

การศึกษาการระบุเอกลักษณ์ของระบบและการออกแบบตัวควบคุม
สำหรับระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน
A study of system identification and controller design
for ball and beam control system



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A study of system identification and controller design
for ball and beam control system



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2565
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์


.....

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การศึกษาการระบุเอกลักษณ์ของระบบและการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน

A study of system identification and controller design for ball and beam control system

นักศึกษาผู้จัดทำ ไบตอง ทองสกุล รหัสนักศึกษา 62010517
ปัญญคม เทิบจันทิก รหัสนักศึกษา 62010546
พรภวิชัย จิตต์กำแหง รหัสนักศึกษา 62010593

ปริญญา วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.นภศูล วงษ์วานิช	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาการระบุเอกลักษณ์ของระบบและการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน		
	A study of system identification and controller design for ball and beam control system		
นักศึกษาผู้จัดทำ	ใบตอง	ทองสกุล	รหัสนักศึกษา 62010517
	ปัญญาคม	เทิบจันทิก	รหัสนักศึกษา 62010546
	พรภวิชัย	จิตต์กำแหง	รหัสนักศึกษา 62010593
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.นภศูล วงษ์วานิช		
ปีการศึกษา	2565		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการระบุเอกลักษณ์ของระบบและการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน โดยจะทำการเปรียบเทียบ สมรรถนะของตัวควบคุมเพื่อหาตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบที่สุด เริ่มด้วยการการระบุเอกลักษณ์ของระบบ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์ค่าที่ได้จากการทดลองเพื่อหาโมเดลของระบบ ซึ่งเลือกใช้โมเดลแบบ ARMAX พบว่าสามารถหาแบบจำลองระบบที่มีความใกล้เคียงกับระบบจริงอยู่ที่ 94.24 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมแบบสไลด์ดิง รวมถึงการใช้ฟังก์ชันอิมิตัวในการลด chattering จากการทดลองปรับเปลี่ยน reaching phase พบว่าส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อีกทั้งพบว่า reaching phase แบบ $u = -|s|^{\beta} \cdot sat(s)$ ทำให้การควบคุมที่จุดกลางของคานมีประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถใช้ในการลด overshoot ของระบบได้ เมื่อเทียบผลตอบสนองที่ setpoint อื่นๆ การควบคุมโดยใช้ฟังก์ชันสไลด์ดิงมีผลการควบคุมให้ระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ไวกว่า

Thesis Title	A study of system identification and controller design for ball and beam control system	
Authors	Ms. Baitong	Thongsakul
	Mr. Pannakhom	Therbjanthuek
	Mr. Ponpawit	Jitkhumhaeng
Thesis Advistor	Assit.Prof.Dr. Napasool Wongvanich	
Year	2565	

ABSTRACT

The research on the system identity and controller design for the ball position control system on the beam is the focus of this thesis. The controller that best suits the system will be identified based on comparisons of the performance of the available controllers. The first step in system identification is to use the MATLAB program to examine the experimental values and discover the model of the system. To create a sliding controller, it was discovered that the ARMAX model could simulate a system that was 94.24 percent similar to the genuine system. The experimental adjustment of the reaching phase found that the system's reaction has improved efficiency when the saturation function is used to prevent chattering. Additionally, it was discovered that fuzzy sliding, as opposed to reaching phase as $u = -|s|(\text{sat}(s))$, only provides the most effective control at the beam's center. It is advisable to use $u = -|s|(\text{sat}(s))$ to exert control.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยคำปรึกษา คำแนะนำ ความเอาใจใส่อย่างดี และแนะแนวทางในการแก้ปัญหาและการดำเนินชีวิตจาก ดร.นภศูล วงษ์วานิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาานิพนธ์ คณะผู้จัดทำซาบซึ่งในความอนุเคราะห์จากอาจารย์เป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอกราบขอบพระคุณคณะอาจารย์ สาขาวิชาการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้แก่คณะผู้จัดทำ และให้คำปรึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้แก่คณะผู้จัดทำ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษาและคอยช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดจนการให้กำลังใจในการทำงานจนงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของคณะผู้จัดทำ ที่คอยให้กำลังใจ คอยสนับสนุน คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาต่าง ๆ ซึ่งทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีประโยชน์และคุณค่าของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบแก่บิดามารดา และคณะอาจารย์ภาควิศวกรรมการวัดคุมตลอดจนคณะอาจารย์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปริญญาโท.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญาโท.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์.....	3
2.2 การหาแบบจำลองโดยวิธีการระบุคุณลักษณะของระบบ.....	4
2.2.1 การถดถอยเชิงเส้น.....	9
2.3 การควบคุมแบบสไลด์ดิง.....	10
2.4 ฟังก์ชันลาปูนอฟ.....	16
2.4.1 สมการฟังก์ชันลาปูนอฟ.....	16
2.4.2 ทฤษฎีบทความเสถียรของลาปูนอฟ.....	17
2.5 การควบคุมแบบฟuzzyสไลด์ดิง.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	22
3.1 แผนผังการดำเนินงาน.....	22
3.2 Hardware.....	24
3.2.1 ESP32.....	24
3.2.2 16-Channel 12-bit PWM Servo shield.....	25
3.2.3 Power Supply Switching 5V 5A.....	25
3.2.4 TF-Luna LiDAR Module - Short-Range Distance Sensor.....	25
3.2.5 MG996R Servo Motor 0-180°.....	26
3.3 การหาเอกลักษณ์ระบบ.....	27
3.3.1 การออกแบบสัญญาณอินพุตในการระบุเอกลักษณ์ของระบบ.....	27
3.3.2 การออกแบบโมเดลของระบบแบบ ARMAX.....	28
3.4 การออกแบบตัวควบคุมสไลด์ดิงโหมด.....	31
3.4.1 โครงสร้างการควบคุมแบบสไลด์ดิง.....	31
3.4.2 การออกแบบเส้นสไลด์ดิง $S(x)$	31
3.4.3 การกำหนดเงื่อนไขของจรรยาบรรณ.....	32
3.4.4 เกณฑ์ความเสถียรของลาปูนอฟ.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	39
4.1 ผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งลูกบอลเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = -k \cdot \text{sat}(s)$	39
4.1.1 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = -k \cdot \text{sat}(s)$ ที่ setpoint = 20 cm.....	39
4.1.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = -k \cdot \text{sat}(s)$ ที่ setpoint = 30 cm.....	42
4.1.3 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = -k \cdot \text{sat}(s)$ ที่ setpoint = 30 cm.....	44
4.2 ผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งลูกบอลเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = - s ^{\beta} \cdot \text{sat}(s)$	46
4.2.1 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = - s ^{\beta} \cdot \text{sat}(s)$ ที่ setpoint = 20 cm....	46
4.2.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = - s ^{\beta} \cdot \text{sat}(s)$ ที่ setpoint = 30 cm....	49
4.2.3 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = - s ^{\beta} \cdot \text{sat}(s)$ ที่ setpoint = 40 cm....	51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งลูกบอลเมื่อใช้ตัวควบคุมพีชชีสไลด์ดิง.....	53
4.3.1 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมพีชชีสไลด์ดิงและที่จุด setpoint = 20 cm.....	53
4.3.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมพีชชีสไลด์ดิงและที่จุด setpoint = 30 cm.....	55
4.3.3 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมพีชชีสไลด์ดิงและที่จุด setpoint = 40 cm.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	59
5.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	59
บรรณานุกรม.....	60

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบพลวัตอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรเอาต์พุตกับตัวแปรอินพุต.....	3
2.2 กระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการระบุคุณลักษณะ.....	4
2.3 โครงสร้างของแบบจำลองพลวัตเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	5
2.4 โครงสร้างของแบบจำลองเออาร์เอ็กซ์.....	7
2.5 โครงสร้างของแบบจำลองเออาร์แมก.....	8
2.6 การควบคุมแบบสไลด์ดิง.....	10
2.7 ระบบควบคุมแบบโครงสร้างผืนแปรของระบบอันดับสอง.....	10
2.8 (ก) ผลตอบสนองบน Phase-Plane ของระบบควบคุมตามสมการที่ (2.1) เมื่อ $u = 5$ (ข) ผลตอบสนองบน Phase-Plane ของระบบควบคุมตามสมการที่ (2.1) เมื่อ $u = 1/5$ (ค) ผลตอบสนองบน Phase-Plane ของระบบควบคุมตามสมการที่ (2.1) เมื่อ $u = 1/5$ ถ้า $x_1x_2 < 0$ และ $u = 5$ ถ้า $x_1x_2 > 0$	11
2.9 วิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิงของระบบอันดับสอง.....	12
2.10 ผลตอบสนองของระบบควบคุมตามรูปที่ 2.14 ด้วยสัญญาณควบคุมตามสมการที่ (2.23).....	13
2.11 ทางเดินของตัวแปรสถานะที่กำหนดตามสมการที่ (2.24).....	14
2.12 ผลตอบสนองของระบบตามรูปที่ 2.14 โดยใช้เงื่อนไขตัวควบคุมตามสมการที่ (2.25).....	15
2.13 การสั่น (Chattering) ของระบบควบคุมตามรูปที่ 2.14.....	15
2.14 วิธีระบบสองตัวแปร.....	17
2.15 วิธีเคลื่อนที่เข้าสู่จุดกำเนิด.....	18
2.16 ตารางระดับการเป็นสมาชิกของฟัซซี.....	19
2.17 กฎพื้นฐานสำหรับฟัซซี.....	20
2.18 Mapping ระหว่างตัวควบคุมสไลด์ดิงโหมดและ fuzzy hyperplanes.....	20
2.19 ตัวควบคุมฟัซซีสไลด์ดิง.....	21
3.1 ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน.....	24
3.2 ESP32.....	24
3.3 16-Channel 12-bit PWM Servo shield.....	25
3.4 Power Supply Switching 5V 5A.....	25
3.5 TF-Luna LiDAR Module - Short-Range Distance Sensor.....	26
3.6 MG996R Servo Motor 0-180°.....	26
3.7 สัญญาณรูปคลื่นชานน์.....	27

