a) = b_1 u(t-1) + \dots + b_{n_b} (y - n_b) + e(t) + c_1 e(t-1) + \dots + c_{n_c} e(t - n_c) \quad (2.8)$$

กำหนดให้

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c} \quad (2.9)$$

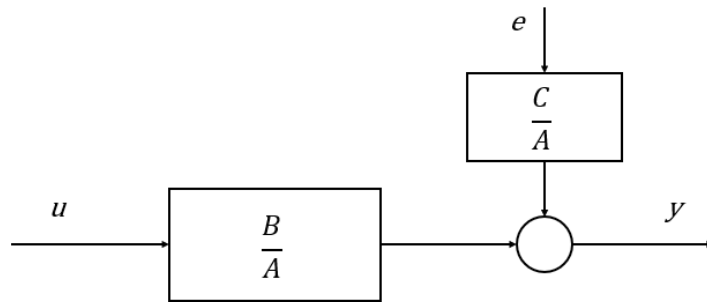
เมื่อ n_c คือ อันดับของพหุนาม $C(q)$ จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.8 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ 2.1 ได้โดยที่ $G(q)$ เป็นไปตามสมการที่ 2.5 และ $H(q)$ เป็นไปตามสมการที่ 2.10

$$H(q) = \frac{C(q)}{A(q)} = \frac{1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c}}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a}} \quad (2.10)$$

แทนสมการที่ 2.5 และ 2.10 ในสมการที่ 2.1 จะได้ว่า

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} u(t) + \frac{C(q)}{A(q)} e(t) \quad (2.11)$$

รูปที่ 2.6 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองตามสมการที่ 2.11 ซึ่งโครงสร้างของแบบจำลองดังกล่าวเรียกว่าโครงสร้างแบบเออาร์แมก



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบจำลองเออาร์แมก

แบบจำลองฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function Models) เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต $u(t)$ และเอาต์พุต $y(t)$ ของระบบโดยการอาศัยอัตราส่วนพหุนาม อันดับของแบบจำลองจะขึ้นอยู่กับพหุนามตัวส่วน โดยที่ค่ารากของพหุนามตัวส่วนจะสัมพันธ์กับตำแหน่งโพลของระบบ ในส่วนของตำแหน่งซีโรจะขึ้นอยู่กับค่ารากของพหุนามตัวเศษตามสมการที่ 2.12

$$Y(s) = \frac{\text{num}(s)}{\text{den}(s)} U(s) + E(s) \quad (2.12)$$

โครงสร้างของแบบจำลองตามสมการที่ 2.12 เป็นโครงสร้างสำหรับการอธิบายระบบที่มีความต่อเนื่องทางเวลา ในกรณีการนำเสนอสระบบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาโครงสร้างของแบบจำลองจะมีโครงสร้างตามสมการที่ 2.13

$$y(t) = \frac{\text{num}(q^{-1})}{\text{den}(q^{-1})} u(t) + e(t) \quad (2.13)$$

เมื่อ

$$\text{num}(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots \quad (2.14)$$

และ

$$\text{den}(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots \quad (2.15)$$

โดยที่ q^{-1} เป็นตัวดำเนินการหน่วงเวลา โดยที่ $q^{-1}u(t) = u(t-1)$ ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับการแปลงซี (Z-transform)

หลังจากเลือกโครงสร้างของแบบจำลองแล้วสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นลำดับต่อไปคือวิธีการคำนวณพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าของแบบจำลอง ซึ่งวิธีการคำนวณพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจะเริ่มจากการจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบสมการการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) หลังจากนั้นคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ด้วยการประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

การถดถอยเชิงเส้น คือ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามหรือผลการตอบสนอง (Response) กับตัวแปรทำนาย (Predictor Variable) โดยเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น พิจารณาสมการที่ 2.16

$$y(t) = \varphi(t)^T \lambda \quad (2.16)$$

เมื่อ

$$\varphi(t) = [-y(t-1) \quad -y(t-2) \quad \dots \quad -y(t-n_a) \quad u(t-1) \quad u(t-2) \quad \dots \quad u(t-n_b)]^T \quad (2.17)$$

และ

$$\lambda = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_{n_a} \quad b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_{n_b}] \quad (2.18)$$

สมการที่ 2.16 เรียกว่าการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ค่าของ $y(t)$ ในสมการที่ 2.16 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยการใช้ข้อมูลในอดีตที่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ λ จะกำหนดค่าที่ได้จากการคำนวณนี้เป็นค่าทำนาย $\hat{y}(t)$

วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) เป็นวิธีสำหรับการหาค่าที่เป็นไปได้มากที่สุดที่สุดของตัวแปร โดยที่ค่าเป็นไปได้มากที่สุดที่สุดของตัวแปรจะทำให้ค่าของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด

กำหนดให้ค่าความผิดพลาดระหว่างข้อมูลเอาต์พุตจากการวัดและเอาต์พุตจากการคาดการณ์เป็นไปตามสมการที่ 2.17

$$\varepsilon = \mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} - \Phi \hat{\mathbf{X}} \quad (2.17)$$

โดยที่ $\mathbf{Y} \in R^n$, $\hat{\mathbf{X}} \in R^m$, $\Phi \in R^{n \times m}$ และ $n > m$

กำหนดให้ฟังก์ชันต้นทุน (Cost Function) เป็นฟังก์ชันของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ยกกำลังสอง ซึ่งเขียนอยู่ในรูปกำลังสอง (Quadratic Form) ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} \\
 &= \frac{1}{2} (\mathbf{Y} - \boldsymbol{\Phi} \hat{\mathbf{X}})^T (\mathbf{Y} - \boldsymbol{\Phi} \hat{\mathbf{X}}) \\
 &= \frac{1}{2} (\mathbf{Y}^T \mathbf{Y} - \hat{\mathbf{X}}^T \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{Y} - \mathbf{Y}^T \boldsymbol{\Phi} \hat{\mathbf{X}} + \hat{\mathbf{X}}^T \boldsymbol{\Phi}^T \boldsymbol{\Phi} \hat{\mathbf{X}})
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

การหาค่าฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุด จะต้องทำการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันต้นทุน ตามหลักการของแคลคูลัสของการแปรผัน (Calculus of Variations) โดยมีเงื่อนไขจำเป็นอย่างยิ่งสมการที่ 2.19-2.20

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\mathbf{X}}} = \frac{1}{2} \left[\mathbf{0} - (\boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{X})^T - \mathbf{Y}^T \boldsymbol{\Phi} + (\boldsymbol{\Phi}^T \boldsymbol{\Phi} \hat{\mathbf{X}})^T + \hat{\mathbf{X}}^T \boldsymbol{\Phi}^T \boldsymbol{\Phi} \right] \tag{2.19}$$

เมื่อเงื่อนไขจำเป็นคือ

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\mathbf{X}}} = 0 \tag{2.20}$$

จากสมการที่ 2.19 และ 2.20 จะได้ว่า

$$\hat{\mathbf{X}} = (\boldsymbol{\Phi}^T \boldsymbol{\Phi})^{-1} \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{Y} \tag{2.21}$$

สมการที่ 2.21 เรียกอีกชื่อว่า Normal Equation ซึ่งในโปรแกรม MATLAB สามารถคำนวณได้โดยใช้คำสั่ง backslash ('\ ') หรือคำสั่ง lsqin

2.3 การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีมินิมอลโมเดลลิง

ในการระบุคุณลักษณะระบบพลวัตแบบไร้โครงสร้างต้องอาศัยการสมมติโครงสร้างให้กับแบบจำลอง ซึ่งโครงสร้างที่สมมติดังกล่าวไม่สามารถอธิบายความหมายทางกายภาพของระบบได้ การอธิบายระบบพลวัตด้วยกฎทางฟิสิกส์ที่มีพารามิเตอร์จำนวนมากต้องอาศัยความเข้าใจ ประสบการณ์ และความชำนาญของวิศวกรในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งบางระบบในทางปฏิบัติต้องอาศัยเวลาในการศึกษาทำความเข้าใจ ทำให้การวิจัยและพัฒนาเพื่อให้เกิดผลผลิตเป็นไปได้อย่างล่าช้า การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีมินิมอลโมเดลลิงเป็นวิธีการสร้างแบบจำลองโดยอาศัยโครงสร้างอย่างง่ายแต่ในขณะเดียวกันโครงสร้างดังกล่าวสามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกิดขึ้นได้อย่างครบถ้วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการนี้ได้พัฒนาโดย Bergman ในปี ค.ศ. 1970 เพื่ออธิบายพลวัตของกลูโคสและอินซูลินในร่างกาย [11-12] ซึ่งวิธีนี้สามารถลดเวลาในการพัฒนาแบบจำลองพลวัตและให้แบบจำลองพลวัตที่มีความถูกต้องเพียงพอ ปัจจุบันวิธีการดังกล่าวมีการใช้ในการพัฒนา แบบจำลองพลวัตของจรวด [13] และแบบจำลองพลวัตของเฮลิคอปเตอร์ [14]

2.4 เกณฑ์ในการวัดความแม่นยำของแบบจำลอง

ค่าปกติรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Normalized Root Mean Square Error : NRMSE) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.23

$$\text{NRMSE} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y}_k)^2}} \quad (2.23)$$

โดยที่	NRMSE	ค่าปกติรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย
n		จำนวนข้อมูล
y_k		ข้อมูลจริงที่ได้จากการวัด
\hat{y}_k		ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง
\bar{y}_k		ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจริงที่ได้จากการวัด

โดยค่า NRMSE ที่คำนวณมีค่าระหว่างลบนันต์ถึง 1 โดยค่าลบนันต์หมายถึงความแม่นยำของแบบจำลองที่ต่ำ และแบบจำลองจะมีความแม่นยำที่สุดเมื่อ NRMSE เท่ากับ 1

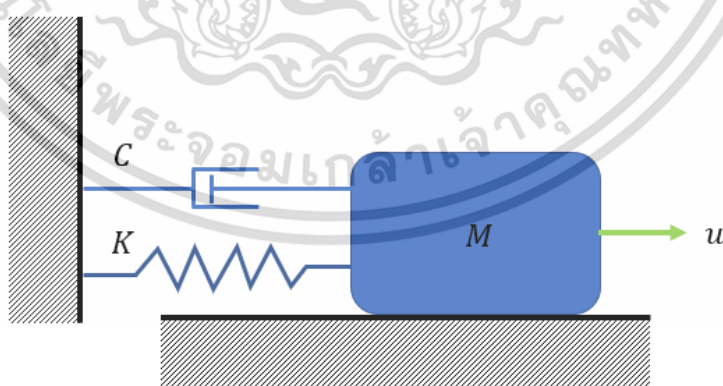
บทที่ 3

การระบุคุณลักษณะระบบพลวัตด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการพัฒนาวิธีการระบุคุณลักษณะระบบพลวัตด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์ โดยการกำหนดโครงสร้างของแบบจำลองให้มีลักษณะเดียวกับโครงสร้างของระบบมวล สปริง และตัวหน่วง โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีมีสามพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าและกรณีมีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า และกล่าวถึงวิธีการในการคำนวณพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าของแบบจำลอง โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

3.1 ระบบมวลสปริงและตัวหน่วง

การสั่นสะเทือนของโครงสร้างหุ่นยนต์มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง การสร้างแบบจำลองโดยอาศัยกฎทางฟิสิกส์จะนำไปสู่สมการเชิงอนุพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอธิบายการสั่นสะเทือนง่ายขึ้น จะทำการอธิบายด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน มวล สปริง และตัวหน่วงดังรูปที่ 3.1 ระบบมวล สปริง และตัวหน่วง เป็นที่รู้จักเป็นอย่างดีและเป็นระบบพื้นฐาน ซึ่งสามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ของการสั่นได้อย่างเหมาะสม มีค่าพารามิเตอร์สำหรับการอธิบายระบบ 3 ตัวด้วยกันคือ C สัมประสิทธิ์ความหน่วง K ค่าคงที่ของสปริง และ M มวลของระบบ โดยที่ u คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อระบบ



รูปที่ 3.1 ระบบมวล สปริง และตัวหน่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประกอบเข้าด้วยกันขององค์ประกอบทั้งสามจะสามารถอธิบายปรากฏการณ์ของการสั่นสะเทือนได้โดยการเลือกค่าพารามิเตอร์ M , C และ K ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละระบบ ซึ่งเมื่อเขียนเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วจะได้สมการเชิงอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับสอง

3.2 สมการอนุพันธ์อันดับสอง

พิจารณาสมการอนุพันธ์อันดับสอง สำหรับใช้อธิบายการสั่นสะเทือนจากการเปลี่ยนแปลงของมุมตามสมการที่ 3.1 โดยที่ $d(t)$ เป็นระยะบอลสกรูอินพุตและ $\theta(t)$ เป็นมุมเอาต์พุตของโครงสร้างส่วนหน้าหรือส่วนหลังของหุ่นยนต์

$$M\theta''(t) + C\theta'(t) + K\theta(t) = d(t) \quad (3.1)$$

หารสมการที่ 3.1 ด้วย M จะได้ว่า

$$\theta''(t) + c\theta'(t) + k\theta(t) = md(t) \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$c = \frac{C}{M}, \quad k = \frac{K}{M}, \quad m = \frac{1}{M}$$

ในการสร้างแบบจำลอง นิยามให้พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า c , k และ m ในสมการที่ 3.2 เป็นฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลา จะได้ว่า

$$\theta''(t) + c(t)\theta'(t) + k(t)\theta(t) = m(t)d(t) \quad (3.3)$$

โดยกำหนดให้ $c(t)$, $k(t)$ และ $m(t)$ เป็นฟังก์ชันคงที่ในแต่ละช่วงเวลา (piecewise constant functions) ตามสมการที่ 3.4-3.6

$$c(t) = \begin{cases} c_1, & T_0 \leq t \leq T_1 \\ c_2, & T_1 \leq t \leq T_2 \\ \vdots \\ c_n, & T_{n-1} \leq t \leq T_{end} \end{cases} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k(t) = \begin{cases} k_1, T_0 \leq t \leq T_1 \\ k_2, T_1 \leq t \leq T_2 \\ \vdots \\ k_n, T_{n-1} \leq t \leq T_{end} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$m(t) = \begin{cases} m_1, T_0 \leq t \leq T_1 \\ m_2, T_1 \leq t \leq T_2 \\ \vdots \\ m_n, T_{n-1} \leq t \leq T_{end} \end{cases} \quad (3.6)$$

เมื่อ

$$\Delta t = T_i - T_{i-1}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.7)$$

และ

$$T_0 = 0 \quad (3.8)$$

แทนสมการที่ 3.4-3.6 ในสมการที่ 3.3 จะได้ว่า

$$\theta''(t) + c_i \theta'(t) + k_i \theta(t) = m_i d(t) \quad (3.9)$$

3.3 การประมาณพารามิเตอร์ด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์

ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ c_i , k_i และ m_i สำหรับช่วงเวลาย่อยที่ $i = 1, 2, \dots, n$ ในสมการที่ 3.9 ด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์ ทำได้โดยการปริพันธ์จำกัดขอบเขตสมการที่ 3.9 สองครั้งในช่วงเวลา T_{i-1} ถึง t จะได้

$$\begin{aligned} & \theta(t) - \theta_{i-1} + (\theta'_{i-1} - c_i \theta_{i-1})(t - T_{i-1}) + c_i \int_{T_{i-1}}^t \theta(t) dt + k_i \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t \theta(t) dt dt \\ & = m_i \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t d(t) dt dt \end{aligned} \quad (3.10)$$

กำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_i = (\theta'_{i-1} - c_i \theta_{i-1}) \quad (3.11)$$

เมื่อ

$$\theta_{i-1} = \theta_i(0), \theta'_{i-1} = \theta'_i(0) \quad (3.12)$$

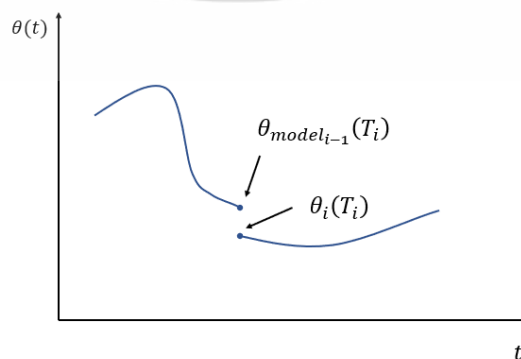
เงื่อนไขเริ่มต้นในสมการที่ 3.12 เป็นค่าของจุดเริ่มต้น ณ เวลา T_{i-1} ของแต่ละช่วงเวลาย่อย แทนสมการที่ 3.11 ในสมการที่ 3.10 จะได้ว่า

$$\theta(t) - \theta_{i-1} + \alpha_i (t - T_{i-1}) + c_i \int_{T_{i-1}}^t \theta(t) dt + k_i \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t \theta(t) dt dt = m_i \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t d(t) dt dt \quad (3.13)$$

ดังนั้นแบบจำลองด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์ของมุมส่วนหน้าหรือส่วนหลังของตัวหุ่นยนต์เป็นไปตามสมการที่ 3.14

$$\begin{aligned} \theta_{\text{model},i}(t) = & \theta_{i-1} - \alpha_i (t - T_{i-1}) - c_i \int_{T_{i-1}}^t \theta(t) dt - k_i \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t \theta(t) dt dt \\ & + m_i \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t d(t) dt dt \end{aligned} \quad (3.14)$$

สมการที่ 3.14 ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของมุมในแต่ละช่วงเวลาย่อย ในทางปฏิบัตินั้นอาจจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในการวัดมุม $\theta(t)$ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นจากหลายปัจจัยอย่างเช่นสัญญาณรบกวนจากเซ็นเซอร์ที่ใช้วัด ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมให้ผลลัพธ์ไม่เท่ากับค่าจริง อีกทั้งจะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องกันระหว่างจุดสิ้นสุดของช่วงเวลาย่อยปัจจุบันกับจุดเริ่มต้นของช่วงเวลาที่ถัดไป ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นตามสมการที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการที่จะแก้ปัญหาความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวที่มีประสิทธิภาพและไม่ทำให้เกิดความซับซ้อนคือการระบุคุณลักษณะเป็นช่วง ซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

ทำการสมมติให้ $\theta_m(t)$ และ $d_m(t)$ เป็นค่าที่ได้จากการวัด แทน $\theta(t) = \theta_m(t)$ และ $d(t) = d_m(t)$ ในสมการที่ 3.14 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \theta_{m,i}(t) = & \theta_{i-1} - \alpha_i(t - T_{i-1}) - c_i \int_{T_{i-1}}^t \theta_m(t) dt - k_i \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t \theta_m(t) dt dt \\ & + m_i \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t d_m(t) dt dt \end{aligned} \quad (3.15)$$

สำหรับช่วงเวลา $t \in t_1^{(1)} - t_1^{(N)}$ ซึ่งเป็นแบบจำลองช่วงแรก โดยที่ $t_i^{(k)}$ เป็นเวลาในช่วงเวลาย่อยที่ i ที่ลำดับการซักร้อย่าง k และ N เป็นจำนวนข้อมูลที่ได้จากการซักร้อย่างในแต่ละช่วงย่อยของเวลา สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเมทริกซ์ได้ว่า

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{p} = \mathbf{b}_1 \quad (3.16)$$

โดยที่

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & t_1^{\{(1)\}} & - \int_{T_0}^{t_1^{\{(1)\}}} \theta_m(t) dt & - \int_{T_0}^{t_1^{\{(1)\}}} \int_{T_0}^{t_1^{\{(1)\}}} \theta_m(t) dt dt & \int_{T_0}^{t_1^{\{(1)\}}} \int_{T_0}^{t_1^{\{(1)\}}} d_m(t) dt dt \\ 1 & t_1^{\{(2)\}} & - \int_{T_0}^{t_1^{\{(2)\}}} \theta_m(t) dt & - \int_{T_0}^{t_1^{\{(2)\}}} \int_{T_0}^{t_1^{\{(2)\}}} \theta_m(t) dt dt & \int_{T_0}^{t_1^{\{(2)\}}} \int_{T_0}^{t_1^{\{(2)\}}} d_m(t) dt dt \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_1^{\{(N)\}} & - \int_{T_0}^{t_1^{\{(N)\}}} \theta_m(t) dt & - \int_{T_0}^{t_1^{\{(N)\}}} \int_{T_0}^{t_1^{\{(N)\}}} \theta_m(t) dt dt & \int_{T_0}^{t_1^{\{(N)\}}} \int_{T_0}^{t_1^{\{(N)\}}} d_m(t) dt dt \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} \theta_1^{\{(1)\}} \\ \theta_1^{\{(2)\}} \\ \vdots \\ \theta_1^{\{(N)\}} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแก้สมการที่ 3.16 เพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า โดยใช้การประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ c_1 , k_1 และ m_1 สำหรับแบบจำลองช่วงที่หนึ่ง

สำหรับแบบจำลองของช่วงอื่น ๆ ค่าเริ่มต้นของแบบจำลอง θ_{i-1} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.14 ที่เวลา $t = T_{i-1}$, $i = 2, 3, \dots, n$ ซึ่งเป็นการแทนค่าสิ้นสุดของแบบจำลองในช่วงปัจจุบันมากำหนดเป็นค่าเริ่มต้นของช่วงถัดไป ทำให้เกิดความต่อเนื่องระหว่างจุดสิ้นสุดของช่วงเวลาปัจจุบันกับจุดเริ่มต้นของช่วงเวลาถัดไป อันเป็นการแก้ปัญหาความไม่ต่อเนื่องที่ลดความซับซ้อนลง ทั้งนี้เนื่องจากทราบค่าของ θ_{i-1} ทำให้เหลือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเพียง 4 ตัว แทนค่า $\theta(t) = \theta_{i,m}(t)$ และ $d(t) = d_{i,m}(t)$ สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปสมการเมทริกซ์ได้ว่า

$$\mathbf{A}_i \mathbf{p} = \mathbf{b}_i \quad (3.19)$$

โดยที่

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} t_i^{\{(1)\}} - T_{i-1} - \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(1)\}}} \theta_m(t) dt & - \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(1)\}}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(1)\}}} \theta_m(t) dt dt & - \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(1)\}}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(1)\}}} d_m(t) dt dt \\ t_i^{\{(2)\}} - T_{i-1} - \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(2)\}}} \theta_m(t) dt & - \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(2)\}}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(2)\}}} \theta_m(t) dt dt & - \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(2)\}}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(2)\}}} d_m(t) dt dt \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_i^{\{(N)\}} - T_{i-1} - \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(N)\}}} \theta_m(t) dt & - \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(N)\}}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(N)\}}} \theta_m(t) dt dt & - \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(N)\}}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(N)\}}} d_m(t) dt dt \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} \theta_i^{\{(1)\}} - \theta_{i-1} \\ \theta_i^{\{(2)\}} - \theta_{i-1} \\ \vdots \\ \theta_i^{\{(N)\}} - \theta_{i-1} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

จากสมการที่ 3.19 สามารถคำนวณหาพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองของช่วงใด ๆ โดยการใช้อัลกอริทึมการประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเช่นเดียวกันกับแบบจำลองช่วงที่หนึ่ง หลังจากนั้นแทนค่า c_i , k_i และ m_i ที่ได้จากการแก้สมการที่ 3.19 เพื่อทดสอบผลการตอบสนองของแบบจำลอง $\theta_{\text{model},i}(t)$ ในสมการที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 กรณีกำหนดให้มีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

เพื่อลดจำนวนพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่ากำหนดให้ m_i ในสมการที่ 3.9 มีค่าเท่ากับ 1 ทำให้เหลือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเพียง 2 ตัวคือ c_i และ k_i เขียนสมการที่ 3.2 ใหม่ได้ว่า

$$\theta''(t) + c(t)\theta'(t) + k(t)\theta(t) = d(t) \quad (3.22)$$

โดยกำหนดให้ $c(t)$ และ $k(t)$ เป็นฟังก์ชันคงที่ในแต่ละช่วงเวลาตามสมการที่ 3.23

$$c(t) = \begin{cases} c_1, T_0 \leq t \leq T_1 \\ c_2, T_1 \leq t \leq T_2 \\ \vdots \\ c_n, T_{n-1} \leq t \leq T_{end} \end{cases} \quad (3.24)$$

$$k(t) = \begin{cases} k_1, T_0 \leq t \leq T_1 \\ k_2, T_1 \leq t \leq T_2 \\ \vdots \\ k_n, T_{n-1} \leq t \leq T_{end} \end{cases} \quad (3.25)$$

แทนค่า $c(t)$ และ $k(t)$ ในสมการที่ 3.23 แล้วทำการปริพันธ์แบบจำกัดขอบเขตสมการที่ 3.22 สองครั้งในช่วงเวลา T_{i-1} ถึง t จะได้

$$\begin{aligned} \theta_{\text{model}, i}(t) = & \theta_{i-1} - \alpha_i(t - T_{i-1}) - c_i \int_{T_{i-1}}^t \theta(t) dt - k_i \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t \theta(t) dt dt \\ & + \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t d(t) dt dt \end{aligned} \quad (3.26)$$

โดยที่ α_i และเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นไปตามสมการที่ 3.11-3.12

สำหรับช่วงเวลา $t \in t_1^{(1)} - t_1^{(N)}$ ซึ่งเป็นแบบจำลองช่วงแรกสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเมทริกซ์ได้ว่า

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{p} = \mathbf{b}_1 \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & t_1^{\{(1)\}} & -\int_{T_0}^{t_1^{\{(1)\}}} \theta_m(t) dt & -\int_{T_0}^{t_1^{\{(1)\}}} \int_{T_0}^{t_1^{\{(1)\}}} \theta_m(t) dt dt \\ 1 & t_1^{\{(2)\}} & -\int_{T_0}^{t_1^{\{(2)\}}} \theta_m(t) dt & -\int_{T_0}^{t_1^{\{(2)\}}} \int_{T_0}^{t_1^{\{(2)\}}} \theta_m(t) dt dt \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_1^{\{(N)\}} & -\int_{T_0}^{t_1^{\{(N)\}}} \theta_m(t) dt & -\int_{T_0}^{t_1^{\{(N)\}}} \int_{T_0}^{t_1^{\{(N)\}}} \theta_m(t) dt dt \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} \theta_1^{\{(1)\}} - \int_{T_0}^{t_1^{\{(1)\}}} \int_{T_0}^{t_1^{\{(1)\}}} d_m(t) dt dt \\ \theta_1^{\{(2)\}} - \int_{T_0}^{t_1^{\{(2)\}}} \int_{T_0}^{t_1^{\{(2)\}}} d_m(t) dt dt \\ \vdots \\ \theta_1^{\{(N)\}} - \int_{T_0}^{t_1^{\{(N)\}}} \int_{T_0}^{t_1^{\{(N)\}}} d_m(t) dt dt \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

สำหรับช่วงเวลา $t \in t_i^{\{(1)\}} - t_i^{\{(N)\}}$ เนื่องจากทราบค่าของ θ_{i-1} ทำให้เหลือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเพียง 3 ตัว

$$\mathbf{A}_i \mathbf{p} = \mathbf{b}_i \quad (3.30)$$

โดยที่

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} t_i^{\{(1)\}} - T_{i-1} & -\int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(1)\}}} \theta_m(t) dt & -\int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(1)\}}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(1)\}}} \theta_m(t) dt dt \\ t_i^{\{(2)\}} - T_{i-1} & -\int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(2)\}}} \theta_m(t) dt & -\int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(2)\}}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(2)\}}} \theta_m(t) dt dt \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_i^{\{(N)\}} - T_{i-1} & -\int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(N)\}}} \theta_m(t) dt & -\int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(N)\}}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{\{(N)\}}} \theta_m(t) dt dt \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} \theta_i^{(1)} - \theta_{i-1} - \int_{T_0}^{t_0^{(1)}} \int_{T_0}^{t_0^{(1)}} d_m(t) dt dt \\ \theta_i^{(2)} - \theta_{i-1} - \int_{T_0}^{t_0^{(2)}} \int_{T_0}^{t_0^{(2)}} d_m(t) dt dt \\ \vdots \\ \theta_i^{(N)} - \theta_{i-1} - \int_{T_0}^{t_0^{(N)}} \int_{T_0}^{t_0^{(N)}} d_m(t) dt dt \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

การหาค่าพารามิเตอร์สามารถทำได้เช่นเดียวกับกรณีที่มี 3 พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า โดยการประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดของเมทริกซ์ในสมการ 3.27 และ 3.30

3.5 อัตราขยายดีซี

จากสมการที่ 3.1 ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์อันดับสองเมื่อทำการแปลงลาปลาซจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการที่ 3.33

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{d(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{C}{M}s + \frac{K}{M}} \quad (3.33)$$

ให้อินพุตเป็นสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (Unit Step) ซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น $\frac{1}{s}$ จากทฤษฎีค่าสุดท้าย (Final Value Theorem) จะได้ค่าอัตราขยายดีซี (DC gain)

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot G(s) \cdot \frac{1}{s} &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{s^2 + \frac{C}{M}s + \frac{K}{M}} \cdot \frac{1}{s} \\ &= \frac{1}{K} \end{aligned} \quad (3.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

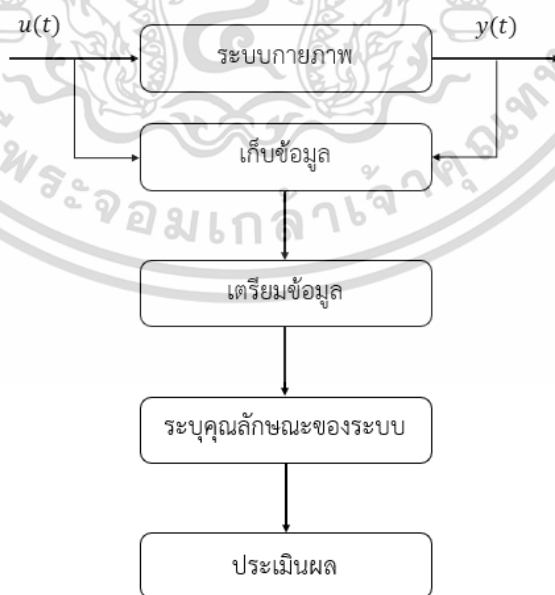
บทที่ 4

การทดสอบระบบวงเปิด

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการระบุคุณลักษณะอาศัยการกระตุ้นระบบแล้วทำการวัดข้อมูลทั้งอินพุตและเอาต์พุตมาทำการคำนวณ ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลอง ระบบที่ใช้ในการทดลอง องค์ประกอบของระบบเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณระยะอินพุตและการเปลี่ยนแปลงของมุมเอาต์พุต และส่วนสุดท้ายจะเป็นกล่าวถึงวิธีการเตรียมข้อมูลสำหรับการระบุคุณลักษณะ