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุต (ระยะของลูกบอลและมุมของคาน).....	27
3.9 การออกแบบโมเดลของระบบแบบ ARMAX.....	28
3.10 พารามิเตอร์การออกแบบโมเดล ARMAX ของระบบที่ 1.....	29
2.11 พารามิเตอร์การออกแบบโมเดล ARMAX ของระบบที่ 2.....	29
3.12 State space model ของระบบลูกบอลบนคาน.....	30
3.13 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่าง ระบบจริงกับระบบที่ทำการประมาณขึ้น.....	30
3.14 ผิวหน้าสไลด์ดิ่ง.....	32
3.15 Saturation.....	33
3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผิวหน้าสไลด์ดิ่งและสัญญาณควบคุม	34
3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4.....	34
3.18 กราฟแสดงการออกแบบ membership	35
3.19 กราฟแสดง control surface	35
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ่งและสัญญาณควบคุม (sp = 20 cm.).....	39
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 (sp = 20 cm.).....	40
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา (sp = 20 cm.).....	40
4.4 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 20 cm.).....	41
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ่งและสัญญาณควบคุม (sp = 30 cm.).....	42
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 (sp = 30 cm.).....	42
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา (sp = 30 cm.).....	43
4.8 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 30 cm.).....	43
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ่งและสัญญาณควบคุม (sp = 40 cm.).....	44
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 (sp = 30 cm.).....	44
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา (sp = 40 cm.).....	45
4.12 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 40 cm.).....	45
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ่งและสัญญาณควบคุม (sp = 20 cm.).....	46
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 (sp = 20 cm.).....	47
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา (sp = 20 cm.).....	47
4.16 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 20 cm.).....	48
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ่งและสัญญาณควบคุม (sp = 30 cm.).....	49

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 ($sp = 30 \text{ cm.}$).....	49
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา ($sp = 30 \text{ cm.}$).....	50
4.20 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ ($sp = 30 \text{ cm.}$).....	50
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ่งและสัญญาณควบคุม ($sp = 40 \text{ cm.}$).....	51
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 ($sp = 40 \text{ cm.}$).....	51
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา ($sp = 40 \text{ cm.}$).....	52
4.24 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ ($sp = 40 \text{ cm.}$).....	52
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ่งและสัญญาณควบคุม ($sp = 20 \text{ cm.}$).....	53
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 ($sp = 20 \text{ cm.}$).....	53
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา ($sp = 20 \text{ cm.}$).....	54
4.28 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ ($sp = 20 \text{ cm.}$).....	54
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ่งและสัญญาณควบคุม ($sp = 30 \text{ cm.}$).....	55
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 ($sp = 30 \text{ cm.}$).....	55
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา ($sp = 30 \text{ cm.}$).....	56
4.32 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ ($sp = 30 \text{ cm.}$).....	56
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ่งและสัญญาณควบคุม ($sp = 40 \text{ cm.}$).....	57
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 ($sp = 40 \text{ cm.}$).....	57
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา ($sp = 40 \text{ cm.}$).....	58
4.36 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ ($sp = 40 \text{ cm.}$).....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

ระบบลูกบอลบนคาน (Ball and Beam System) นิยมใช้งานเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบควบคุม เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความเสถียรภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งระบบลูกบอลบนคานเป็นระบบแบบไดนามิกที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง เป็นการบูรณาการองค์ความรู้ด้านวิศวกรรมหลายสาขาประกอบด้วยวิศวกรรมเครื่องกล, วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และระบบควบคุม ทำให้เกิดมุมมองใหม่ทางด้านวิศวกรรมเกี่ยวกับระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรมและสามารถแก้ปัญหาทางวิศวกรรมโดยวิธีอื่นๆ เพื่อต่อยอดและเสริมสร้างองค์ความรู้ให้เกิดทางด้านอุตสาหกรรมต่อไป

ในการศึกษานี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์โดยวิธีการระบุเอกลักษณ์และการออกแบบตัวควบคุมของระบบลูกบอลบนคาน ทำการหาโมเดลของ โดยใช้โปรแกรม MATLAB จากการทำการทดลองเก็บค่าเอาต์พุต จากการป้อนอินพุตที่ถูกออกแบบขึ้น นำข้อมูลที่บันทึกได้ไปหาโมเดลของระบบลูกบอลบนคาน เมื่อได้โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับระบบ จึงนำไปออกแบบตัวควบคุมซึ่งเป็นตัวควบคุมสไลด์ดิงโหมต ให้ระบบมีเสถียรภาพและมีผลตอบสนองที่เหมาะสมตามเป้าหมายที่สุด ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมระบบลูกบอลบนคาน เพื่อออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

การศึกษาระบุเอกลักษณ์ของระบบและการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน โดยทำการเก็บข้อมูลจากการทดลองและหาโมเดลของระบบด้วยวิธี การระบุเอกลักษณ์ของระบบ ออกแบบระบบเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการโดยการทดลองจะเปรียบเทียบสมรรถนะตัวควบคุมสไลด์ดิงโหมตที่มี reaching phase ต่างกันออกไปเพื่อให้ได้กระบวนการที่เหมาะสมและเสถียรที่สุดอาศัยความรู้ความเข้าใจในกระบวนการ และทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิคต่างๆ

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

1. ศึกษาการออกแบบโมเดลของระบบโดยการระบุเอกลักษณ์ของระบบของระบบลูกบอลบนคาน
2. ศึกษาการออกแบบตัวควบคุมสไลด์ดิงโหมตของระบบลูกบอลบนคาน

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาอุปกรณ์ที่ใช้สร้างระบบลูกบอลบนคาน
2. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB และ Simulink
3. ศึกษาขั้นตอนวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ
4. ศึกษาการออกแบบระบบควบคุมด้วยการควบคุมสไลด์ดิงโหมต
5. ศึกษาการเขียนโปรแกรมควบคุมและการ implement บน microcontroller

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

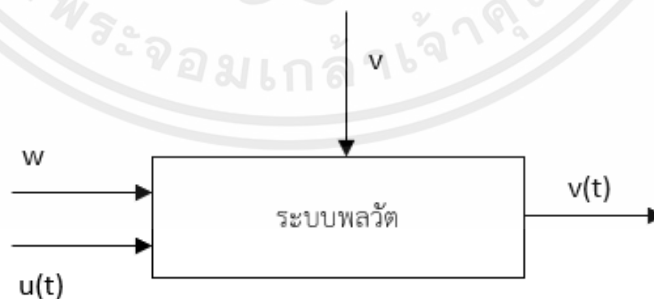
1. เข้าใจถึงกระบวนการทำงานของระบบลูกบอลบนคาน
2. สามารถสร้างโมเดลของระบบจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ
3. สามารถออกแบบควบคุมด้วยการควบคุมสไลด์ดิงโหมต
4. สามารถ implement ตัวควบคุมลง microcontroller

บทที่ 2 ทฤษฎี

บทนี้จะกล่าวถึงความสำคัญของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทฤษฎีและหลักการที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการระบุคุณลักษณะระบบ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างแบบจำลองรูปแบบต่างๆ ที่ใช้ในการระบุคุณลักษณะระบบ การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต รูปที่ 2.1 เปรียบเสมือนตัวแทนของระบบที่อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ของระบบ แบบจำลองดังกล่าวมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ การออกแบบระบบควบคุม ซึ่งแบบจำลองพลวัตอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ (Differential Equations) สามารถหาได้โดยอาศัยกฎทางฟิสิกส์พื้นฐาน ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือได้สมการอนุพันธ์ที่สมบูรณ์เหมาะสมต่อการวิเคราะห์และทำความเข้าใจระบบแต่ก็มักจะไม่เป็นเชิงเส้น ไม่เหมาะกับการออกแบบตัวควบคุม อีกวิธีหนึ่งคืออาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดลองแล้วนำมาวิเคราะห์เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์ วิธีนี้เรียกว่า การระบุคุณลักษณะระบบ วิธีนี้สมการอนุพันธ์ที่ได้จะเหมาะกับการนำไปออกแบบระบบควบคุมเพราะสามารถสร้างแบบจำลองเฉพาะช่วงหรือเฉพาะจุดให้มีความเป็นเชิงเส้น



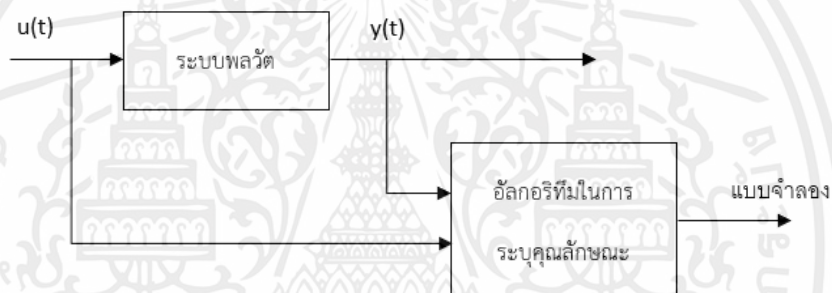
รูปที่ 2.1 ระบบพลวัตอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรเอาต์พุต $y(t)$ กับตัวแปรอินพุตทั้งอินพุตที่ควบคุมได้ $u(t)$, w และอินพุตที่ไม่สามารถควบคุมได้ v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.2 การหาแบบจำลองโดยวิธีการระบุคุณลักษณะของระบบ

การระบุคุณลักษณะระบบเป็นกระบวนการในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยการใช้ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตระบบโดยการป้อนสัญญาณอินพุต $u(t)$ ตามรูปที่ 2.2 ให้กับระบบ และวัดสัญญาณเอาต์พุต $y(t)$ ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.2 กระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการระบุคุณลักษณะ

การระบุคุณลักษณะของระบบสามารถจำแนกตามโครงสร้างของแบบจำลองที่จะนำมาอธิบายระบบ แบ่งได้ 2 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองชนิดกำหนดโครงสร้าง (Grey Box) เป็นการสร้างแบบจำลองโดยหาค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ทราบโครงสร้างของระบบบางส่วน หรือสามารถเขียนสมการอนุพันธ์แทนระบบเพียงแต่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ ซึ่งวิศวกรจำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบการทดลอง เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ต่อไป อนึ่งการสร้างแบบจำลองแบบกำหนดโครงสร้างนี้ จะใช้ได้ดีเมื่อทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางคณิตศาสตร์ ทราบถึงข้อจำกัดของแบบจำลอง และสามารถออกแบบการทดลองเพื่อบรรลุเงื่อนไขของข้อจำกัดเหล่านั้น

2. แบบจำลองชนิดไร้โครงสร้าง เป็นวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางพลศาสตร์ โดยใช้ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบโดยที่ไม่ทราบโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ของระบบนั้น อาศัยการปรับข้อมูล โดยวิธีการนี้วิศวกรจะสร้างโครงสร้างทางคณิตศาสตร์แบบใด ๆ ก็ตามที่มีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูง ตัวแบบจำลองที่สร้างมานั้นไม่ได้เกิดจากการอาศัยหลักการทางฟิสิกส์เพื่อสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลอง แต่เน้นการปรับแบบจำลองให้ตรงกับข้อมูลที่สุด ซึ่งวิธีการนี้อาจจะทำให้ได้ตัวแบบจำลองที่ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพได้

ขั้นตอนการระบุคุณลักษณะของระบบ ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. วัดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบ เป็นข้อมูลในโดเมนเวลาหรือความถี่ ความแม่นยำของแบบจำลองจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของการวัดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบ

2. กำหนดโครงสร้างของแบบจำลอง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตซึ่งจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ในการเลือกโครงสร้างจำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์และความเข้าใจในการเลือก

3. เลือกวิธีการประมาณสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า วิธีที่นิยมใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์คือ การประมาณด้วยวิธีความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด

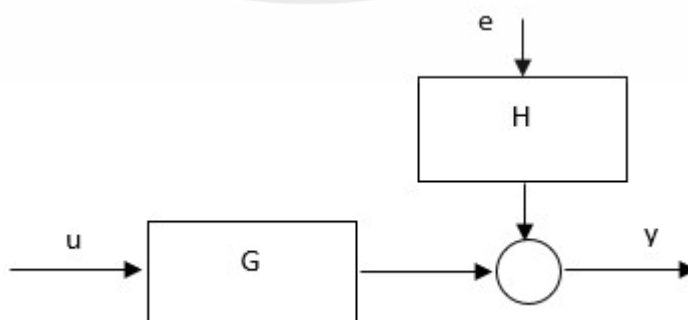
4. ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยการวัดความแตกต่างระหว่างการตอบสนองของแบบจำลองและการตอบสนองของระบบจริง

5. หากตัวแบบจำลองนั้นยังไม่ถูกต้องเพียงพอ ต้องปรับแก้แบบจำลอง ให้สอดคล้องกับข้อมูลมากยิ่งขึ้น

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตในกรณีไร้โครงสร้าง การเลือกโครงสร้างเป็นหนึ่งในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองที่ต้องอาศัยการคาดเดาจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวัด ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์และความเข้าใจของวิศวกรผู้สร้างแบบจำลอง

โครงสร้างของแบบจำลองพลวัตเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะประกอบด้วยองค์ประกอบพลวัตสองส่วนด้วยกันตามรูปที่ 2.3 องค์ประกอบส่วนแรก G ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุต u กับเอาต์พุตและองค์ประกอบส่วนที่สอง H ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนจากภายนอกต่อ e สัญญาณเอาต์พุต y ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการที่ 2.1

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



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแบบจำลองพลวัตเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 $A(q)$ ส่วนที่สองเรียกว่า ส่วนของตัวแปรภายนอก (Exogeneous Variable) โดยที่ n_b คือ อันดับของพหุนามอินพุต $B(q)$ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างอินพุต $y(t)$ และเอาต์พุต $u(t)$ ดังสมการที่ 2.2

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

กำหนดให้

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \quad (2.3)$$

และ

$$B(q) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b} \quad (2.4)$$

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

$$G(q) = \frac{B(q)}{A(q)} = \frac{b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b}}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a}} \quad (2.5)$$

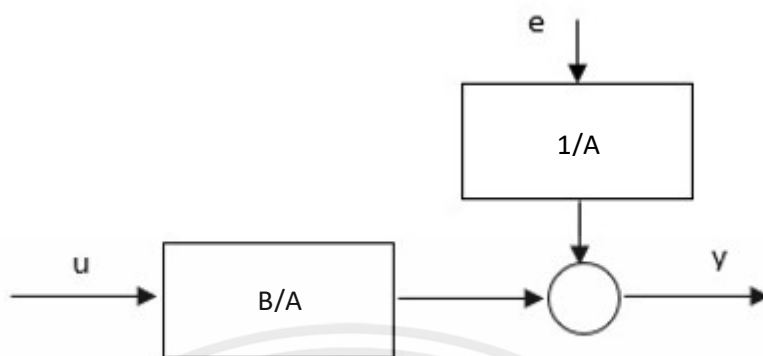
และ

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

แทนสมการที่ 2.5 และ 2.6 ในสมการที่ 2.1 จะได้

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

รูป 2.9 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำลองตามสมการ $y(t)$ ซึ่งโครงสร้างแบบจำลองดังกล่าวเรียกว่า โครงสร้างแบบเออาร์เอ็กซ์



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแบบจำลองเออาร์เอ็กซ์

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

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

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 $C(q)$ จากความสัมพันธ์ตามสมการ สามารถจัดรูปได้ดังนี้

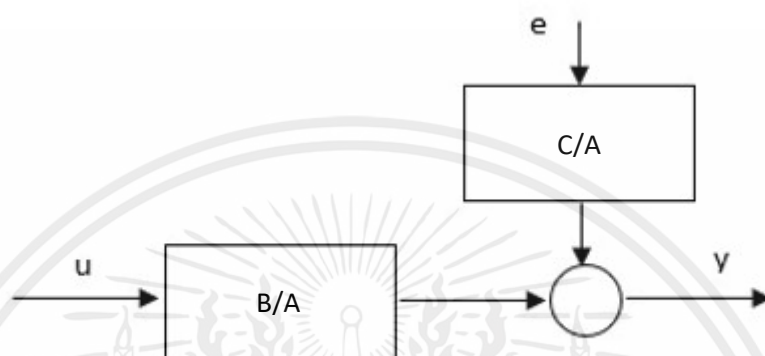
$$\begin{aligned} H(q) &= \frac{C(q)}{A(q)} \\ &= \frac{1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c}}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

แทนค่าในสมการ $H(q)$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

รูป 2.10 แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนแบบจำลองตามสมการ $y(t)$ ซึ่งโครงสร้างแบบจำลองดังกล่าวเรียกว่า โครงสร้างแบบเออาร์แมก



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของแบบจำลองเออาร์แมก

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

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

โดยสร้างของแบบจำลองตามสมการ $Y(s)$ เป็นโครงสร้างสำหรับการอธิบายระบบที่มีความต่อเนื่องทางเวลา ในกรณีการนำเสนอระบบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาโครงสร้างของแบบจำลองจะมีโครงสร้างตามสมการดังนี้

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

เมื่อ

$$\text{num}(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots \quad (2.14)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

หลังจากเลือกโครงสร้างของแบบจำลองแล้วสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นลำดับต่อไปคือวิธีการคำนวณพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าของแบบจำลอง ซึ่งมีวิธีการคำนวณพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจะเริ่มจากการจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบสมการการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) หลังจากนั้นคำนวณพารามิเตอร์ด้วยการประมาณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

2.2.1 การถดถอยเชิงเส้น

การถดถอยเชิงเส้นคือความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามหรือผลตอบสนอง (Response) กับตัวแปรทำนาย (Predictor Variable) โดยเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น พิจารณาตั้งสมการ

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

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

$$\lambda = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n \quad b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_{u_b}] \quad (2.18)$$

สมการการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ค่าของ $y(t)$ ในสมการเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยการใช้ข้อมูลในอดีตที่ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ λ จะกำหนดค่าที่ได้จากการคำนวณนี้เป็นค่าทำนาย $\hat{y}(t)$

วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) เป็นวิธีสำหรับการหาค่าที่เป็นไปได้มากที่สุดของตัวแปร โดยที่ค่าที่เป็นไปได้มากที่สุดของตัวแปรจะทำให้ค่าของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด

กำหนดให้ค่าความผิดพลาดระหว่างข้อมูลเอาต์พุตจากการวัดและเอาต์พุตจากการคาดการณ์เป็นไปตั้งสมการต่อไปนี้

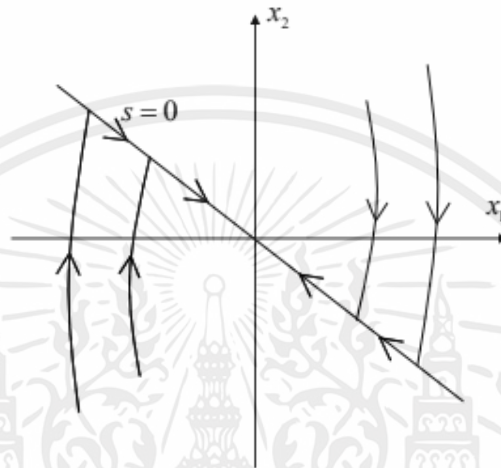
$$\varepsilon = Y - \hat{Y} = Y - \Phi \hat{X} \quad (2.19)$$

โดยที่ $Y \in R^n$, $\hat{X} \in R^m$, $\Phi \in R^{n \times m}$ และ $n > m$ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

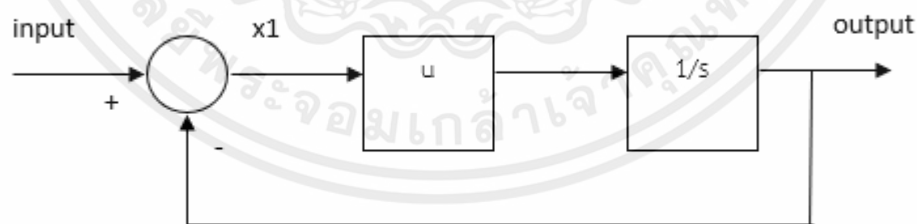
2.3 การควบคุมแบบสไลด์ดิง

เป็นเทคนิคการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้านความแม่นยำ ความทนทาน การปรับแต่งและการใช้งานที่ง่าย การออกแบบจะมีสองส่วนคือ ส่วนแรกคือการออกแบบผิวหน้าสไลด์ดิง และส่วนที่สองออกแบบตัวควบคุมให้วิถีของสถานะ เคลื่อนที่ไปยัง ผิวหน้าสไลด์ดิง และคงสถานะนั้นไว้ เมื่อสถานะตกอยู่ในผิวหน้าสไลด์ดิงวิธีจะถูกขับเคลื่อนเข้าสู่จุดศูนย์กลางทำให้ $error = 0$



รูปที่ 2.6 การควบคุมแบบสไลด์ดิง [5]

หลักการควบคุมแบบโครงสร้างผันแปร คือการควบคุมการเปลี่ยนโครงสร้างของสัญญาณควบคุมหรือระบบควบคุม แล้วส่งผลให้สถานะของระบบเปลี่ยนแปลงตามความต้องการ เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ สามารถอธิบายเป็นตัวอย่างเพิ่มเติมได้จากระบบควบคุมลูปปิดตามรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมแบบโครงสร้างผันแปรของระบบอันดับสอง