4.1 ขั้นตอนการทดลอง

การวิจัยเริ่มต้นด้วยการสร้างระบบเซ็นเซอร์เพื่อเก็บข้อมูลการทดลองที่ประกอบด้วยสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบ ขั้นตอนต่อมาคือการเตรียมข้อมูลโดยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาชดเชยความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวน แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการระบุคุณลักษณะของระบบด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ขั้นตอนสุดท้ายคือการประเมินผลโดยการคำนวณค่าปกติรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยระหว่างผลการตอบสนองของแบบจำลองกับผลการตอบสนองที่ได้จากการวัด ซึ่งได้สรุปขั้นตอนไว้ในรูปที่ 4.1

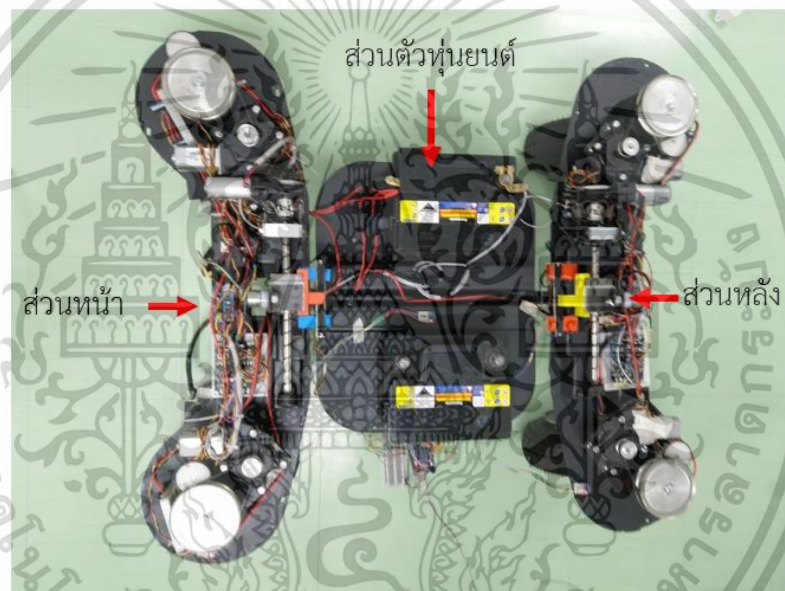


รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทดสอบระบบวงเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

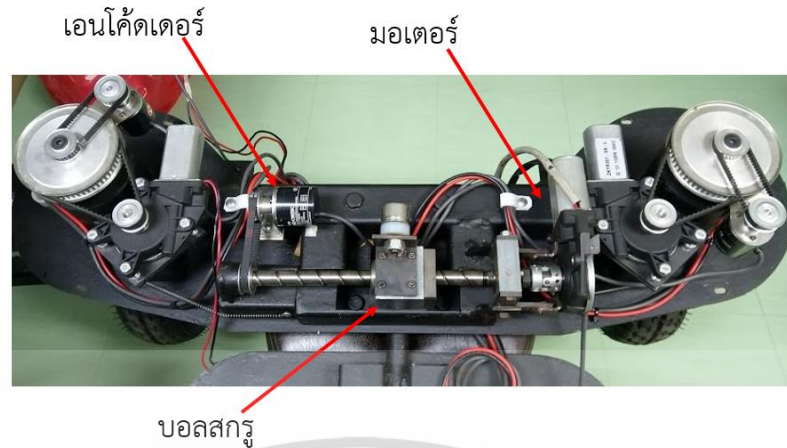
4.2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ

ในการวิจัยครั้งนี้หุ่นยนต์ที่ใช้มีขนาดความกว้าง 65 เซนติเมตร มีความยาว 75 เซนติเมตร และมีน้ำหนักรวมแบตเตอรี่ประมาณ 80 กิโลกรัม ในการทดสอบหุ่นยนต์ถูกแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ ส่วนหน้า ส่วนตัวหุ่นยนต์ และส่วนหลังรูปที่ 4.2 ซึ่งแต่ละส่วนสามารถขยับท่ามุมกับแนวระดับได้โดยใช้บอลสกรูในการยกตัวของล้อหน้าและล้อหลัง บอลสกรูถูกติดตั้งไว้บนส่วนหน้าและส่วนหลังของตัวหุ่นยนต์ เมื่อขยับบอลสกรูในทิศทางเดียวกันด้วยความเร็วเท่ากัน ส่วนตัวหุ่นยนต์ขยับท่ามุม θ กับแนวระดับ แต่เมื่อขยับบอลสกรูเพียงด้านเดียวไม่ว่าส่วนด้านหน้าหรือด้านหลังจะทำให้ล้อของหุ่นยนต์ข้างหนึ่งยกระดับขึ้นเหนือพื้นทำให้มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น



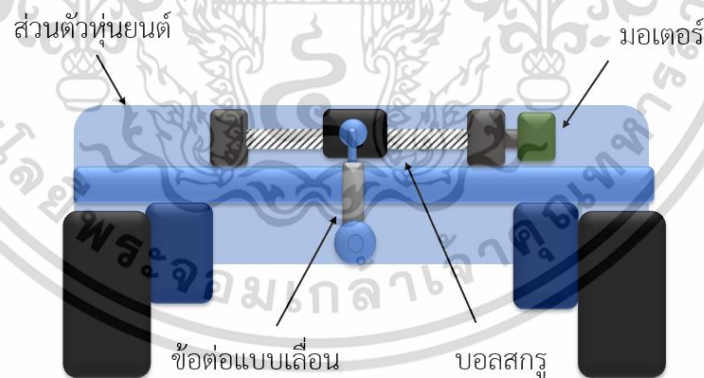
รูปที่ 4.2 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระที่ใช้ในการวิจัย

กลไกที่ใช้สำหรับการยกล้อในรูปที่ 4.3 ประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงรุ่น ZKYR361 ความเร็ว 110 รอบต่อนาที ที่แรงดันพิกัด 12 โวลต์ เป็นต้นกำลังเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่ติดตั้งกับตัวหุ่นยนต์เป็นแรงบิดทางกลในการหมุนบอลสกรู บอลสกรูความยาว 25 เซนติเมตร ระยะพิทช์ (Pitch) 2 เซนติเมตร ใช้ในการส่งกำลังจากแรงบิดของมอเตอร์หรือการหมุนเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น ข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic Joint) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างส่วนตัวของหุ่นยนต์กับส่วนด้านหน้า หรือส่วนตัวหุ่นยนต์กับส่วนด้านหลัง



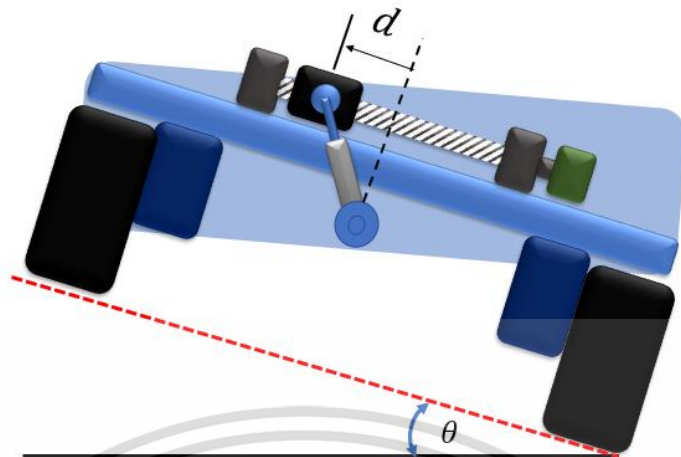
รูปที่ 4.3 กลไกที่ใช้สำหรับยกล้อของหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระ

ในสภาวะปกติหุ่นยนต์จะอยู่ในลักษณะดังรูปที่ 4.4 การยกล้อข้างใดข้างหนึ่งทำได้โดยการเคลื่อนบอลสกรูไปทางด้านซ้ายหรือด้านขวา เป็นระยะ d ทำให้ล้อส่วนหน้าหรือส่วนหลังของตัวหุ่นยนต์ยกตัวขึ้นทำมุม θ กับแนวระดับดังรูปที่ 4.5 ในขณะที่ล้อยกตัวขึ้นเหนือพื้นมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น มีสาเหตุมาจากความไม่สมดุลของจุดศูนย์กลางความถ่วงเมื่อล้อสัมผัสพื้นเพียงสามล้อ ซึ่งการสั่นสะเทือนจะก่อให้เกิดความเสียหายกับตัวหุ่นยนต์จากความล้า (Fatigue) อีกทั้งทำให้อุปกรณ์ที่ติดตั้งกับตัวหุ่นยนต์มีประสิทธิภาพการทำงานลดลง



รูปที่ 4.4 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระในสภาวะปกติ

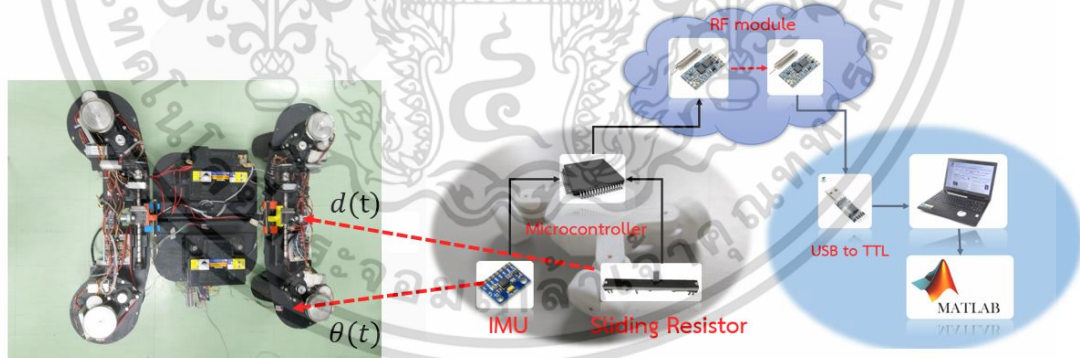
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้ออิสระเมื่อมีการยกล้อ

4.3 การเตรียมการทดสอบ

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้สร้างระบบการเก็บข้อมูล (Data Acquisition System) ที่สามารถส่งข้อมูลไร้สายผ่านสัญญาณวิทยุไปยังโปรแกรม MATLAB สำหรับการประมวลผลเพื่อสร้างแบบจำลองโดยระบบการเก็บข้อมูลมีส่วนประกอบตามที่แสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ระบบการเก็บข้อมูลการทดสอบ

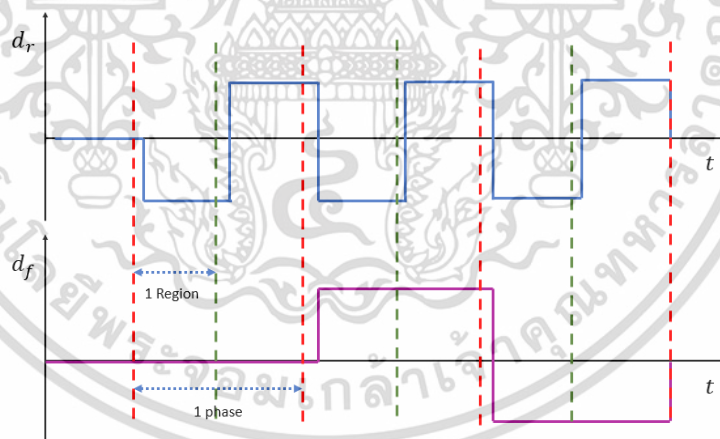
ระบบการเก็บข้อมูล ประกอบด้วยหน่วยวัดความเฉื่อย (Inertia Measurement Unit) ที่ประกอบด้วยไจโรสโคปที่ใช้วัดการสั่นสะเทือน โดยติดตั้งไจโรสโคปบนโครงสร้างส่วนหน้าและส่วนหลัง เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านโปรโตคอลการสื่อสารแบบ I²C และใช้โพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) เพื่อวัดระยะการเคลื่อนที่ของบอลสกรู เมื่อบอลสกรูมีการเคลื่อนที่จะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้มีการเปลี่ยนแปลง โดยการเก็บข้อมูลใช้ความถี่ในการซัดตัวอย่าง 500 Hz ไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกเชื่อมต่อกับโมดูลสื่อสารสัญญาณวิทยุเพื่อส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งต้องใช้ตัวแปลง USB to TTL เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถรับข้อมูลจากโมดูลสื่อสารสัญญาณวิทยุ และใช้โปรแกรม MATLAB ในการอ่านค่าและบันทึกผลการทดลองเป็นไฟล์ (.MAT) สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นตอนต่อไป

4.4 การดำเนินการทดสอบ

ในการทดลองแบบวงเปิด บอลสกรูด้านหนึ่งถูกยึดไว้ในตำแหน่งต่าง ๆ สามจุด คือ ตำแหน่งตรงกลางของบอลสกรู ซึ่งนิยามให้ $d = 0$ ตำแหน่ง $d > 0$ แทนการเลื่อนบอลสกรูไปด้านขวา และ $d < 0$ แทนการเลื่อนบอลสกรูไปข้างซ้าย แล้ววัดค่าความเร็วเชิงมุมที่ได้โดยใช้โรตารีโคป ตำแหน่งตรงกลางของบอลสกรูไมโครคอนโทรลเลอร์จะให้ค่าประมาณ 511 เนื่องจากโมดูลแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัลของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้มีความละเอียด 10 บิต โดยนิยามให้ d_f เป็นระยะเคลื่อนของบอลสกรูส่วนด้านหน้าและ d_r คือระยะบอลสกรูส่วนด้านหลัง โดยรูปแบบการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7