จากรูปที่ 2.12 สามารถเขียนระบบสมการสถานะ (State equation system) ตามสมการที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = -ux_1 \quad (2.20)$$

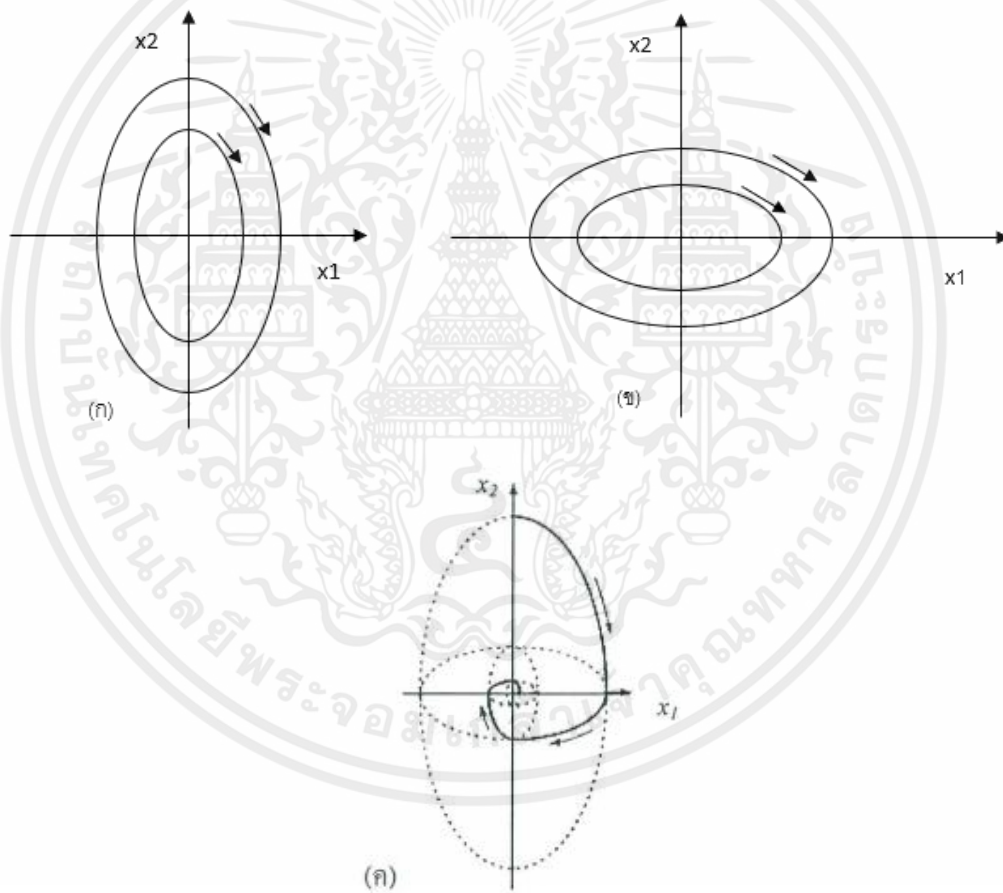
x_1 คือ ค่าผิดพลาด

u คือ สัญญาณควบคุม

x_2 คือ อนุพันธ์ของค่าผิดพลาด

เมื่อพิจารณาระบบสมการตามสมการที่ 2.20 แล้ว กำหนดสัญญาณควบคุม u เป็นสองโครงสร้างตามเงื่อนไขในสมการที่ 2.21 เพื่อให้ระบบควบคุมลูปปิดตามรูปที่ 2.12 มีเสถียรภาพที่จุดกำเนิดบน Phase-Plane จากการสับเปลี่ยนโครงสร้างดังกล่าว สามารถอธิบายได้โดยรูปที่ 2.13

$$u = 1/5 \text{ ถ้า } x_1x_2 < 0 \text{ และ } u = 5 \text{ ถ้า } x_1x_2 > 0 \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.8 (ก) ผลตอบสนองบน Phase-Plane ของระบบควบคุมตามสมการที่ (2.1) เมื่อ $u = 5$

(ข) ผลตอบสนองบน Phase-Plane ของระบบควบคุมตามสมการที่ (2.1) เมื่อ $u = 1/5$

(ค) ผลตอบสนองบน Phase-Plane ของระบบควบคุมตามสมการที่ (2.1) เมื่อ $u = 1/5$

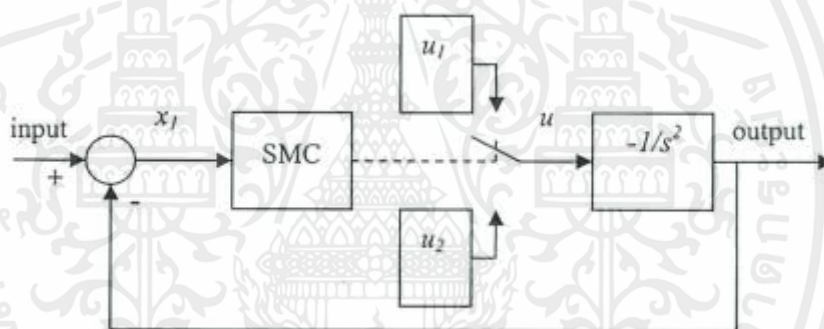
ถ้า $x_1x_2 < 0$ และ $u = 5$ ถ้า $x_1x_2 > 0$ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.13 แสดงผลตอบสนองของการควบคุมจากการสับเปลี่ยนโครงสร้างตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ทำให้ทางเดินของตัวแปรสถานะของระบบเข้าหาจุดกำเนิดตามทางเดินของสองโครงสร้างที่สลับไปมา ทำให้ระบบมีเสถียรภาพได้ แต่ถ้าระบบไม่มีการสับเปลี่ยนโครงสร้าง ระบบมีการ Oscillation ไม่มีเสถียรภาพที่จุดกำเนิดตามรูปที่ 2.13 (ก) และ (ข)

ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการแสดงถึงหลักการควบคุมแบบโครงสร้างผันแปร ซึ่งจะนำไปสู่ลักษณะพิเศษของการควบคุมแบบนี้ที่เรียกว่า วิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิ่งต่อไป

วิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิ่ง มีลักษณะเหมือนกับการควบคุมแบบโครงสร้างผันแปรเพียงแต่เพิ่มการกำหนดทางเดินของตัวแปรสถานะ (เรียกว่า เส้นสไลด์ หรือ พื้นผิวสไลด์ดิ่ง : Sliding Line or ผิวหน้าสไลด์ดิ่ง : $S(x)$) ดังนั้นการสับเปลี่ยนโครงสร้างของระบบควบคุมจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบบน Phase-Plane มีการสไลด์ไปตามทางเดินที่กำหนดไว้ จึงเรียกว่า วิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิ่ง สามารถอธิบายเป็นตัวอย่างเพิ่มเติมได้จากระบบควบคุมตามรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.9 วิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิ่งของระบบอันดับสอง [7]

จากรูปที่ 2.14 สามารถเขียนเป็นระบบสมการสถานะได้ตามสมการที่ (2.22)

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = u \quad (2.22)$$

x_1 คือ ค่าผิดพลาด

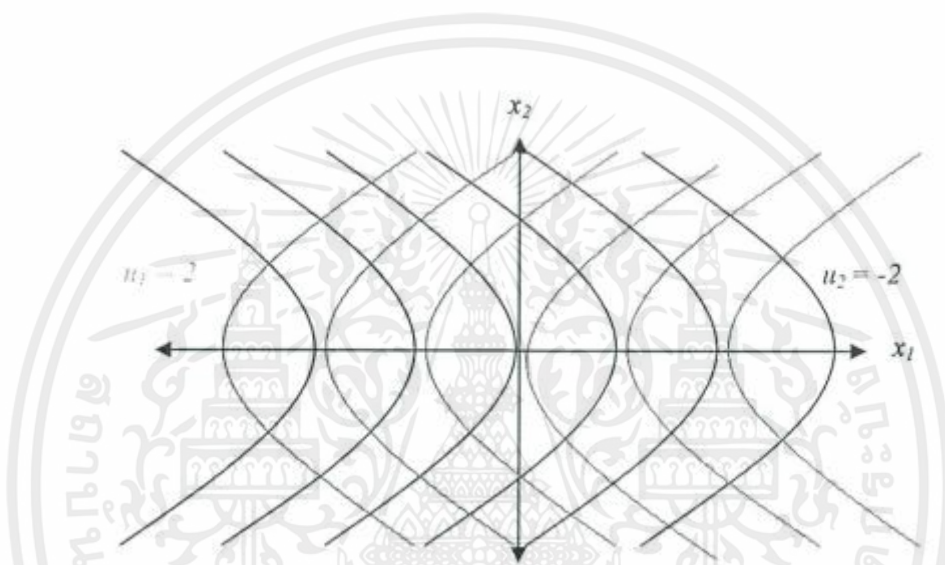
u คือ สัญญาณควบคุม มีค่าเท่ากับ u_1 หรือ u_2 ตามการทำงานของสวิตช์

x_2 คือ อนุพันธ์ของค่าผิดพลาด

แล้วกำหนดตัวควบคุม u เป็นสองโครงสร้างตามสมการที่ (2.23) โดยมีผลตอบแทนของระบบ Phase-Plane ตามรูปที่ 2.15 และกำหนดทางเดินของตัวแปรสถานะเป็นสมการเส้นตรงเรียกว่าเส้นสไลด์ดิง (Sliding line) แทนด้วย $S(x)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสถานะตามสมการที่ (2.24) เมื่อกำหนดให้ค่า $c = 1$ ตามรูปที่ 2.16

$$u = u_1, u_2 \text{ โดย } u_1 = +2 \text{ และ } u_2 = -2 \quad (2.23)$$

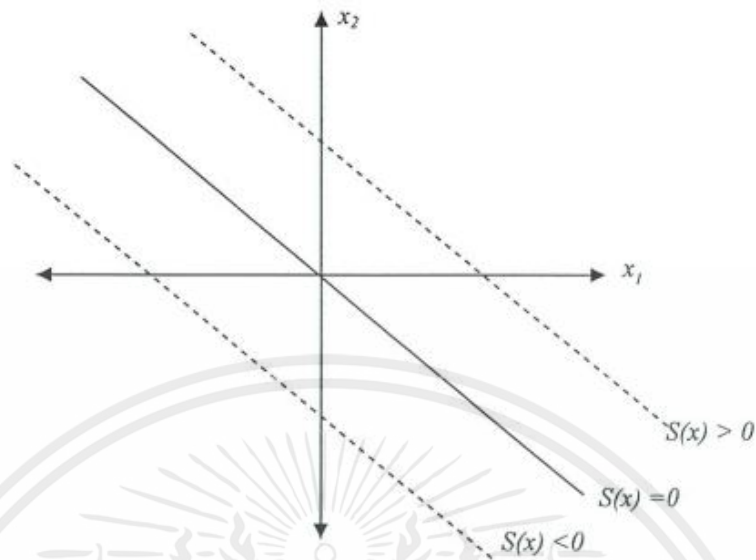
$$S(x) = x_1 + cx_2 = x_1 + x_2 = 0 \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.10 ผลตอบแทนของระบบควบคุมตามรูปที่ 2.14
ด้วยสัญญาณควบคุมตามสมการที่ (2.23) [7]