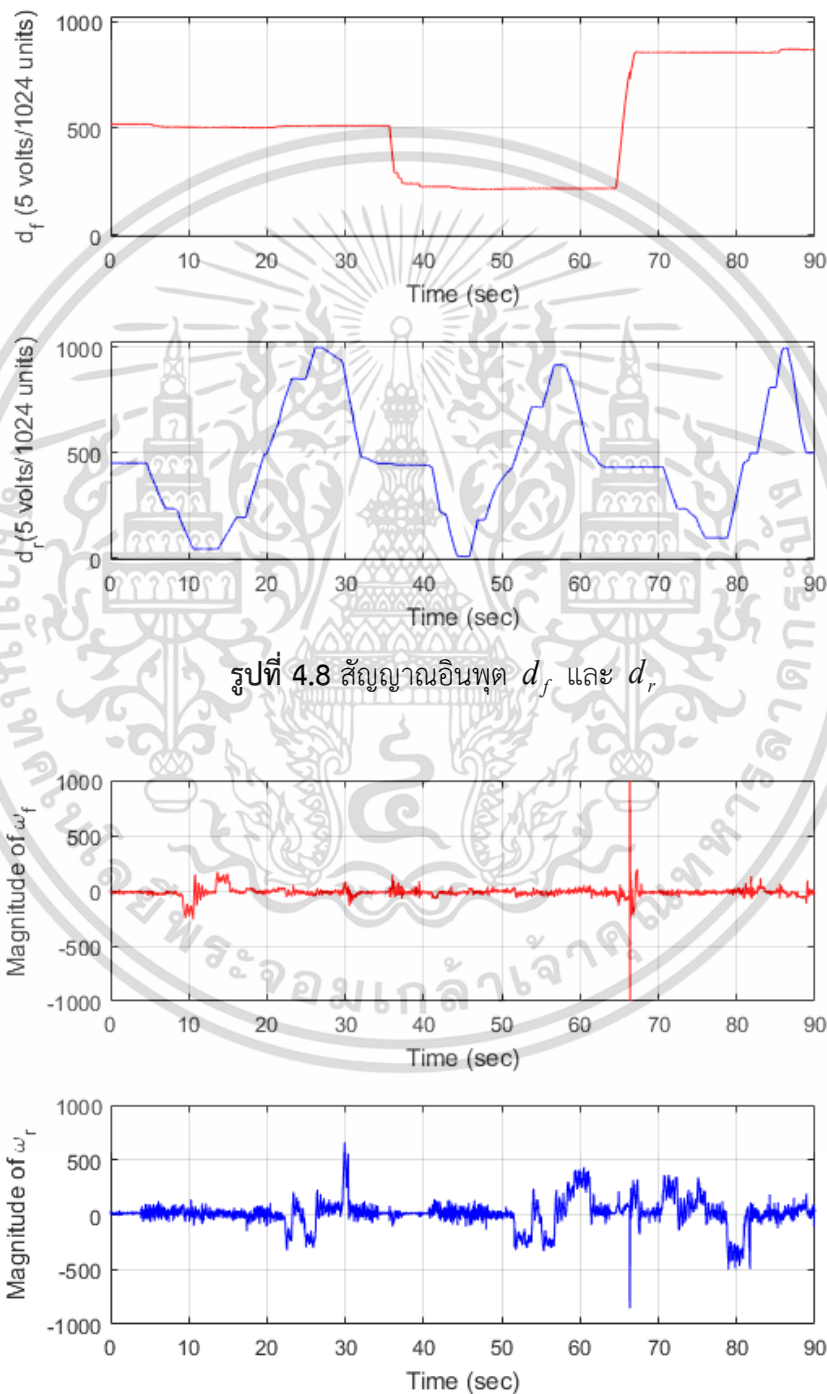


รูปที่ 4.7 รูปแบบการทดสอบระบบวงเปิด

4.5 ผลการทดสอบระบบวงเปิด

ในการทดลอง ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลการทดลองซึ่งมีสัญญาณอินพุตตามรูปที่ 4.8 โดยที่ระยะ d สามารถอ่านค่าได้ตั้ง 0-1024 ในระยะ 10 เซนติเมตร และสัญญาณเอาต์พุต ω_f และ ω_r ซึ่งเป็นความเร็วเชิงมุมของโครงสร้างส่วนด้านหน้าและส่วนด้านหลังตามลำดับดังรูปที่ 4.9 เนื่องจากข้อมูลที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากไจโรสโคปเป็นข้อมูลดิจิทัลของความเร็วเชิงมุมที่ต้องทำการคูณแฟกเตอร์เพื่อให้มีหน่วยเป็น องศาต่อวินาที อีกทั้งมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วยทำให้ยากต่อการทำความเข้าใจและการวิเคราะห์ ปราบปรามการรบกวนที่เกิดขึ้นจึงทำการปรับข้อมูลด้วยวิธีเชิงเลขตามกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezium Rule) เพื่อให้ได้ข้อมูลของตำแหน่งมุมที่มีการเปลี่ยนแปลง



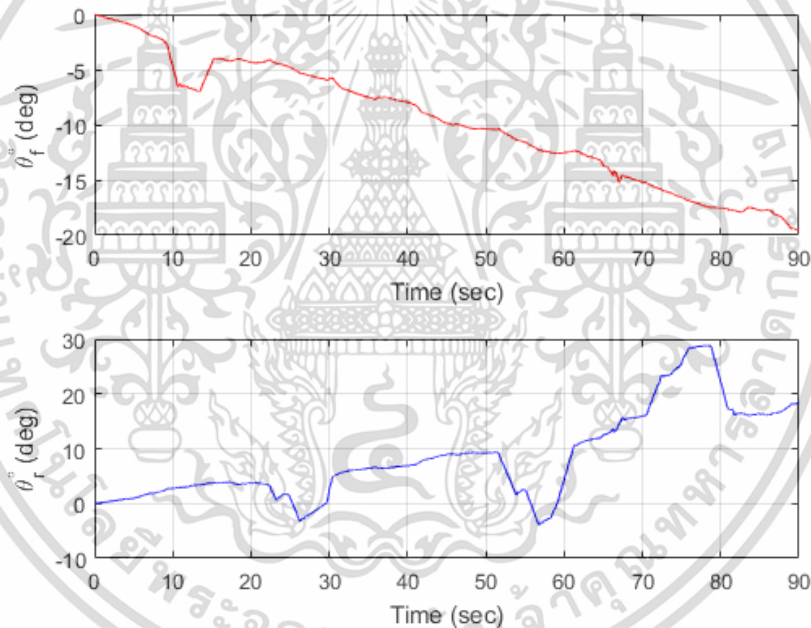
รูปที่ 4.8 สัญญาณอินพุต d_f และ d_r

รูปที่ 4.9 สัญญาณเอาต์พุต ω_f และ ω_r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การเตรียมข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์

ข้อมูลที่ได้จากไจโรสโคปเป็นข้อมูลของความเร็วเชิงมุม จึงต้องทำการปรับข้อมูลความเร็วเชิงมุมด้วยวิธีการเชิงตัวเลขด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู เพื่อให้ได้ค่ามุมที่มีการเปลี่ยนแปลง ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของมุม กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นรอบแกน x การใช้ไจโรสโคปวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะมีสิ่งที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ การไหลของข้อมูลที่ได้จากการวัดตามที่แสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งจำเป็นต้องชดเชย ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการชดเชยการไหลของข้อมูลโดยใช้ Allan variance แบบจำลอง AR และ ARMA [15] อีกทั้งยังมีการใช้ตัวกรองคาลมานในการชดเชยการไหลของข้อมูล [16-17] ในการวิจัยครั้งนี้ได้ชดเชยการไหลของข้อมูลดังกล่าวด้วยการใช้สมการถดถอยเชิงเส้นก่อนที่จะนำข้อมูลไปใช้ในการระบุคุณลักษณะระบบพลวัต

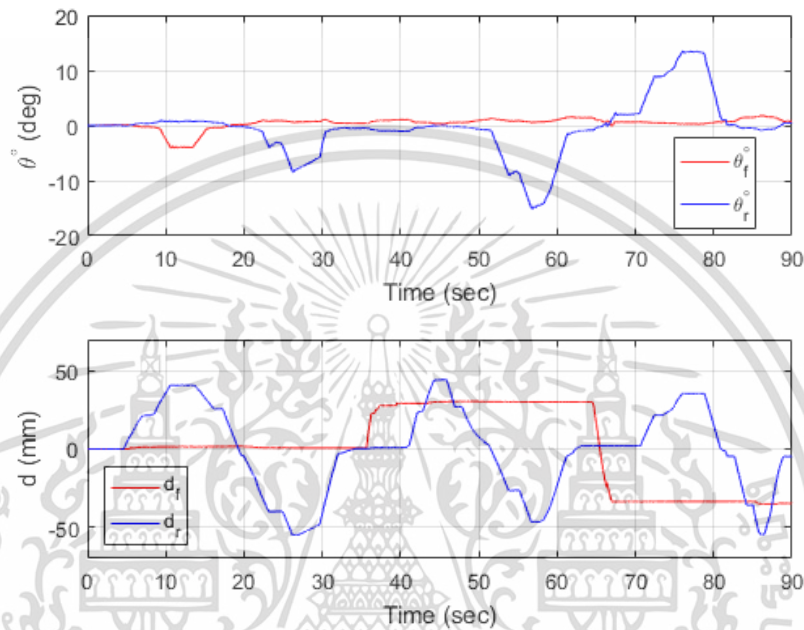


รูปที่ 4.10 ข้อมูลที่ได้จากการปรับพันธ์ ω_f และ ω_r

จากข้อมูลที่ได้รับการชดเชยในรูปที่ 4.11 มุม θ_r มีค่าเป็นลบที่เวลาประมาณ 50-65 วินาที ซึ่งหมายถึงล้อด้านซ้ายจะมีการยกระดับขึ้นเหนือพื้นในช่วงเวลาดังกล่าว สัญญาณ d_r ในรูปที่ 4.8 จะถูกแปลงให้มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรและกลับเครื่องหมายให้สอดคล้องกับนิยามตามรูปที่ 4.5 กล่าวคือ เมื่อใดก็ตามที่สัญญาณอินพุตเป็นบวก สัญญาณเอาต์พุตก็จะเป็นบวกด้วย เมื่อสังเกตสัญญาณอินพุตในรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าในช่วงเวลาดังกล่าว d_r จะถูกยึดไว้ให้คงที่ที่ตำแหน่ง $d_r = 30$ มิลลิเมตร หลังจากนั้นมุม θ_r มีค่าเป็นบวกที่เวลาประมาณ 65-82 วินาที ซึ่งหมายถึงล้อด้านขวาจะมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยกระดับขึ้นเหนือพื้นในช่วงเวลาดังกล่าว เมื่อสังเกตสัญญาณอินพุตจะเห็นว่าในช่วงเวลาดังกล่าว d_f จะถูกยึดไว้ให้คงที่ที่ตำแหน่ง $d_f = -35$ มิลลิเมตร เนื่องจากในสถานการณ์ดังกล่าวมีการยึด d_f ที่ตำแหน่งต่างกันทำให้ต้องมีการสร้างแบบจำลองแยกกันระหว่างการยกล้อซ้ายและล้อขวาโดยในการสร้างแบบจำลองจะกำหนดให้ d_r เป็นอินพุตของระบบและ θ_r เป็นเอาต์พุตของระบบ



รูปที่ 4.11 ข้อมูลจากการทดลองที่ได้รับการชดเชยด้วยสมการถดถอยเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์

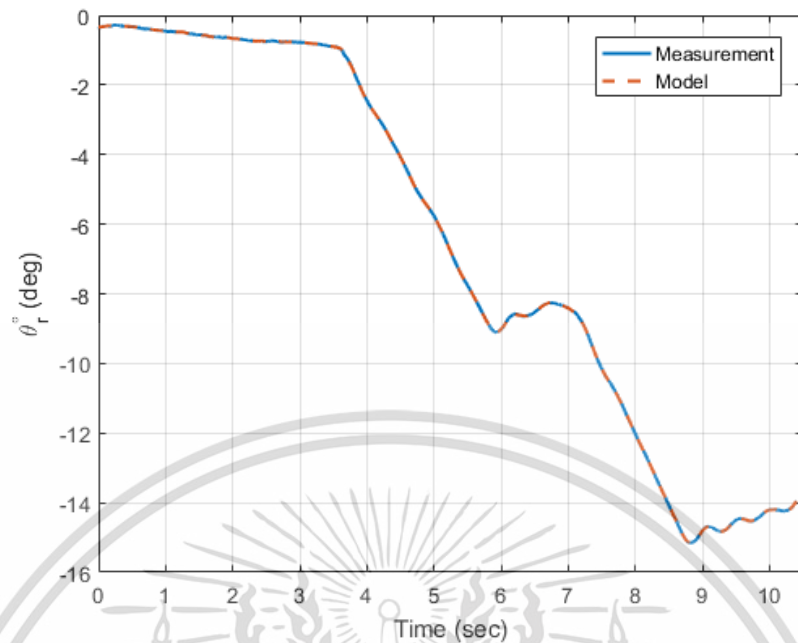
ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงผลการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์โดยการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการวัด ผลของระยะเวลาการแบ่งช่วงเวลาย่อยต่อความถูกต้องของแบบจำลอง และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลองที่ได้จากการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์กับแบบจำลองที่ได้จากการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีโรโครงสร้าง

5.1 ผลการทดสอบกรณีมีสามพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

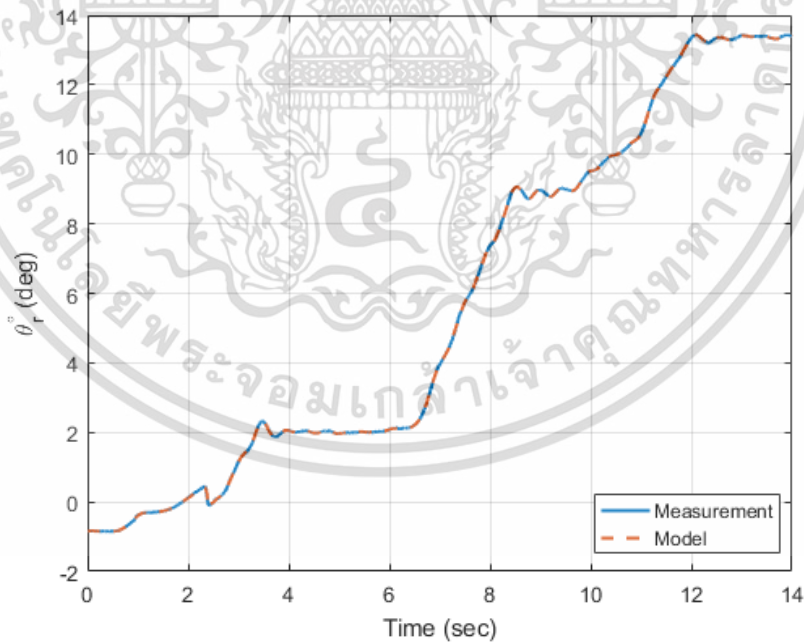
การใช้โครงสร้างของระบบมวล สปริง และตัวหน่วงเพื่อสร้างแบบจำลองพลวัตมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายระบบคือ m , c และ k ซึ่งผลการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์ โดยการกำหนดให้ d_r , อินพุตและ θ_r เป็นเอาต์พุตโดยจะแบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นแบบจำลองของการยกล้อซ้าย ซึ่งใช้ข้อมูลจากการทดสอบระบบวงเปิดตามรูปที่ 4.11 ตั้งแต่วินาทีที่ 47.98 ถึงวินาทีที่ 58.38 และแบบจำลองของการยกล้อขวาใช้ข้อมูลตั้งแต่วินาทีที่ 64 ถึงวินาทีที่ 78 ในการจำลองกำหนดให้ระยะเวลาในแต่ละช่วงเวลาย่อย (Time Section) $\Delta t = 0.4$ วินาที ในสมการที่ 3.7

การจำลองผลการตอบสนองในรูปที่ 5.1 เป็นผลการตอบสนองของแบบจำลอง $\theta_{\text{model},i}(t)$ สำหรับแบบจำลองการยกล้อซ้าย มีค่า NRMSE = 99.89 % จะสังเกตได้ว่าค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสำหรับล้อซ้ายมีค่าใกล้เคียงศูนย์ในช่วงแรกและมีค่าเปลี่ยนไปเมื่อ θ_r มีการเปลี่ยนแปลงตามที่แสดงในรูปที่ 5.3 ในส่วนของแบบจำลองการยกล้อขวาผลการตอบสนองของแบบจำลองตามที่แสดงในรูปที่ 5.2 มีค่า NRMSE = 99.82 % และค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้แสดงไว้รูปที่ 5.4

จากแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ในรูปที่ 5.3 และ รูปที่ 5.4 เมื่อลองนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาเฉลี่ยค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไม่สามารถที่จะใช้ในการนำเสนอแบบจำลองได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ไม่ได้มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง

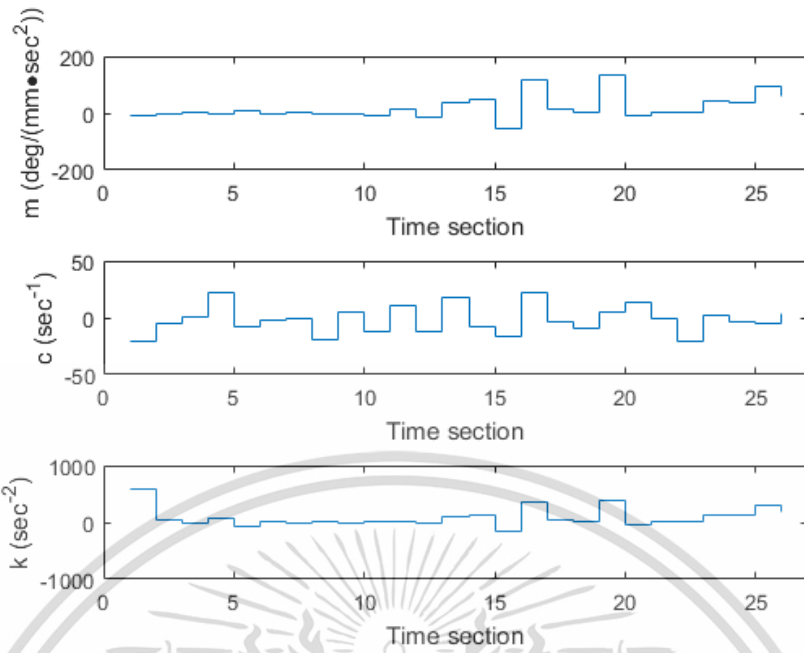


รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลอง $\theta_{\text{model},i}(t)$ กับข้อมูลจากการวัด θ_r สำหรับ ล้อซ้ายกรณีมีสามพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

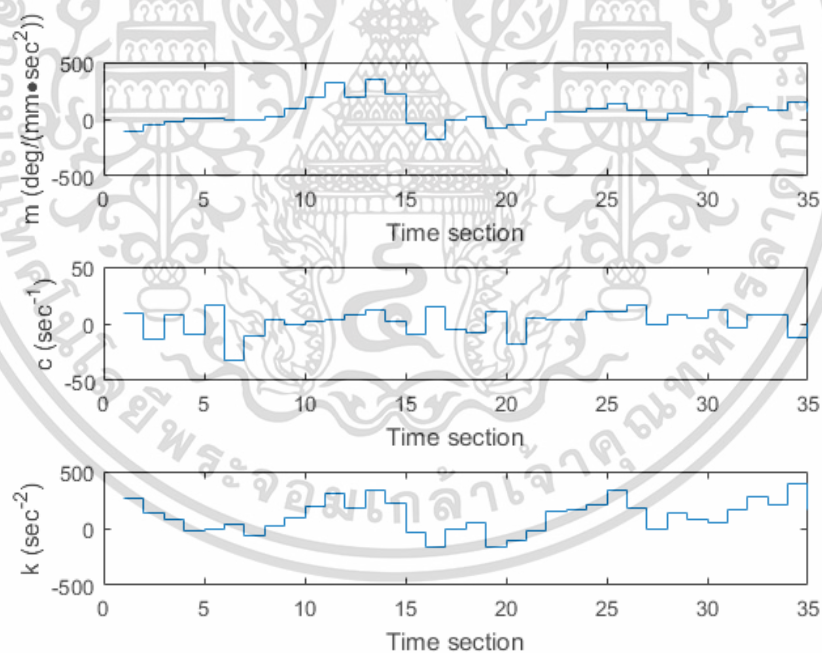


รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลอง $\theta_{\text{model},i}(t)$ กับข้อมูลจากการวัด θ_r สำหรับ ล้อขวากรณีมีสามพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 ค่า m , c และ k สำหรับแบบจำลองส่วนล้อซ้ายกรณีมีสามพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

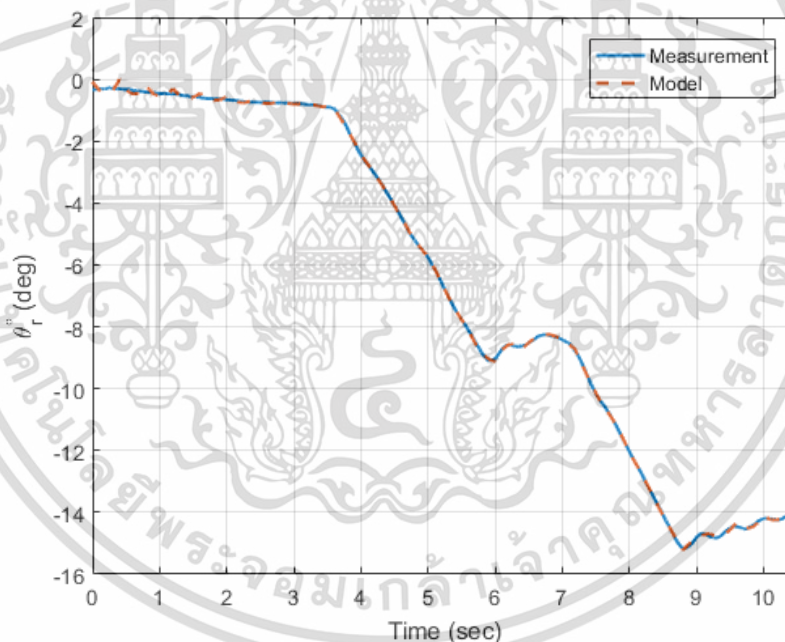


รูปที่ 5.4 ค่า m , c และ k สำหรับแบบจำลองส่วนล้อขวากรณีมีสามพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

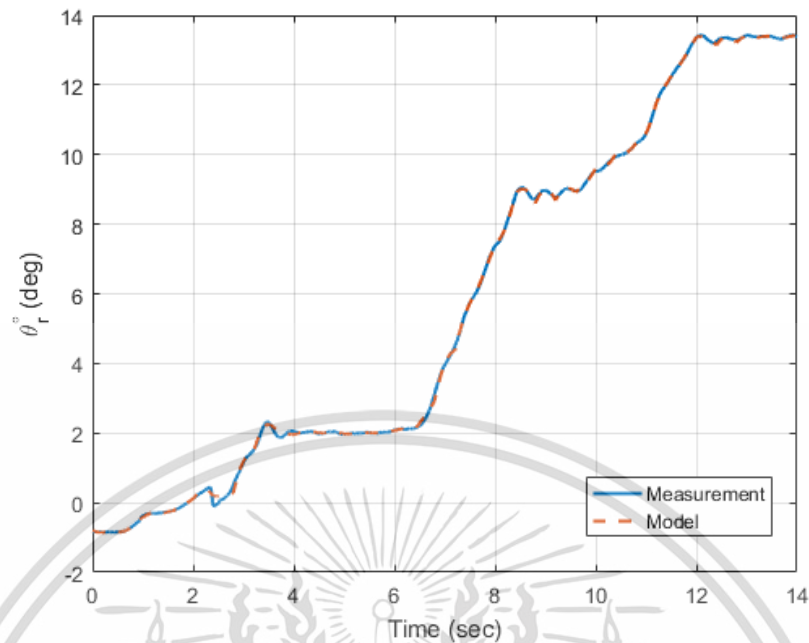
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทดสอบกรณีมีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

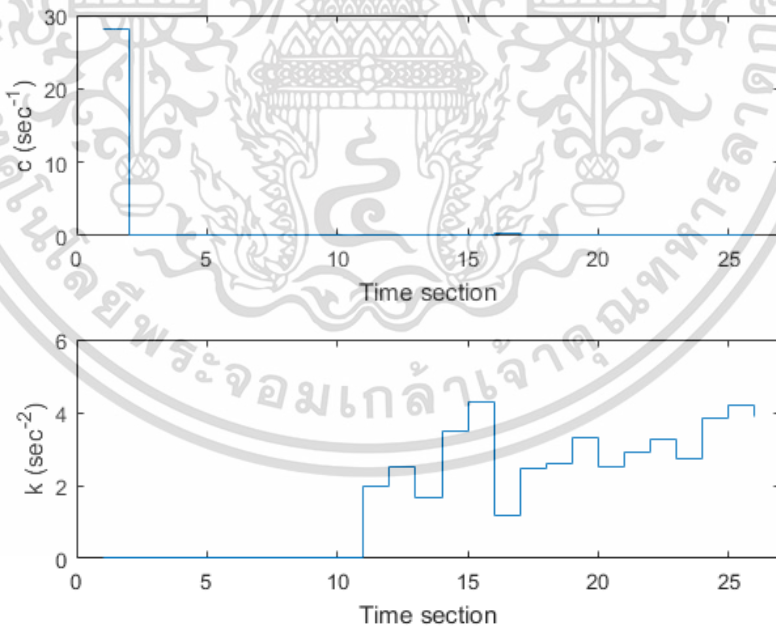
ในกรณีนี้มีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเพียงสองตัวคือ c และ k ผลการตอบสนองของแบบจำลองในกรณีนี้ได้กำหนดเงื่อนไขให้ค่า c และ k ต้องมีค่ามากกว่าศูนย์เพื่อให้สอดคล้องกับความหมายทางกายภาพและใช้ค่า $\Delta t = 0.4$ วินาที ซึ่งผลการตอบสนองสำหรับแบบจำลองการยกล้อซ้ายดังรูปที่ 5.5 มีค่า NRMSE=99.09% และค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.7 จะสังเกตเห็นว่าค่า c จะมีค่าประมาณ 0 เช่นเดียวกับค่า k ที่มีค่าใกล้เคียง 0 ในช่วงแรกก่อนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 2-4 เมื่อผลการตอบของแบบจำลองเกิดการเปลี่ยนแปลง ผลการตอบสนองของแบบจำลองของการยกล้อขวาดังแสดงในรูปที่ 5.6 มีค่า NRMSE=98.95% ซึ่งแนวโน้มของพารามิเตอร์ c และ k ตามรูปที่ 5.8 จะมีลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลองของการยกล้อซ้าย คือจะมีค่า k ประมาณ 3 โดยที่ค่า c มีค่าประมาณ 0 เมื่อสัญญาณเอาต์พุต θ_r มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลอง $\theta_{\text{model},i}(t)$ กับข้อมูลจากการวัด θ_r สำหรับล้อซ้ายกรณีมีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

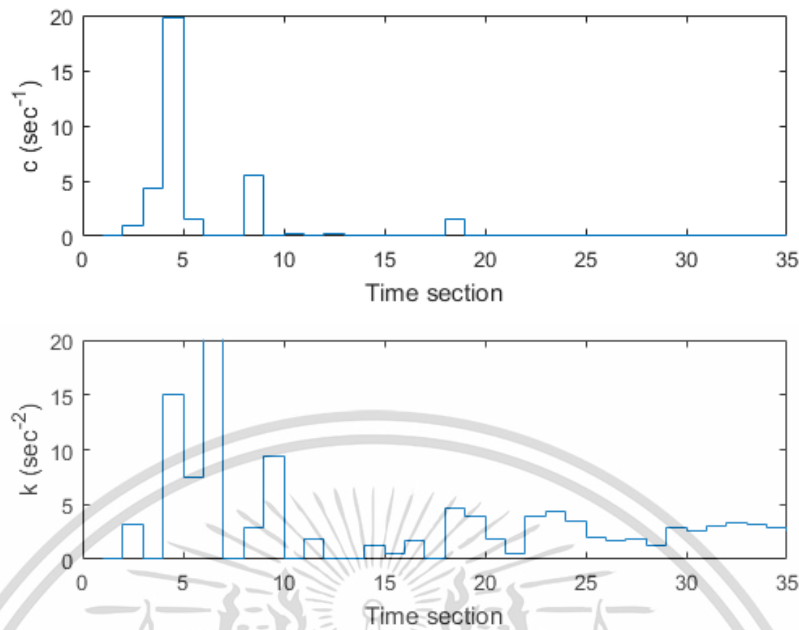


รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของแบบจำลอง $\theta_{\text{model},i}(t)$ กับข้อมูลจากการวัด θ , สำหรับ ล้อขวารถมีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า



รูปที่ 5.7 ค่า c และ k สำหรับแบบจำลองส่วนล้อข้ายกรถมีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 ค่า c และ k สำหรับแบบจำลองส่วนล้อยวากรณีมีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของช่วงเวลาย่อยในการแบ่งข้อมูล Δt จะทำให้ค่า NRMSE ของแบบจำลองมีค่าลดลง เนื่องจากจำนวน c และ k ของแบบจำลองลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ของ Δt และค่า NRMSE ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดช่วงเวลา Δt และค่า NRMSE ของแบบจำลอง

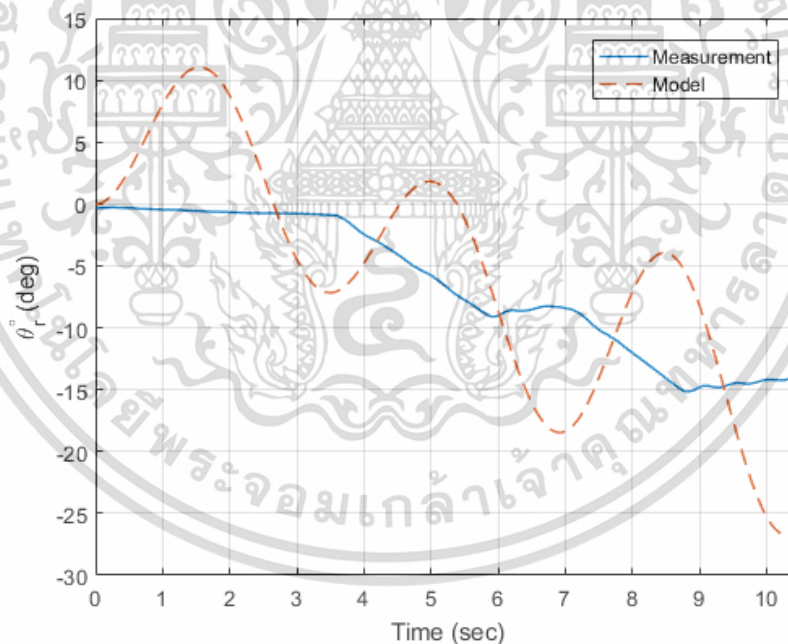
Δt (s)	ค่า NRMSE แบบจำลองส่วนล้อย้าย (%)	ค่า NRMSE แบบจำลองส่วนล้อยว (%)
0.1	99.90	99.81
0.4	99.09	98.95
0.8	96.17	97.95

จากแนวโน้มของค่า c และ k ในรูปที่ 5.7 และ รูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าในช่วงท้ายของแบบจำลองจะมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ผู้วิจัยได้ทดลองเฉลี่ยค่าพารามิเตอร์ในช่วงดังกล่าว ซึ่งค่าของพารามิเตอร์ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ c และ k ด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์

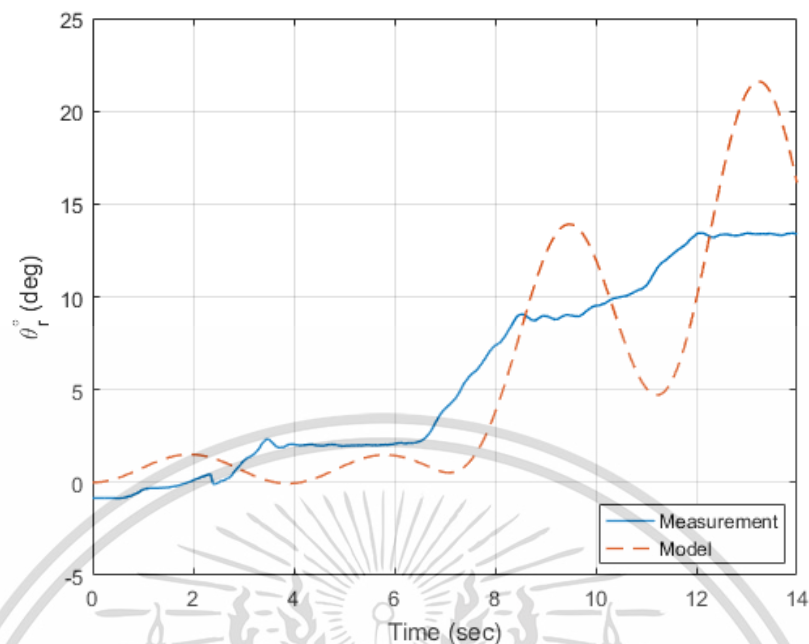
	แบบจำลองส่วนล้อย้าย	แบบจำลองส่วนล้อยาว
ช่วงแบบจำลอง	12-26	26-35
ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ c	0.0322	0.0141
ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ k	2.9910	2.6379
NRMSE (%)	-28.40	31.60