จากรูปที่ 2.15 ระบบไม่มีเสถียรภาพไม่ว่าค่าควบคุม u เท่ากับ $+2$ หรือ -2 แต่ถ้าสามารถควบคุมทางเดินของตัวแปรสถานะของระบบ ให้เคลื่อนที่ไปตามทางเดินที่กำหนด ในสมการที่ (2.24) หรือตามรูปที่ 2.16 ได้แล้ว ระบบมีเสถียรภาพที่จุดกำเนิดตามทางเดินที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงกำหนดนิยามที่ทำให้การควบคุมเป็นไปตามทางเดินที่กำหนดดังนี้

1. ทุกทางเดินที่มีจุดเริ่มต้นบนเส้นสไลด์ดิงต้องคงอยู่บนเส้นสไลด์ดิง
2. ทุกทางเดินที่มีจุดเริ่มต้นนอกเส้นสไลด์ดิงต้องมีทิศทางเข้าหาเส้นสไลด์ดิง



รูปที่ 2.11 ทางเดินของตัวแปรสถานะที่กำหนดตามสมการที่ (2.24) [7]

จากนิยามที่กล่าวมาแล้วเมื่อกลับไปพิจารณาระบบควบคุมตามรูปที่ 2.14 ซึ่งได้กำหนดตัวควบคุมไว้แล้วคือ ± 2 สามารถกำหนดเงื่อนไขของสัญญาณควบคุมที่ทำให้นิยามเป็นจริงคือ

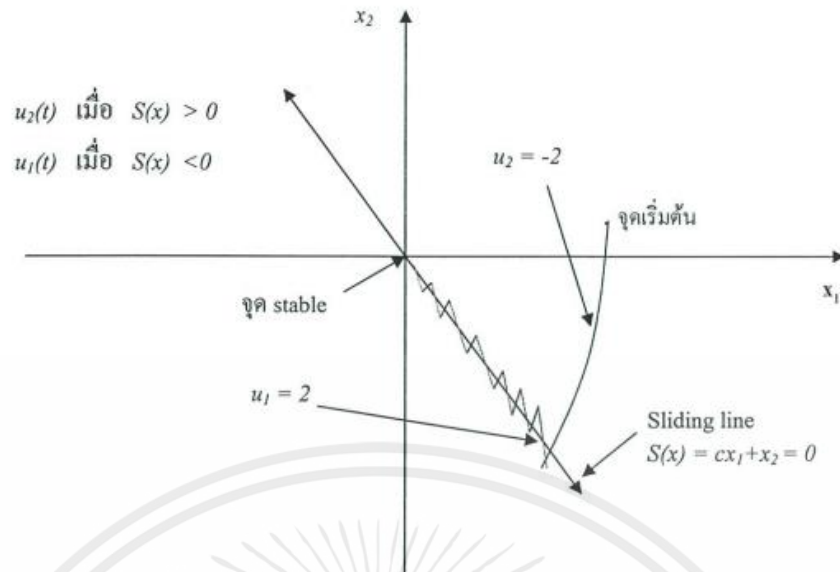
$$u = u_1 = 2 \text{ เมื่อ } S(x) < 0 \text{ และ } u = u_2 = -2 \text{ เมื่อ } S(x) > 0 \quad (2.25)$$

หรือ

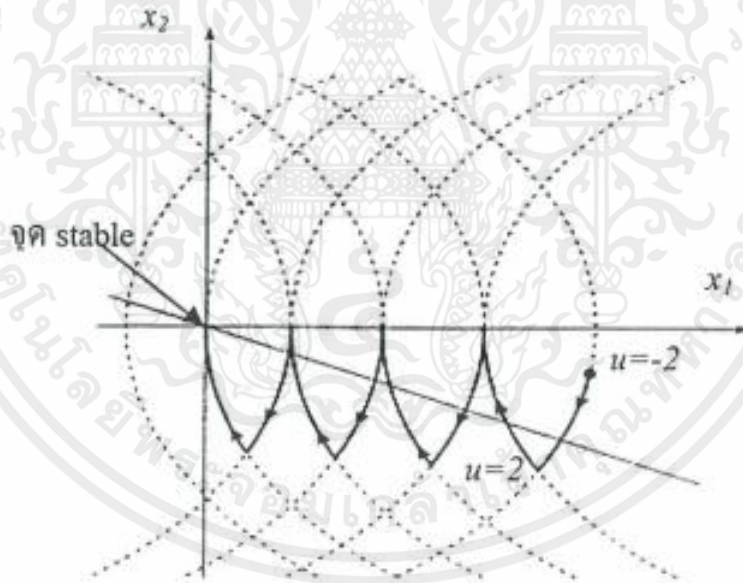
$$u = -2\text{sgn}[x_1 + x_2] = -2\text{sgn}[S(x)] \quad (2.26)$$

จากเงื่อนไขของสัญญาณควบคุมตามสมการที่ (2.25) ทำให้มีเสถียรภาพที่จุดกำเนิดได้ดังรูปที่ 2.17

จากรูปที่ 2.17 จะเห็นว่า การเคลื่อนที่เข้าหาจุดกำเนิดของตัวแปรสถานะเป็นไปตามทางเดินที่กำหนดไว้ และมีลักษณะสไลด์ไปมาระหว่างด้านบวกและลบของเส้นสไลด์ดังเรียกว่าการสั่น (Chattering) ของทางเดิน ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องกำจัดให้น้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.12 ผลตอบสนองของระบบตามรูปที่ 2.14 โดยใช้เงื่อนไขตัวควบคุมตามสมการที่ (2.25) [7]



รูปที่ 2.13 การสั่น (Chattering) ของระบบควบคุมตามรูปที่ 2.14 [7]

ที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.3 แสดงถึงวิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิงที่ไม่ซับซ้อนเพื่อให้สามารถเข้าใจนิยามของการควบคุม ซึ่งนิยามดังกล่าวสามารถกำหนดเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับวิธีการควบคุมสไลด์ดิง เพื่อเป็นการยืนยันว่าการกำหนดทางเดินและเงื่อนไขการสวิตช์ของสัญญาณควบคุมสามารถทำให้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่ต้องการได้ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ฟังก์ชันลาพูนอฟ

ฟังก์ชันลาพูนอฟเป็นฟังก์ชันสเกลาร์ที่สามารถใช้ตรวจสอบความเสถียรของสมดุลของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ ฟังก์ชันลาพูนอฟ (หรือที่เรียกว่าวิธีที่สองของลาพูนอฟสำหรับความเสถียร) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความเสถียรของระบบแบบไดนามิกและทฤษฎีการควบคุม

2.4.1 สมการฟังก์ชันลาพูนอฟ

ฟังก์ชันลาพูนอฟ เป็นฟังก์ชันสเกลาร์ที่สร้างขึ้นบนเฟสสเปซซึ่งสามารถใช้แสดงความเสถียรภาพของจุดสมดุลได้

ให้ $V(x)$ เป็นฟังก์ชันที่สามารถหาอนุพันธ์ได้อย่างต่อเนื่องในย่านแหล่งกำเนิด U หากตรงตามข้อกำหนดต่อไปนี้ ฟังก์ชัน $V(x)$ จะเรียกว่าฟังก์ชันลาพูนอฟ สำหรับระบบอิสระ $\dot{x} = f(x)$

1. $V(x) > 0$ สำหรับทุกๆ $x \in U \setminus \{0\}$
2. $\frac{dV}{dt} \leq 0$ สำหรับทุกๆ $x \in U$
3. $V(x) = 0$

เพื่อตรวจสอบความเสถียรของสมการเชิงอนุพันธ์และระบบต่างๆ จะใช้วิธีฟังก์ชันลาพูนอฟในระบบอัตโนมัติ

$$\dot{x} = f(x) \text{ หรือ } \frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.27)$$

ที่จุด $x \equiv 0$ ซึ่งจะเป็นจุดศูนย์สมดุล

ให้ฟังก์ชันอนุพันธ์ต่อเนื่อง $V(x) = V(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ในย่านกำเนิดของ U ให้ $V(x)$ อยู่ในช่วงของ $x \in U \setminus \{0\}$ และ $V(0)$ ในจุดกำเนิด ตัวอย่างเช่นซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้

$$V(x_1, x_1) = ax_1^2 + bx_2^2, V(x_1, x_2) = ax_1^2 + bx_2^4, a, b > 0 \quad (2.28)$$

อนุพันธ์ทั้งหมดของฟังก์ชัน $V(x)$ เทียบกับเวลา t พบได้ดังนี้

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dt} + \dots + \frac{\partial V}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dt} \quad (2.29)$$

เช่นเดียวกับผลคูณของสเกลาร์ (จุด) ของเวกเตอร์สองตัว นิพจน์นี้สามารถแสดงเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dV}{dt} = \left(\text{grad } V, \frac{dX}{dt} \right) \quad (2.30)$$

ในขณะที่ $\text{grad } V = \left(\frac{\partial V}{\partial x_1}, \frac{\partial V}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial V}{\partial x_n} \right)$

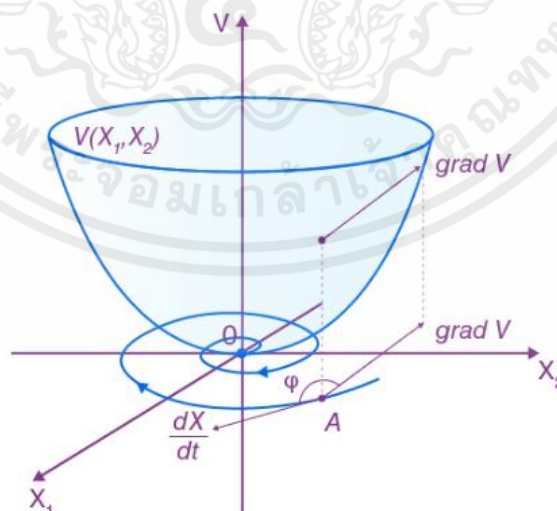
$$\frac{dX}{dt} = \frac{dx_1}{dt}, \frac{dx_2}{dt}, \dots, \frac{dx_n}{dt}, \quad (2.31)$$

เวกเตอร์แรกคือเกรเดียนต์ของเวกเตอร์ $V(x)$ ซึ่งหมายความว่ามันชี้ไปในทิศทางของการเพิ่มขึ้นมากที่สุด ใน $V(x)$ เสมอ $V(x)$ เป็นฟังก์ชันที่โดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากจุดกำเนิด เช่น กำหนด $|X| \rightarrow \infty$ เวกเตอร์ความเร็วจะเป็นเวกเตอร์ที่สองในผลิตภัณฑ์สเกลาร์ ซึ่งจะตั้งฉากกับเฟสวิถีตลอดเวลา

พิจารณาสถานการณ์ที่อนุพันธ์ของ $V(x)$ ในย่านแหล่งกำเนิด U เป็นค่าลบ

$$\frac{dV}{dt} = \left(\text{grad } V, \frac{dX}{dt} \right) < 0 \quad (2.32)$$

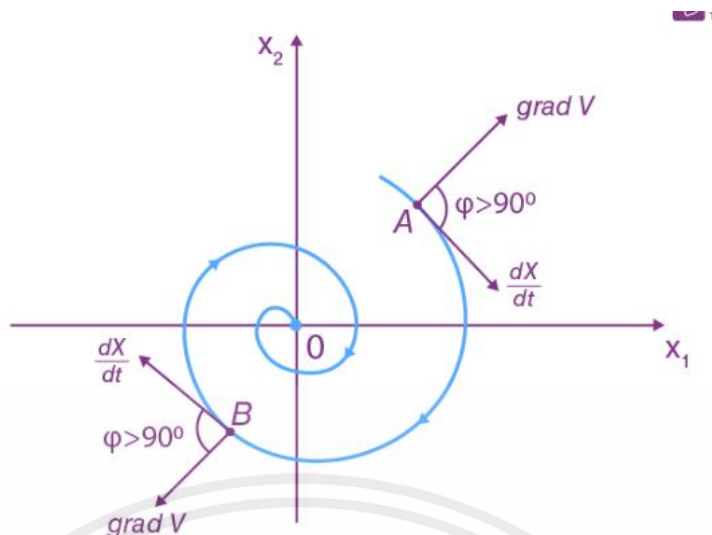
แสดงว่ามุม φ ระหว่างเวกเตอร์เกรเดียนต์และเวกเตอร์ความเร็วนั้นมากกว่า 90 องศา รูปที่ 2.15 และ 2.16 แสดงฟังก์ชันที่มีตัวแปรสองตัวแสดงเป็นแผนผัง



รูปที่ 2.14 วิธีระบบสองตัวแปร

แหล่งที่มา <https://byjus.com/maths/lyapunov-functions/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 วิถีเคลื่อนที่เข้าสู่จุดกำเนิด

แหล่งที่มา <https://byjus.com/maths/lyapunov-functions/>

หากอนุพันธ์ $\frac{dV}{dt}$ ตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของเฟสเป็นค่าลบเสมอ เส้นทางการเคลื่อนที่จะมีแนวโน้มไปที่จุดกำเนิด ซึ่งบ่งชี้ว่าระบบมีความเสถียร เมื่อไรก็ตามที่อนุพันธ์ $\frac{dV}{dt}$ เป็นบวก ระบบจะไม่เสถียร เนื่องจากวิถีเคลื่อนที่ออกจากจุดกำเนิด

2.4.2 ทฤษฎีบทความเสถียรของลาปูนอฟ

ทฤษฎีบทความเสถียรของลาปูนอฟ ประกอบด้วยดังนี้

1. ทฤษฎีบทความเสถียรภาพในลาปูนอฟเชิงเส้น ถ้าฟังก์ชันลาปูนอฟ $V(x)$ มีอยู่ในย่าน U ของระบบอัตโนมัติจุดสมดุลของระบบ $x = 0$ คือ จุดลาปูนอฟเสถียร

2. ทฤษฎีบทความเสถียรเชิงเส้นกำกับ ถ้าฟังก์ชันลาปูนอฟ $V(x)$ ที่มีอนุพันธ์ที่แน่นอนเป็นลบ $\left(\frac{dV}{dt}\right) < 0$ สำหรับ $x \in U \setminus \{0\}$ ทั้งหมดมีอยู่ในย่าน U ของระบบอิสระ $x = 0$ ดังนั้นจุดสมดุลของระบบ $x = 0$ มีความเสถียรเชิงเส้นกำกับ ดังนั้นสำหรับความเสถียรเชิงซีโทติก ค่าอนุพันธ์รวม $\frac{dV}{dt}$ ควรเป็นค่าลบในบริเวณใกล้เคียงของจุดกำเนิด [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การควบคุมแบบฟัซซีสไลด์ดิง

จากกฎการควบคุม

$$u = -(\hat{g} + \zeta x_2 + K(\lambda, t) \operatorname{sgn}(s)), K(\lambda, t) > 0 \quad (2.33)$$

โดยที่ ζ คือค่าคงที่บวก

ค่าของอัตราขยาย (K) ในกฎการควบคุมที่กำหนดในสมการ (2.27) จำเป็นต้องใช้เพื่อย้ายระบบไปยังพื้นผิวเลื่อน ดังนั้นองค์ประกอบฟัซซีลอจิกจึงต้องได้รับการพัฒนาในลักษณะที่เมื่อ $|s|$ เพิ่มขึ้น ค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณควบคุม $|u|$ จะเพิ่มขึ้นด้วย

ฟัซซีลอจิกได้รับการพัฒนาด้วยหนึ่งอินพุตที่ได้รับจากข้อผิดพลาดและอัตราของการเปลี่ยนแปลงของข้อผิดพลาดและมีหนึ่งเอาต์พุต (แรงเบรก) การอนุมานประเภท mamdani ระบบที่มีฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมถูกกำหนดในช่วงของค่าตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งแสดงอยู่ในตัวแปรทางภาษาเจ็ดตัวดังรูปที่ 2.19 วิธี Centroid ที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุดใช้สำหรับการทำ defuzzified สัญญาณเอาต์พุตของฟัซซีลอจิก (K_f) สามารถแสดงทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (2.28)

$$K_f = \frac{\int \mu_A(z) z dz}{\int \mu_A(z) dz} \quad (2.34)$$

โดยที่ $\mu_A(z)$ คือระดับการเป็นสมาชิกขององค์ประกอบ 'z' ในเซตฟัซซี 'A'

NB	Negative Big
NM	Negative Medium
NS	Negative Small
ZE	Zero
PS	Positive Small
PM	Positive Medium
PB	Positive Big

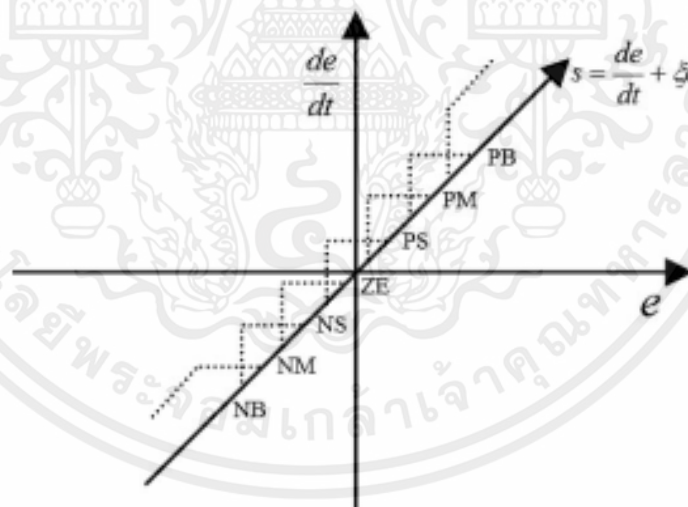
รูปที่ 2.16 ตารางระดับการเป็นสมาชิกของฟัซซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

If 's' is	Then 'u' is
NB	PB
NM	PM
NS	PS
ZE	ZE
PS	NS
PM	NM
PB	NB

รูปที่ 2.17 กฎพื้นฐานสำหรับฟuzzy

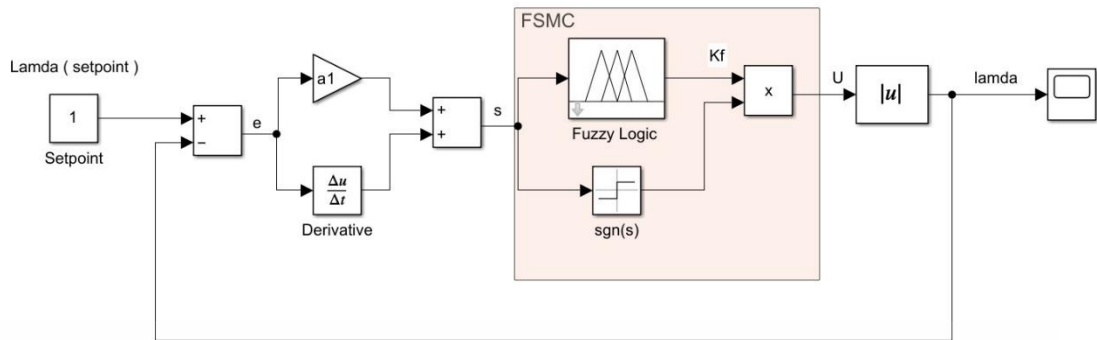
ฟuzzyสไลด์ดิงดำเนินการควบคุมโดยการเคลื่อนย้ายระบบไปยัง ผิวหน้าสไลด์ดิงและรักษาไว้บน ผิวหน้าสไลด์ดิงอย่างต่อเนื่อง ความสัมพันธ์ระหว่าง sliding mode hyperplane และ fuzzy hyperplane แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 สิ่งนี้แสดงวิธีการที่สถานะของระบบที่พื้นผิวเลื่อนถูกนำไปเป็น อินพุตให้กับฟuzzyลอจิก และด้วยเหตุนี้ฟuzzyลอจิกจึงสร้างอัตราขยาย 'K_f' ตามกฎที่กำหนดในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.18 Mapping ระหว่างตัวควบคุมสไลด์ดิงโหมดและ fuzzy hyperplanes [11]

รูปแบบของตัวควบคุมฟuzzyสไลด์ดิงแสดงไว้ในรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