จากตารางที่ 5.2 ใช้ค่าในช่วงที่ 12 -26 สำหรับแบบจำลองส่วนล้อย้าย ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์ $c = 0.0322$ และ $k = 2.9910$ และใช้ข้อมูลดังกล่าวในการจำลองผลตอบสนองได้ผลตามรูปที่ 5.9 โดยมีค่า NRMSE=-28.40% เช่นเดียวกับแบบจำลองสำหรับล้อยาวโดยได้เฉลี่ยค่าพารามิเตอร์ในช่วงที่ 21-35 ได้ค่าพารามิเตอร์ $c = 0.0141$ และ $k = 2.6379$ เมื่อนำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองได้ผลการตอบสนองดังรูปที่ 5.10 โดยได้ค่า NRMSE=31.60%



รูปที่ 5.9 ผลการตอบสนองของแบบจำลองสำหรับล้อย้ายโดยใช้ค่าเฉลี่ย $c = 0.0322$ และ $k = 2.9910$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ผลการตอบสนองของแบบจำลองสำหรับล้อขวาโดยใช้ค่าเฉลี่ย $c=0.0141$ และ $k=2.6379$

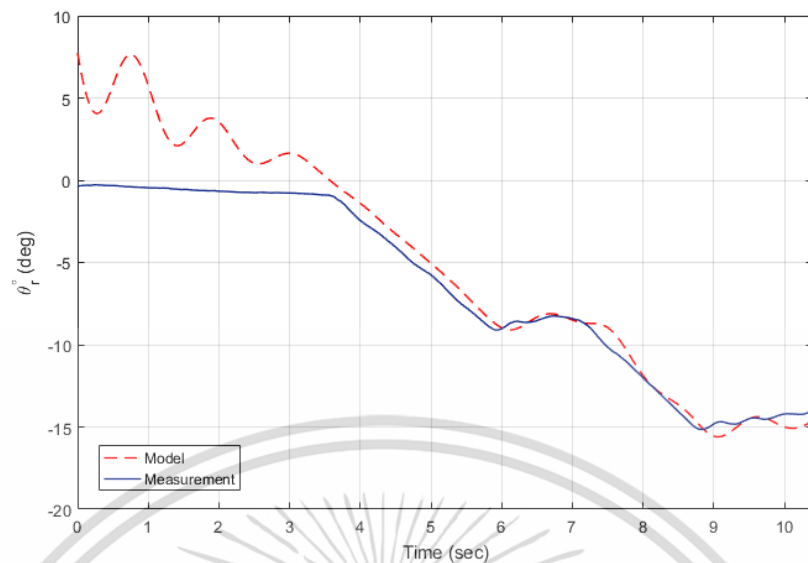
5.3 การระบุคุณลักษณะด้วยวิธีไร้โครงสร้าง

การระบุคุณลักษณะด้วยวิธีไร้โครงสร้าง เป็นหนึ่งในวิธีการระบุคุณลักษณะของระบบที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งเป็นกล่องเครื่องมือของโปรแกรม MATLAB วิธีการนี้วิศวกรสามารถระบุคุณลักษณะของระบบโดยที่ไม่ทราบโครงสร้างหรือพารามิเตอร์ใด ๆ กล่องเครื่องมือดังกล่าวประกอบด้วยโครงสร้างที่หลากหลาย โครงสร้างเหล่านี้มีความซับซ้อนแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยร่วมที่นำเข้ามาประกอบในพลศาสตร์ วิศวกรสามารถเลือกโครงสร้างเหล่านี้เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ผลการตอบสนองของแบบจำลองสอดคล้องกับการวัด

ในการระบุคุณลักษณะผู้วิจัยใช้โครงสร้างของฟังก์ชันถ่ายโอน โดยกำหนดให้จำนวนโพลของแบบจำลองเท่ากับ 2 ได้แบบจำลองสำหรับส่วนล้อซ้ายตามสมการที่ 5.1 ซึ่งมีค่า NRMSE = 52.68% โดยผลของการตอบสนองของแบบจำลองได้แสดงในรูปที่ 5.11

$$\frac{\theta(s)}{d(s)} = \frac{10.04}{s^2 + 1.251s + 31.36} \quad (5.1)$$

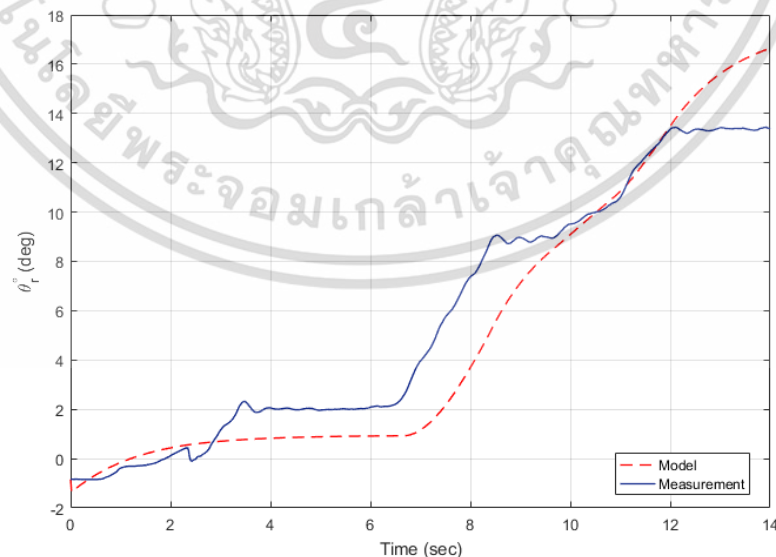
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 เปรียบผลการตอบสนองของแบบจำลองส่วนล้อย้ายโดยการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีไร้โครงสร้าง กำหนดให้จำนวนโพลเท่ากับ 2

และได้แบบจำลองสำหรับการยกล้อขวาตามสมการที่ 5.2 โดยมีค่า NRMSE = 66.76% ซึ่งผลการตอบสนองได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.12

$$\frac{\theta(s)}{d(s)} = \frac{589.6}{s^2 + 819.3s + 1186} \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.12 เปรียบผลการตอบสนองของแบบจำลองส่วนล้อยาวโดยการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีไร้โครงสร้าง กำหนดให้จำนวนโพลเท่ากับ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 สรุปผลการทดสอบ

การระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์โดยกำหนดให้แบบจำลองมีโครงสร้างลักษณะเดียวกับโครงสร้างของระบบมวล สปริง และตัวหน่วง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับสองที่มี 3 พารามิเตอร์ในการบ่งบอกคุณลักษณะระบบ การกำหนดให้แบบจำลองมี 3 พารามิเตอร์ไม่ทราบค่าได้ค่า NRMSE ที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกำหนดให้แบบจำลองมี 2 พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.1 และ 5.2 อีกทั้งค่าความถูกต้องของแบบจำลองจะขึ้นอยู่กับความกว้างของช่วงเวลาย่อยในการแบ่งข้อมูลหรือจำนวนช่วงย่อยแบบจำลองตามที่ได้นิยามไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ไว้ในตารางที่ 5.1 วิศวกรสามารถเลือกใช้ช่วงเวลาในการแบ่งให้เหมาะสม โดยคำนึงถึงความซับซ้อนของตัวควบคุมที่จะทำการออกแบบ เนื่องจากความซับซ้อนของตัวควบคุมดังกล่าวจะมากขึ้นเมื่อความถูกต้องของแบบจำลองเพิ่มขึ้น แม้ว่าพารามิเตอร์ที่ได้ในหัวข้อ 5.2 จะมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่งก็ตาม การใช้ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ดังกล่าวในการนำเสนอแบบจำลองให้ผลการตอบสนองของแบบจำลองที่ไม่ถูกต้องนัก การระบุคุณลักษณะด้วยวิธีไร้โครงสร้างได้ค่าความถูกต้องที่ไม่มากเช่นเดียวกัน เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวใช้เพียงพารามิเตอร์ชุดเดียวในการอธิบายระบบซึ่งในความเป็นจริงบางระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงทำให้ไม่สามารถนำเสนอแบบจำลองในรูปแบบดังกล่าว

บทที่ 6

สรุป

6.1 สรุปการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับพลวัตการสั้นสะท้อนของโครงสร้างหุ่นยนต์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น แบบจำลองการสั้นสะท้อนถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ แบบจำลองสำหรับการยกล้อซ้าย และแบบจำลองของการยกล้อขวา การระบุคุณลักษณะใช้วิธีมินิมอลโมเดลลิง โดยการกำหนดให้โครงสร้างของแบบจำลองมีลักษณะเดียวกับโครงสร้างของระบบมวล สปริง และตัวหน่วงที่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์อันดับสอง

ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าของระบบ ใช้วิธีพื้นฐานปริพันธ์ ซึ่งวิธีการดังกล่าวเริ่มต้นด้วยการแบ่งข้อมูลจากการทดลองออกเป็นช่วงและกำหนดให้พารามิเตอร์ m , c และ k ของระบบเป็นฟังก์ชันคงที่ในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งแต่ละช่วงของแบบจำลองสามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์ m , c และ k หนึ่งชุด หลังจากนั้นได้สมมติให้ระบบพลวัตสามารถนำเสนอได้ด้วยการใช้พารามิเตอร์เพียง 2 ตัวคือพารามิเตอร์ c และ k ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวได้มาจากการแก้สมการเมทริกซ์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการใช้พารามิเตอร์ 3 ตัวในการสร้างแบบจำลองให้ความถูกต้องวัดโดย NRMSE ร้อยละ 99.89 ซึ่งดีกว่าการใช้ 2 พารามิเตอร์ที่มีความถูกต้อง 99.09 สำหรับแบบจำลองส่วนล้อซ้าย เช่นเดียวกับแบบจำลองส่วนล้อขวาการใช้พารามิเตอร์ 3 ตัวในการสร้างแบบจำลองให้ความถูกต้องร้อยละ 99.82 ซึ่งดีกว่าการใช้ 2 พารามิเตอร์ที่มีความถูกต้อง 98.95 โดยกำหนดช่วงเวลาย่อย $\Delta t = 0.4$ วินาที และค่า NRMSE จะลดลงเมื่อเพิ่มช่วงเวลา Δt ของแบบจำลอง

วิธีการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์เป็นวิธีการที่ง่ายและมีความยืดหยุ่นในการกำหนดโครงสร้างอีกทั้งให้ความถูกต้องของแบบจำลองที่ดีและง่ายสำหรับการออกแบบระบบควบคุม ทั้งนี้ เนื่องจากระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง การใช้ค่าเฉลี่ยของค่า c และ k ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องไม่มากนัก นอกจากนี้ การคำนวณด้วยพื้นฐานวิธีปริพันธ์นั้นเหมาะสำหรับการประมวลผลแบบเวลาจริง เนื่องจากไม่มีความจำเป็นจะต้องทำการคำนวณค่าจาโคเบียน (Jacobian) ในทุกรอบการคำนวณ

กล่าวโดยสรุป ผลผลิตของการวิจัยนี้ คือทำให้ได้ฟังก์ชันสำเร็จรูปสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์พลวัตระบบการสั้นสะท้อนแบบไม่เป็นเชิงเส้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดโครงสร้างของแบบจำลองให้มีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างของมวล สปริงและตัวหน่วง ซึ่งแนวคิดนี้สามารถนำไปใช้กับระบบอื่น ๆ โดยการเลือกโครงสร้างของแบบจำลองที่เหมาะสมกับระบบ เช่น โครงสร้างของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) เพื่ออธิบายพลวัตของความร้อน ซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งและอินพุต เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kumaresan R., Tufts D. “Estimating the parameters of exponentially damped sinusoids and pole zero modelling in noise”, **IEEE Trans. Acoust. Speech. Signal Process.**, vol.30, 1982. pp. 833-840
- [2] Barone P. “Some practical remarks on the extended prony’s method of spectrum analysis”, **Proc. IEEE.**, vol.76, 1988. pp. 716-723
- [3] Wiltshire R.A., Ledwich G. and O’Shea P. “A kalman filtering approach to rapidly detecting modal changes in power systems”, **IEEE. Trans. Power Syst.**, vol.22, 2007. pp. 1698-1706
- [4] Burlon A., Fella G. and Arena F. “Exact frequency response analysis of axially loaded beams with viscoelastic dampers”, **International Journal of Mechanical Sciences.** Vol.115-116, 2016. pp. 370-384
- [5] Hua Y., Sarkar T.K. “Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise.”, **IEEE Trans. Acoust. Speech. Signal.** vol.38, no.5, 1990. pp. 814-824
- [6] Ning J., Pan X. and Venkatasubramanian V. “Oscillation modal analysis from ambient synchrophasor data using distributed frequency domain optimization”, **IEEE. Trans. Power Syst.** vol 28, no.2, 2013. pp. 1960-1968
- [7] Karimi-Ghartemani M., Khajehoddin S. A., Jain P. K., Bakhshai A. and Mojiri M. “Addressing DC component in PLL and notch filter algorithm.”, **IEEE. Trans. Power. Electron.** vol.27, 2012. pp.78-86
- [8] Mansouri M., Mojiri M., Ghadiri-Modarres M.A. and Karimi-Ghartemani M. “Estimation of Electromechanical Oscillations From Phasor Measurements Using Second-Order Generalized Integrator”, **IEEE. Trans. Instru. Meas.** vol.64, no.4, 2014. pp.943-950
- [9] Lennart L. **System identification theory for the user.** 1999. New Jersey : Prentice-Hall, Inc.
- [10] Lennart L. **System Identification Toolbox™ User's Guide.** 2015. Miami : The MathWorks, Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Visentin R., Schiavon M., Basu R., Basu A., Man C.R., Cobelli C. "Chapter 6 - Physiological models for artificial pancreas development", **The Artificial Pancreas, Academic Press.**, 2019. pp 123-152
- [12] Eleni I.G., Dimitrios I.F, Stelios K.T. "4 - Physiological Models and Exogenous Input Modeling.", **Personalized Predictive Modeling in Type 1 Diabetes, Academic Press.**, 2018. pp. 61-96
- [13] Hann C.E., Snowdon M., Rao A., Winn O., Wongvanich N. and Chen X. "Minimal modelling approach to describe turbulent rocket roll dynamics in a vertical wind tunnel", **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering.**, vol.226, no.9, 2012. pp. 1042–1060.
- [14] Choi R., Hann C.E., Chen X. "Minimal Models to Capture the Dynamics of a Rotary Unmanned Aerial Vehicle.", **Journal of Intelligent & Robotic Systems.**, Vol.75, 2012. pp. 86-91
- [15] Diao Z., Quan H., Lan L. and Han Y. "Analysis and compensation of MEMS gyroscope drift", **2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST), Wellington**, 2013. pp. 592-596
- [16] Yan X., Wenjie C. and Wenhui P. "Research on random drift modeling and a Kalman filter based on the differential signal of MEMS gyroscope", **2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Guiyang**, 2013. pp. 3233-3237
- [17] Yong S., Jiabin C., Chunlei S. and Yongqiang H. "Research on the compensation in MEMS gyroscope random drift based on time-series analysis and Kalman filtering", **2015 34th Chinese Control Conference (CCC), Hangzhou**, 2015. pp. 2078-2082



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ฟังก์ชันสำหรับการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์

ฟังก์ชันสำหรับการระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปริพันธ์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนสำคัญของการระบุคุณลักษณะระบบในรูปแบบที่ 2.3 คือ ขั้นตอนการกำหนดโครงสร้างและขั้นตอนการคำนวณพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ฟังก์ชันที่ได้พัฒนาสำหรับกรณีสามพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าได้ตั้งชื่อว่า `minimal_msd` ซึ่งมีโครงสร้างดังนี้

$$[y_{\text{mod}}, c, k, m] = \text{minimal_msd}(U, Y, T_s, T)$$

โดยมีอาร์กิวเมนต์อินพุต 4 ตัว ประกอบด้วย

U	อาร์เรย์ของข้อมูลอินพุต $d_m(t)$
Y	อาร์เรย์ของข้อมูลเอาต์พุต $\theta_m(t)$
Ts	คาบเวลาการซิกตัวอย่างของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต
T	ระยะเวลาของแต่ละช่วงย่อย Δt

และอาร์กิวเมนต์เอาต์พุต 4 ตัว ประกอบด้วย

y _{mod}	ผลการตอบสนองของแบบจำลองต่อข้อมูลอินพุต U
c	ค่าพารามิเตอร์ c ในแต่ละช่วงเวลาย่อย
k	ค่าพารามิเตอร์ k ในแต่ละช่วงเวลาย่อย
m	ค่าพารามิเตอร์ m ในแต่ละช่วงเวลาย่อย

ขั้นตอนการคำนวณของฟังก์ชัน

- 1.รับข้อมูลอินพุต $d_m(t)$ และเอาต์พุต $\theta_m(t)$ จากการวัด กำหนดระยะเวลาของแต่ละช่วงย่อย Δt เพื่อแบ่งข้อมูลเป็นช่วงเวลาย่อย
- 2.คำนวณเมทริกซ์ **A** และ **b** ในสมการที่ 3.17-3.18 และ 3.20-3.21
- 3.แก้สมการสมการเมทริกซ์ที่ 3.16 และ 3.19 ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ได้ผลลัพธ์เป็นเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า
- 4.นำเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าที่ได้จากการแก้สมการในขั้นตอนที่ 3 มาจำลองการตอบสนองตามสมการที่ 3.14 ได้ผลการตอบสนองของแบบจำลอง y_{mod}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับฟังก์ชันที่ใช้ในกรณีสองพารามิเตอร์ได้ตั้งชื่อว่า `minimal_msd_2` โดยมีอาร์กิวเมนต์ อินพุตเช่นเดียวกับกรณี 3 พารามิเตอร์ไม่ทราบค่า แต่อาร์กิวเมนต์เอาต์พุตมีเพียง 3 ตัว เนื่องจากไม่มี อาร์กิวเมนต์ m โดยฟังก์ชันมีโครงสร้างดังนี้

$$[y_{\text{mod}}, c, k] = \text{minimal_msd}(U, Y, T_s, T)$$

ขั้นตอนการคำนวณของฟังก์ชันจะมีลำดับขั้นตอนเหมือนกรณี 3 พารามิเตอร์ไม่ทราบค่า แต่การคำนวณ เมทริกซ์ A และ b จะคำนวณจากสมการที่ 3.28-3.29 และ 3.31-3.32

ฟังก์ชันกรณีสามพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

```
function [ymod, c, k, m]=minimal_msd(U,Y,Ts,T)

tm=0:Ts:(length(U)-1)*Ts;
N=ceil(tm(end)/T);

for i=1:N
    t(i)=T*(i-1):0.02:T*(i)-0.02;
    y(i)=interp1(tm,Y,t(i));
    u(i)=interp1(tm,U,t(i));

    %1st integral
    inty(i)=cumtrapz(t(i),y(i));
    intu(i)=cumtrapz(t(i),u(i));

    %2nd integral
    int2y(i)=cumtrapz(t(i),inty(i));
    int2u(i)=cumtrapz(t(i),intu(i));

end

lb=[-Inf;-Inf;-Inf;-Inf;-Inf];
ub=[Inf;Inf;Inf;Inf;Inf];

A{1}=[t{1}'.^0    t{1}'    -inty{1}'    -int2y{1}'    int2u{1}'];
b{1}=y{1}';

p1{1}=lsqlin(A{1},b{1},[],[],[],[],lb,ub);
ymodel{1}=p1{1}(1)+p1{1}(2)*t{1}'-p1{1}(3)*inty{1}'-p1{1}(4)*int2y{1}'...
    +p1{1}(5)*int2u{1}';

p1=cell2mat(p1);
c1=p1(3,:);
k1=p1(4,:);
m1=p1(5,:);

lb=[-Inf;-Inf;-Inf;-Inf]; %This makes c_i and k_i positive
ub=[Inf;Inf;Inf;Inf];
for i=2:N
    A{i}=[t{i}'-t{i}(1)    -inty{i}'    -int2y{i}'    int2u{i}'];
    b{i}=y{i}'-ymodel{i-1}(end);
    p{i}=lsqlin(A{i},b{i},[],[],[],[],lb,ub);

    ymodel{i}=ymodel{i-1}(end)+p{i}(1)*((t{i}'-t{i}(1)))-p{i}(2)*inty{i}'...
        -p{i}(3)*int2y{i}'+p{i}(4)*int2u{i}';
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end

pi=cell2mat(p);
ci=pi(2,:);
ki=pi(3,:);
mi=pi(4,:);

ymod=[];
for i=1:N
    ymod=[ymod;ymodel{i}];
end

c=[c1 ci];
k=[k1 ki];
m=[m1 mi];
end