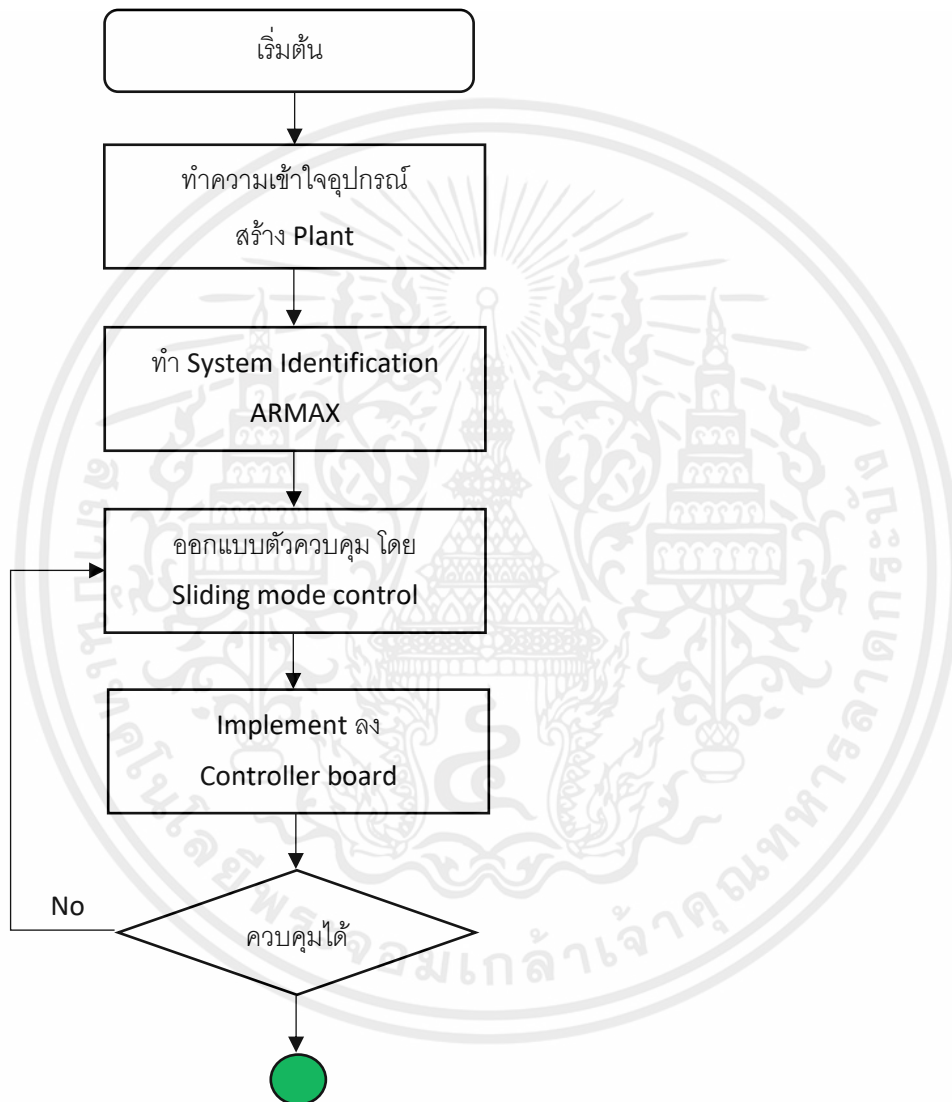
รูปที่ 2.19 ตัวควบคุมฟัซซีสไลด์ดิง

วัดตำแหน่งของลูกบอลจริง (λ) จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้ (λ_{sp}) และข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่เป็นผลลัพธ์ (e) และอนุพันธ์ของมันจะถูกนำไปใช้เพื่อสร้าง ผิวน้ำสไลด์ดิง (s) ตรรกะฟัซซีสร้างอัตราขยาย (K_f) ขึ้นอยู่กับค่าของ ' s ' ตามที่กำหนดในรูปที่ 2.20 เอาต์พุตของฟัซซีลอจิกคูณด้วย $\text{sgn}(s)$ คือเอาต์พุตของตัวควบคุม (u) [11]

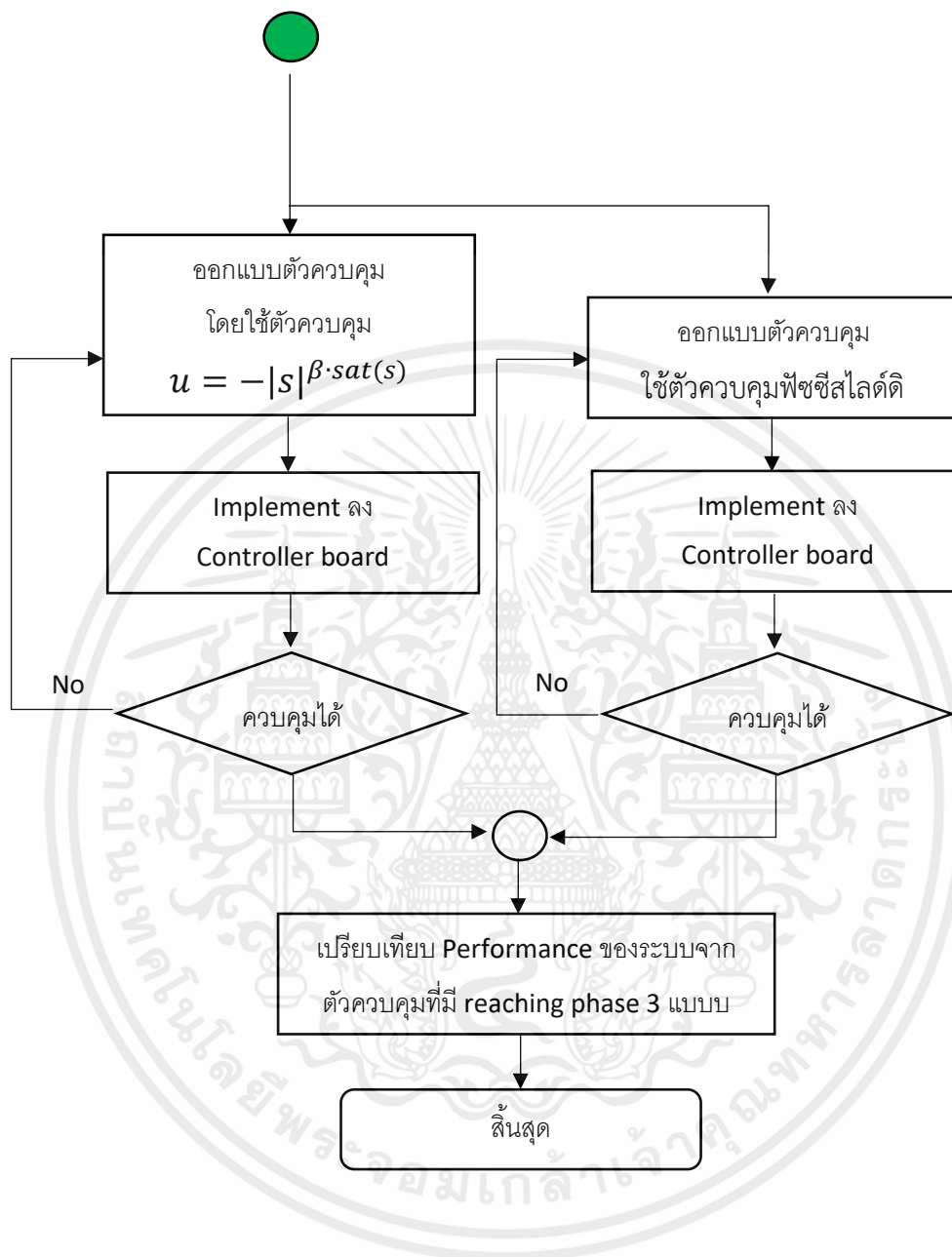
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

3.1 แผนผังการดำเนินงาน

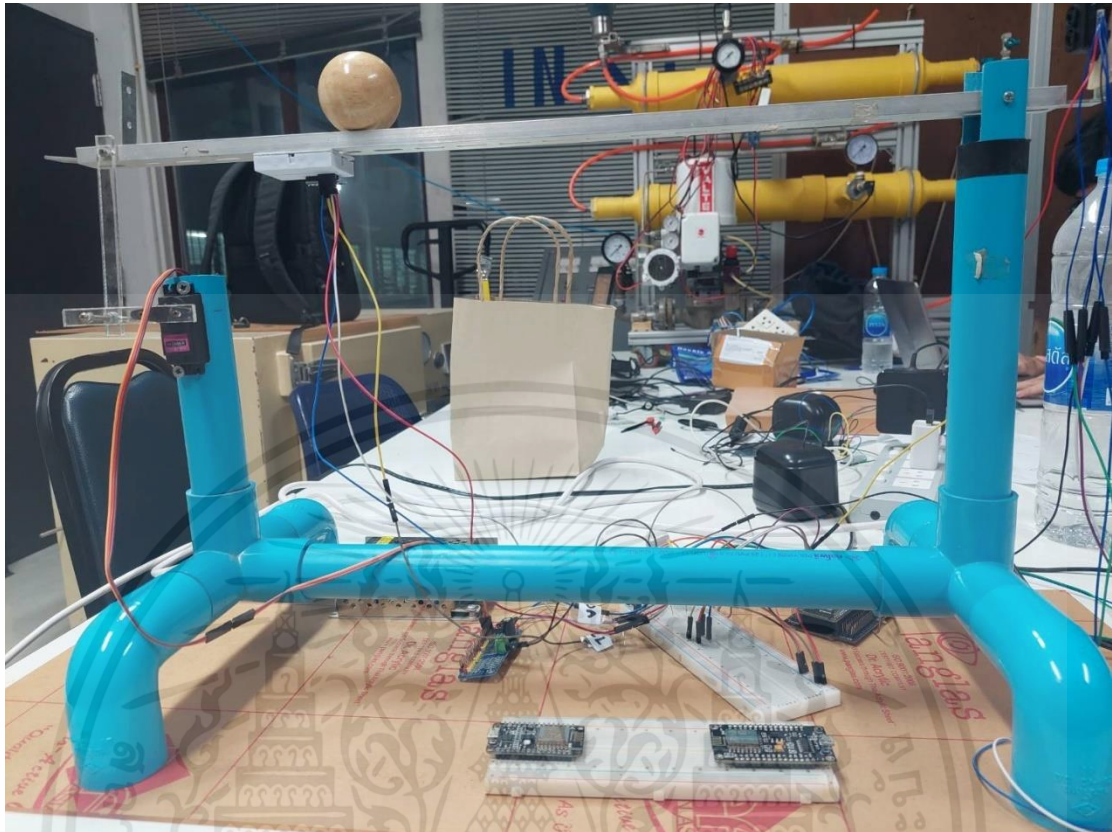


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 Hardware



รูปที่ 3.1 ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน

3.2.1 ESP32

ESP32 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Memory: 520 KB SRAM, microprocessor running at 160 or 240 MHz, 12-bit × 18 ADC channels, 2 × 8-bit DACs, 3 × UART,