```

ฟังก์ชันกรณีสองพารามิเตอร์ไม่ทราบค่า

```

function [ymod, c, k]=minimal_msd_2(U,Y,Ts,T)

tm=0:Ts:(length(U)-1)*Ts;
N=ceil(tm(end)/T);

for i=1:N
    t(i)=T*(i-1):0.02:T*(i)-0.02;
    y(i)=interp1(tm,Y,t{i});
    u(i)=interp1(tm,U,t{i});

    %1st integral
    inty{i}=cumtrapz(t{i},y{i});
    intu{i}=cumtrapz(t{i},u{i});

    %2nd integral
    int2y{i}=cumtrapz(t{i},inty{i});
    int2u{i}=cumtrapz(t{i},intu{i});
end

%First section
%This make c_i and k_i positive
lb=[-Inf;-Inf;0;0];
ub=[Inf;Inf;Inf;Inf];

A{1}=[t{1}'.^0 t{1}' -inty{1}' -int2y{1}'];
b{1}=y{1}'-int2u{1}';
p1{1}=lsqlin(A{1},b{1},[],[],[],[],lb,ub);

ymodel{1}=p1{1}(1)+p1{1}(2)*t{1}'-p1{1}(3)*inty{1}'...
-p1{1}(4)*int2y{1}'+int2u{1}';

p1=cell2mat(p1)
c1=p1(3,:);
k1=p1(4,:);

%i th section
lb=[-Inf;0;0];
ub=[Inf;Inf;Inf];

for i=2:N
    A{i}=[t{i}'-t{i}(1) -inty{i}' -int2y{i}'];
    b{i}=y{i}'-int2u{i}'-ymodel{i-1}(end);
    p{i}=lsqlin(A{i},b{i},[],[],[],[],lb,ub);

    ymodel{i}=ymodel{i-1}(end)+p{i}(1)*((t{i}'-t{i}(1)))-p{i}(2)*inty{i}'...

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        -p{i}(3)*int2y{i}'+int2u{i}';
end

pi=cell2mat(p);
ci=pi(2,:);
ki=pi(3,:);

%return value
ymod=[];
for i=1:N
    ymod=[ymod;ymodel{i}];
end

c=[c1 ci];
k=[k1 ki];

end

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Agricultural Mobile Robot Body Vibration Characterization Using Integral Based Methodology

Sungwan Boksuwan¹, Abdulhafiz Chesof¹, Napasool Wongvanich^{1*}, Sumit Panaudomsap¹

¹Department of Instrumentation and Control Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand.

e-mail: napasool.wo@kmitl.ac.th

*Corresponding Author

Abstract—This paper presents the application of integral based method for characterization of the vibration in the four-wheel agricultural mobile robot, which is designed for use in applications such as trimming, spraying and harvesting. Vibration occurs when one of the wheels does not touch the ground which reduces an effective of end effector. In order to design an effective controller, an accurate mathematical model is needed. Results show that the proposed method can simplify the system identification procedure, while yielding excellent match in comparison to the standard black box method. The proposed algorithm gave an NRMSE match of 96.8%, while the standard method yielded a 76.1% match. This match is also found to be lower when the validation data was from other experiments.

Keywords—agricultural mobile robots; vibration; integral based method; characterization

I. INTRODUCTION

The realm of agricultural field operations is typically a complex, diverse, labor intensive and crop directed. The advent of automation has seen an increasing use of mobile robots, as researchers around the globe seek to reduce the labor intensity, as well as their associated costs. Other targets of improvement also include the environmental impacts resulting from application of potentially harmful chemicals in efforts of enhancing yields. Several types of agricultural mobile robots have been developed in the literature, including fruit picking robots [1-2] and spraying robots [3-4]. Out of these prototypes, the mobile platform has by far garnered the most attention from researchers, with developments of the multi-functional abilities for weed control, data collection and spraying [5].

The four wheeled independent drive (4WID) is most popular amongst the mobile platforms, with the main advantage being maneuvering flexibility over a wide range of terrains. Traversing uneven and difficult terrains, for example, climbing steep hills requires lifting and lowering the robot to the desired position. This action typically generates vibrations, which must be mathematically modeled and controlled.

Oscillatory behavior modeling usually assumes a linear damping model, where the response is then decomposed into various modal frequencies. The common method following

this line of approach is the Prony's analysis [6-7], which is similar to the concept of Fourier Transformation, except that the exponential term is also added to the harmonics. Other approaches include the Kalman based estimations [8], frequency response [9]. Other methods also include the matrix pencil method of Hua and Sarkar [10], which is an improved version of the Prony's analysis; the distributed frequency domain optimization [11]; the second order generalized integrator (SOGI) [12-13]. The approach taken generally in the literature is to presuppose a definite complex model structure first, then fit this complex model to the data. If this initial model assumption does not work, then more complex models and observer structures are used, including finite elements.

The approach taken to analyze the vibration of the agricultural mobile robot in this work is to simply start with simple model structures first, and through the use of identification methodologies, uncover more complex dynamics as required. The paper is organized as follows: Section II gives an overview of the agricultural mobile robot design; Section III details the developed characterization methodology; Section IV illustrates the results and discussion. This paper is concluded in Section V

II. AGRICULTURAL MOBILE ROBOT ARCHITECTURE

The platform used in this research is designed with maximum maneuverability in mind to allow for efficient operation in outdoor environments. The robot has a rugged 4 wheel drive chassis with skid steering. Its body can be sectioned into three separate rotating parts, allowing for movements in the roll and yaw axes. The robot is also designed with a symmetrical orientation so that the front part and the rear part are the same. This provides an enormous flexibility in terms of maneuvering, and has the capability of climbing over obstacles and stands in rough and steep terrains, which allows it to cover places otherwise deemed difficult for other robot platforms. The robot is also equipped with an on-board computer system as well as an RF receiver system for building and compiling MATLAB codes, for conducting the control on-the-fly.

Figure 1 shows the schematic of the designed car-like robot. The robot is powered by two batteries which are thereby used to power the eight sets of motor-encoder systems designed to provide complete maneuverability of the

robot. In other words, two sets of servo motors-encoder pairs are installed on each wheel; one to provide the forward lateral movement, and one to provide the steering to achieve orientation. Two further sets of actuators are also attached to the rails to provide the torques to lift the front and the rear parts to maintain balance in steep terrains. Climbing such steep terrains requires lifting the front and rear parts of the robot, generating associated vibrations every time the robot is lifted.



Figure 1. The designed mobile robot prototype.

To investigate the vibrations associated with the lifting of the front and the rear parts of the agricultural mobile robot prototype, there is thus a need to develop a methodology suitable for characterizing the associated vibration quickly and effectively.

III. METHODOLOGY

A. Integral-Based Methodology for Characterization of One Degree of Freedom Vibrations

Consider a normalized non-homogeneous second order differential equation describing the vibration of the angle of movements defined:

$$\theta'' + c\theta' + k\theta = d(t), \quad (1)$$

where c represents the damping, and k denotes the stiffness of the spring. The function $d(t)$ on the right hand side of Equation (1) represents the displacement of the lead screw movement to the system. The function $\theta(t)$ denotes the angle of movements from the front or the rear part of the robot. To allow flexibility of the model, the damping and stiffness appearing in Equation (1) are considered time varying, and in this respect, Equation (1) can be rewritten thus:

$$\theta'' + c(t)\theta' + k(t)\theta = d(t). \quad (2)$$

In this case, $c(t)$ and $k(t)$ are assumed to be piecewise constant functions defined:

$$c(t) = \begin{cases} c_1, & T_0 < t < T_1 \\ c_2, & T_1 < t < T_2 \\ \vdots & \\ c_n, & T_{n-1} < t < T_{end} \end{cases} \quad (3)$$

$$k(t) = \begin{cases} k_1, & T_0 < t < T_1 \\ k_2, & T_1 < t < T_2 \\ \vdots & \\ k_n, & T_{n-1} < t < T_{end} \end{cases} \quad (4)$$

The intervals are also defined:

$$\Delta t = T_{i+1} - T_i, \quad i = 0, \dots, n-1 \quad (5)$$

$$T_0 = 0, \quad \Delta t = \text{user defined time interval}. \quad (6)$$

Integrating Equation (2) twice with respect to time yields:

$$\begin{aligned} \theta - \theta_i - \alpha_i(t - T_i) + c_i \int_{T_{i-1}}^t \theta(t) dt + k_i \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t \theta(t) dt dt \\ = \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t d(t) dt dt \end{aligned} \quad (7)$$

where the initial conditions are:

$$\theta_0 = \theta(0), \quad d\theta_0 = \theta'(0) \quad (8)$$

The integral based model for the angle of movements of the front and the rear parts of the robot is thus defined:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{model},i}(t) = \theta_i + \alpha_i(t - T_i) - c_i \int_{T_{i-1}}^t \theta(t) dt - k_i \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t \theta(t) dt dt \\ + \int_{T_{i-1}}^t \int_{T_{i-1}}^t d(t) dt dt, \end{aligned} \quad (9)$$

where:

$$\alpha_i = dy_i - c_{i+1}y_i \quad (10)$$

Equation (9) gives the piecewise definition of the angle of movement for the front and the rear parts. In allowing for the possibility that the measured $\theta(t)$ is subjected to some additive noise which may arise from the encoders, the mathematical definition for the angle of movement may not exactly match the true data at the joins. The direct consequence of this phenomenon is that the modeled response $\theta_{\text{model}}(t)$ described by Equation (10) could well end up being discontinuous. Figure 2 shows the scenario of this case:

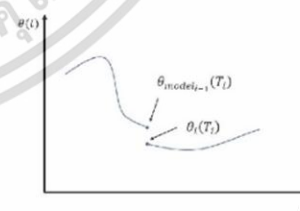


Figure 2. The discontinuity of θ_{model} .

A simple method of resolving this possible discontinuity issue is to identify the modeled responses by piece. In this light the model of θ is written as follows for the first section:

$$\theta_{\text{model},0}(t) = \theta_0 + \alpha_0(t - T_0) - c_1 \int_{T_0}^t \theta(t) dt - k_1 \int_{T_0}^t \int_{T_0}^t \theta(t) dt dt + \int_{T_0}^t \int_{T_0}^t d(t) dt dt \quad (11)$$

$$\alpha_0 \equiv \text{Equation (10) with } i = 0$$

$$\mathbf{A}_i \mathbf{p} = \mathbf{b}_i \quad (17)$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} t_i^{(1)} & -\int_{T_{i-1}}^{t_i^{(1)}} \theta(t) dt & -\int_{T_{i-1}}^{t_i^{(1)}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{(1)}} \theta(t) dt dt \\ t_i^{(2)} & -\int_{T_{i-1}}^{t_i^{(2)}} \theta(t) dt & -\int_{T_{i-1}}^{t_i^{(2)}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{(2)}} \theta(t) dt dt \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_i^{(N)} & -\int_{T_{i-1}}^{t_i^{(N)}} \theta(t) dt & -\int_{T_{i-1}}^{t_i^{(N)}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{(N)}} \theta(t) dt dt \end{bmatrix} \quad (18)$$

Setting $\theta(t) = \theta_{0,\text{data}}(t)$, $d(t) = d_{\text{data}}(t)$ for the time instants $t \in t_0^{(1)} - t_0^{(N)}$ yields the matrix equation which is written:

$$\mathbf{A}_0 \mathbf{p} = \mathbf{b}_0 \quad (12)$$

where:

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} 1 & t_0^{(1)} & -\int_{T_0}^{t_0^{(1)}} \theta_{\text{data}} dt & -\int_{T_0}^{t_0^{(1)}} \int_{T_0}^{t_0^{(1)}} \theta_{\text{data}}(t) dt dt \\ 1 & t_0^{(2)} & -\int_{T_0}^{t_0^{(2)}} \theta_{\text{data}} dt & -\int_{T_0}^{t_0^{(2)}} \int_{T_0}^{t_0^{(2)}} \theta_{\text{data}}(t) dt dt \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_0^{(n)} & -\int_{T_0}^{t_0^{(n)}} \theta_{\text{data}} dt & -\int_{T_0}^{t_0^{(n)}} \int_{T_0}^{t_0^{(n)}} \theta_{\text{data}}(t) dt dt \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{b}_0 = \begin{bmatrix} \theta_0^{(1)} - \int_{T_0}^{t_0^{(1)}} \int_{T_0}^{t_0^{(1)}} d_{\text{data}}(t) dt dt \\ \theta_0^{(2)} - \int_{T_0}^{t_0^{(2)}} \int_{T_0}^{t_0^{(2)}} d_{\text{data}}(t) dt dt \\ \vdots \\ \theta_0^{(n)} - \int_{T_0}^{t_0^{(n)}} \int_{T_0}^{t_0^{(n)}} d_{\text{data}}(t) dt dt \end{bmatrix} \quad (14)$$

The matrix equation of Equations (12) – (14) can be solved by linear least squares subjected to the following constraints:

$$c_1 > 0, \quad k_1 > 0. \quad (15)$$

This operation will now yield the damping c_1 and stiffness k_1 , along with the model to the first section of the data. The initial conditions for the second section, and in general the i th section, can thus be computed:

$$\theta_{i-1} \equiv \text{Equation (9) with } t = T_{i-1}, \quad i = 2, \dots, n \quad (16)$$

Having known the initial condition of the i th section effectively leaves only three unknowns in the model of Equation (9). Setting $\theta(t) = \theta_{i,\text{data}}(t)$, $d(t) = d_{\text{data},i}(t)$ for the time instants $t \in t_i^{(1)} - t_i^{(N)}$ will yields the set of N equations in three unknowns for the i th section:

$$\mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} \theta_i(t_i^{(1)}) - \theta_i - \int_{T_{i-1}}^{t_i^{(1)}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{(1)}} d_i(t) dt dt \\ \theta_i(t_i^{(2)}) - \theta_i - \int_{T_{i-1}}^{t_i^{(2)}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{(2)}} d_i(t) dt dt \\ \vdots \\ \theta_i(t_i^{(N)}) - \theta_i - \int_{T_{i-1}}^{t_i^{(N)}} \int_{T_{i-1}}^{t_i^{(N)}} d_i(t) dt dt \end{bmatrix} \quad (19)$$

The algorithm for identifying the damping c_i and the stiffness k_i , $i = 2, \dots, n$ solves Equations (17) – (19) by linear least squares subjected to the constraints:

$$c_i > 0, \quad k_i > 0 \quad (20)$$

The identified values damping values c_i and the stiffnesses k_i from Equations (19) and (20) can then be substituted into Equation (9) to yield the modeled response for the angle of movement $\theta_{i,\text{model}}(t)$.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A. Experimental Data Acquisition

To obtain the experimental data required to perform the vibration characterization, an IMU was fitted to measure the angle of movement of the front and the rear parts. To provide an input into the system, a voltage command from the battery was sent to the servo motor driving the lead screw movement, which provides the torques required to generate moments to lift the robot. In order to measure this torque, a class B potentiometer displacement sensor was fitted to the rails at the front and the rear parts. Displacement values being read from the sensor gives the $d(t)$ function in Equation (2). All data is saved as a .mat file and imported into MATLAB to perform computations.

B. Vibration Characterization

Figure 3(a) shows the input rail displacement signal, while Figure 3(b) depicts the vibration measurements from the IMU. Note that the integration drifts associated with the IMU has already been pre-processed with the use of linear least square in which a simple linear model was assumed. In addition, this figure only shows the response from the front part of the robot as proof-of-concept and also due to the lack of space.

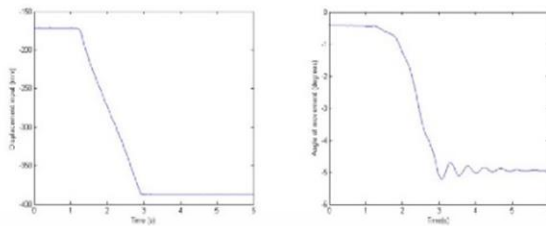


Figure 3. (a) The input rail displacement response and (b) The angle of movement for the front part of the robot.

Applying the proposed time varying algorithm with $T = 0.05$ s to the vibrational data yields the match as shown in Figure 4. It is evident that there is very little mean absolute error in the match. In fact, the mean absolute error of the match is 0.0002 degrees.

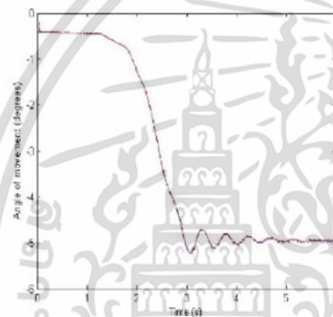


Figure 4. The responses comparison for the time varying algorithm.

Although the time varying algorithm yielded a pristine match between the modeled response against the measured data, the nature of the time varying parameters varies quite greatly due to the arbitrarily small time window of 0.05 s. In this respect, with the recording of six seconds of data shown in Figures 3 and 4, there are 120 piecewise c_i and k_i values. Designing a controller to handle such a large number of piecewise c_i and k_i values is possible, albeit tedious and somewhat quite complex. To avoid this complexity in the design of the controller, plots of c_i and k_i values against the time window number is firstly conceived as shown in Figure 5.

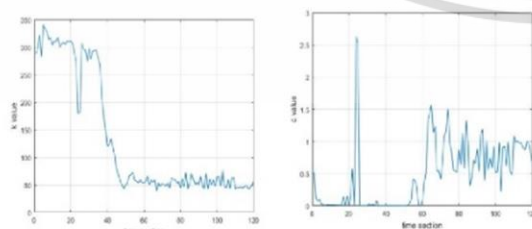


Figure 5. (a) Plot of k_i against the time section and (b) plot of c_i against the time section.

It is seen from the plots shown in Figure 5(a) that the values of identified k_i follows the data quite closely before settling down at a single k value. The identified c_i values are close to zero initially, before increasing around the point of the step change and hovering about a positive c value. A simple and obvious method of obtaining a single stiffness and damping value is to take the mean of the c_i and k_i from section 40 to section 120 when the recording ends. In symbols:

$$c = \text{mean of } c_i \text{ from sections } 60 - 120 \quad (21)$$

$$k = \text{mean of } k_i \text{ from sections } 60 - 120 \quad (22)$$

The computed values of c and k from Equations (21) and (22) are 0.809 and 54.176. These values are now used to re-simulate the response $\theta_{\text{model}}(t)$ with initial conditions taken from the measured response θ_{data} . The result of this re-simulation is shown in Figure 6.

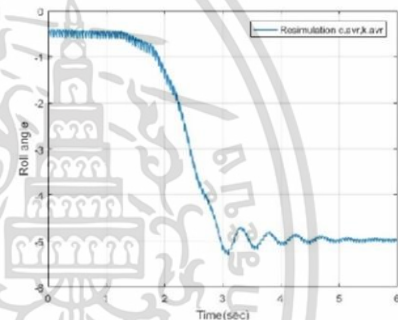


Figure 6. The re-simulated $\theta_{\text{model}}(t)$ with initial conditions taken from the measured response $\theta_{\text{data}}(t)$.

It is evident from Figure 6 that this re-simulated response matches very well against the angle of movement data. Specifically, the match is 97.1%, resulting in a root mean square error of 2.9%. This result shows that although the time varying model was not in place, the identified c and k values still yields an accurate mathematical model for the vibration of the body of the robot. Note that the time varying model has provided the flexibility that ultimately enables us to conclude with conviction, that the vibration system can be described with a linear model with sufficient accuracy. Had the system been fully non-linear, the plots of Figure 5 would have depicted a trend that can be further exploited to arrive at a specific non-linear model.

C. Comparison with the Black Box Method

One widely used method in system identification is the black-box methods. The popularity of such method has resulted in software packages such as the embedded system identification toolbox in MATLAB. In this respect the black box modeling in the embedded system identification toolbox; in particular the transfer function method is used to compare the developed method. Here the user simply has to provide a

guess of the transfer function order, without having to know the equation of motion. Figure 7 shows the identified model, along with the match to the data. It is evident from the figure that the black box method only yielded a 76.0% match between the data and the modeled response θ_{model} . This result shows that the proposed method significantly outperforms the black box method.

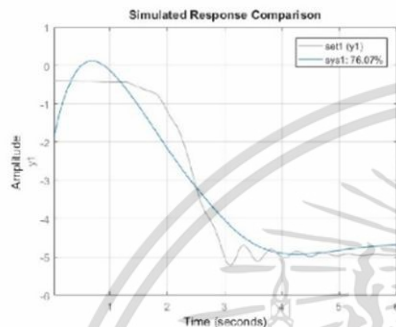


Figure 7. The responses comparison for the black box method.

V. CONCLUSION

This work has presented the integral based vibration characterization methodology for agricultural mobile robot. The robot was specifically designed in such a way that provides maximum flexibility in terms of maneuvering, and could steer in otherwise steep terrains where other types of robots have difficult access. The developed methodology begins with an assumption that the damping and stiffnesses satisfy the piecewise time varying model, that is, the damping and stiffness are assumed to be constant over an arbitrary chosen time. To resolve the continuity issue resulting from the possibility of operating with noise-corrupted data, the initial conditions for the next section is iteratively computed.

Application of the time varying model on the measured angle of movement responses revealed that the identified c_i and k_i closely follows the data, and settles down at a single value after the step change. The values of c_i and k_i were then averaged to result in a single c and k . Re-simulation of these averaged damping and stiffness values yielded a 2.9% root mean square error. This error is hugely in contrast to that provided by the black box method, which yielded a 24% root mean square error.

There are quite a number of methods for analyzing a one degree of freedom vibrational problem. Most of these methods require a huge number of assumptions to be placed on the mathematical model, some of these assumptions placed on the model may not even exist in the real world system. As a consequence the resulting model may well mask the underlying dynamics from being uncovered. The approach taken in this paper is to start with simple but flexible formulation that allows for the use of identification techniques to uncover the nature of the underlying dynamics. This technique saves time and cost of experiments in developing the controller to combat the vibration of the agricultural robot.

Future works include controller designs to mitigate the vibrations as well as other nonlinearities such as the dead zones, along the robot wheels.

REFERENCES

- [1] Y.S. Zhao, L. Gong, Y.X. Huang and C.L. Liu, "Robust tomato recognition for robotic harvesting using feature images fusion", *Sensors*, 2016, 173.
- [2] A. Silwal, *et al.* "Design, integration and field evaluation of a robotic apple harvester", *J. Field. Robot.* 34(6). 2017. pp.1140-1159.
- [3] R. Oberti *et al.* "Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot". *Biosyst. Eng.* 146. 2016. pp.203-215.
- [4] G. Zaidner and A. Shapiro, "A novel data fusion algorithm for low-cost localization and navigation of autonomous vineyard sprayer robots", *Biosyst. Eng.* 146. 2016. pp.133-148.
- [5] D. Cousins, "Bosch Bonirob robot set to make field work easier for farmers." *Farmers Weekly*. 2015. 1052, 7.
- [6] R. Kumaresan and D. Tufts, "Estimating the parameters of exponentially damped sinusoids and pole zero modelling in noise", *IEEE Trans. Acoust. Speech., Signal Process.* 1982. 30. pp.833-840.
- [7] P. Barone, "Some practical remarks on the extended prony's method of spectrum analysis", *Proc. IEEE* 1988 76. pp.716-723.
- [8] R.A. Wiltshire *et al.* "A kalman filtering approach to rapidly detecting modal changes in power systems", *IEEE. Trans. Power Syst.* 2007. 22. pp.1698-1706.
- [9] A. Burlon, G. Fella and F. Arena, "Exact frequency response analysis of axially loaded beams with viscoelastic dampers", *Int. J. Mech. Sci.* 2016. Vol. 115-116. pp.370-384.
- [10] Y. Hua and T.K. Sarkar, "Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise." *IEEE Trans. Acoust. Speech. Signal.* 1990. 38(5). pp.814-824.
- [11] J. Ning, X. Pan and V. Venkatasubramanian, "Oscillation modal analysis from ambient synchrophasor data using distributed frequency domain optimization", *IEEE. Trans. Power. Syst.* Vol 28. No.2. 2013. pp.1960-1968.
- [12] M. Karimi-Ghartemani *et al.* "Addressing DC component in PLL and notch filter algorithm", *IEEE. Trans. Power. Electron.* 2012. 27(1). Pp.78-86.
- [13] M. Mansouri *et al.* "Estimation of Electromechanical Oscillations From Phasor Measurements Using Second-Order Generalized Integrator", *IEEE. Trans. Instru. Meas.* Vol. 64. No. 4. 2014. pp.943-950.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายอับดุลฮาฟิซ เจ๊ะโซ๊ะ
วัน/เดือน/ปีเกิด	21 ตุลาคม 2536
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2559 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ (เกียรตินิยมอันดับ2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2.การออกแบบระบบควบคุม

ผลงานวิจัย

- [1] Boksuwan S., **Chesof A.**, Wongvanich N. and Panaudomsap S. "Agricultural Mobile Robot Body Vibration Characterization Using Integral Based Methodology" **2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Beijing, China, 2019.** pp. 157-161
- [2] **Chesof A.**, Boksuwan S., Panaudomsap S. and Cheypoca T. "Evaluation of explicit model predictive temperature control for on-off air conditioner," **2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeju, 2017.** pp. 621-624
- [3] Boksuwan S., Kanamori C., Aoyama H., Cheypoca T., Panaudomsap S., Anuntahirunrat K., **Chesof A.** and Siritechavong T. "High Performance Periodical Paths Tracking of Two-dimensional Handheld Micromanipulator using Explicit Model Predictive Control." **Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE '17), 2017.** pp. 274-278