รูปที่ 3.2 ESP32 แหล่งที่มา <https://www.artronshop.co.th/article/51/esp32>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 16-Channel 12-bit PWM Servo shield I2C interface PCA9685

โมดูลขับ Servo 16 ช่อง 12 bit แบบ PWM Servo ติดต่อแบบอินเตอร์เฟซ I2C ใช้ IC Driver เบอร์ PCA9685



รูปที่ 3.3 16-Channel 12-bit PWM Servo shield I2C interface PCA9685 แหล่งที่มา
<https://www.allnewstep.com/product/765/16-channel-12-bit-pwm-servo->

3.2.3 Power Supply Switching 5V 5A

เพาเวอร์ซัพพลาย อุปกรณ์สำหรับแปลงแรงดันไฟฟ้า AC 220 V เป็น 5 Volt จ่ายกระแสสูงสุด
 ได้ 5A



รูปที่ 3.4 Power Supply Switching 5V 5A แหล่งที่มา
<https://www.ab.in.th/product/496/power-supply-switching-5v-5a>

3.2.4 TF-Luna LiDAR Module - Short-Range Distance Sensor

TF-Luna ใช้หลักการ Time of Flight มันปล่อยคลื่นมของรังสีอินฟราเรดซึ่งจะสะท้อนออกมา
 หลังจากสัมผัสกับวัตถุ LiDAR ได้รับเวลาวัดความแตกต่างของเฟสไป-กลับ จากนั้นคำนวณระยะทาง
 สัมพัทธ์ระหว่าง LiDAR กับวัตถุที่ตรวจพบ, resolution 1 cm, Field of view 2°, Frame rate 1-
 250 Hz (adjustable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 TF-Luna LiDAR Module - Short-Range Distance Sensor แหล่งที่มา

<https://www.arduitronics.com/product/3855/TF-Luna-LiDAR-Module-Short-Range>

3.2.5 MG996R Servo Motor 0-180°

Servo Tower Pro MG996R เป็นแบบโลหะ ทมุน 0-180 องศาให้แรงบิดสูงถึง 15kg
Operating Speed : 0.17sec / 60 degrees (4.8V no load)



รูปที่ 3.6 MG996R Servo Motor 0-180° แหล่งที่มา

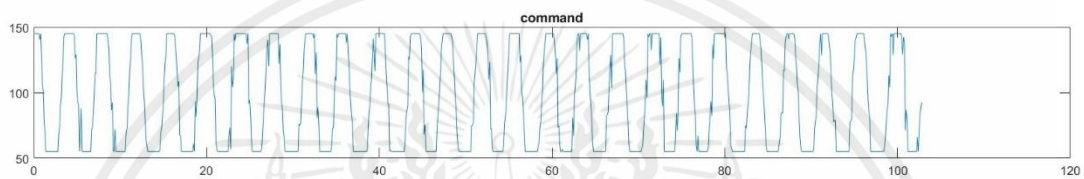
<https://www.cybertice.com/product/63/mg996r-servo-motor-0-180>

3.3 การหาเอกลักษณ์ระบบ

3.3.1 การออกแบบสัญญาณอินพุตในการการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

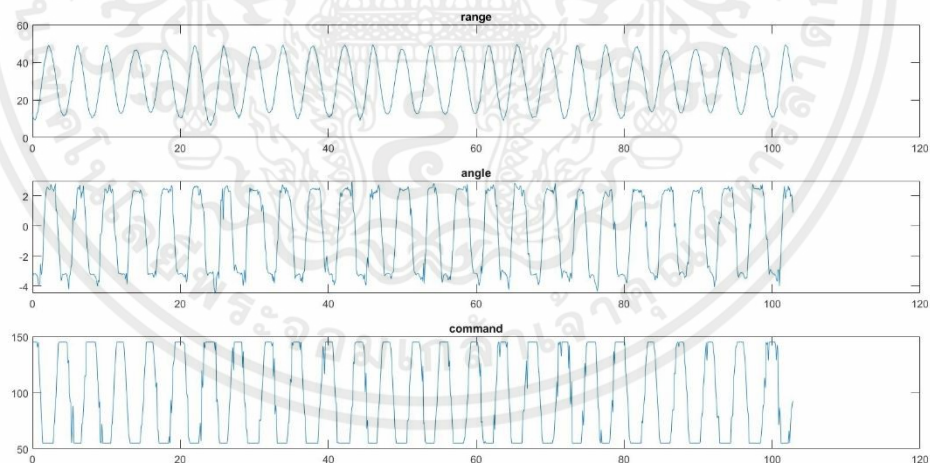
ชนิดของสัญญาณอินพุต มีความสำคัญสำหรับการที่จะได้โมเดลที่เป็นตัวแทนที่ดี กล่าวคืออินพุตจะต้องมีความสามารถที่จะกระตุ้นผลตอบสนองที่สำคัญของระบบ หรือถ้าพิจารณาในด้านความถี่ อินพุตจะต้องมีองค์ประกอบทางความถี่ที่ครอบคลุมย่านความถี่ที่เราสนใจ

สัญญาณอินพุตนั้นเราสามารถใช้เป็นสัญญาณรูปคลื่นซายน์ดังรูป



รูปที่ 3.7 สัญญาณรูปคลื่นซายน์

จากนั้นเรานำสัญญาณซายน์ป้อนให้กับระบบแล้วทำการบันทึกค่าเอาต์พุตออกมาได้ดังนี้

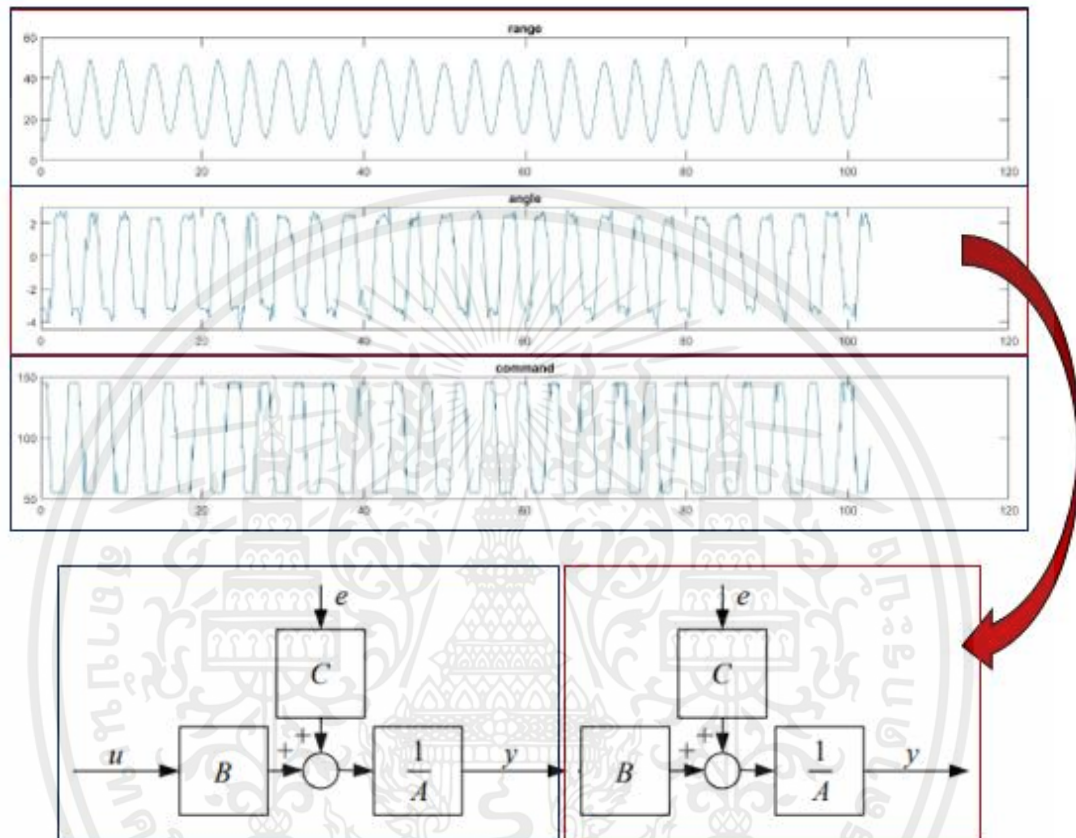


รูปที่ 3.8 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุต (ระยะของลูกบอลและมุมของคาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การออกแบบโมเดลของระบบแบบ ARMAX

นำข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ได้มา ทำการออกแบบโมเดลของระบบแบบ ARMAX โดยใช้วิธีการคำนวณ จากฟังก์ชันของโปรแกรม MATLAB โดยทำการแบบออกเป็น 2 ระบบ และนำมารวมกันดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.9 การออกแบบโมเดลของระบบแบบ ARMAX

จะได้พารามิเตอร์ของระบบที่ 1 และ ระบบที่ 2 ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

sys1 =
Discrete-time ARMAX model: A(z)y(t) = B(z)u(t) + C(z)e(t)
  A(z) = 1 - 1.947 z^-1 + 0.973 z^-2

  B(z) = -0.0001197 z^-1

  C(z) = 1 - 0.8628 z^-1 - 0.07662 z^-2

Sample time: 0.1 seconds

Parameterization:
  Polynomial orders: na=2 nb=1 nc=2 nk=1
  Number of free coefficients: 5
  Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using ARMAX on time domain data.
Fit to estimation data: 81.37% (prediction focus)
FPE: 0.2214, MSE: 0.2193

```

รูปที่ 3.10 พารามิเตอร์การออกแบบโมเดล ARMAX ของระบบที่ 1

```

sys2 =
Discrete-time ARMAX model: A(z)y(t) = B(z)u(t) + C(z)e(t)
  A(z) = 1 - 1.94 z^-1 + 0.9415 z^-2

  B(z) = -0.1267 z^-1

  C(z) = 1 - 1.05 z^-1 + 0.2799 z^-2

Sample time: 0.1 seconds

Parameterization:
  Polynomial orders: na=2 nb=1 nc=2 nk=1
  Number of free coefficients: 5
  Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using ARMAX on time domain data.
Fit to estimation data: 94.24% (prediction focus)
FPE: 0.5811, MSE: 0.5732

```

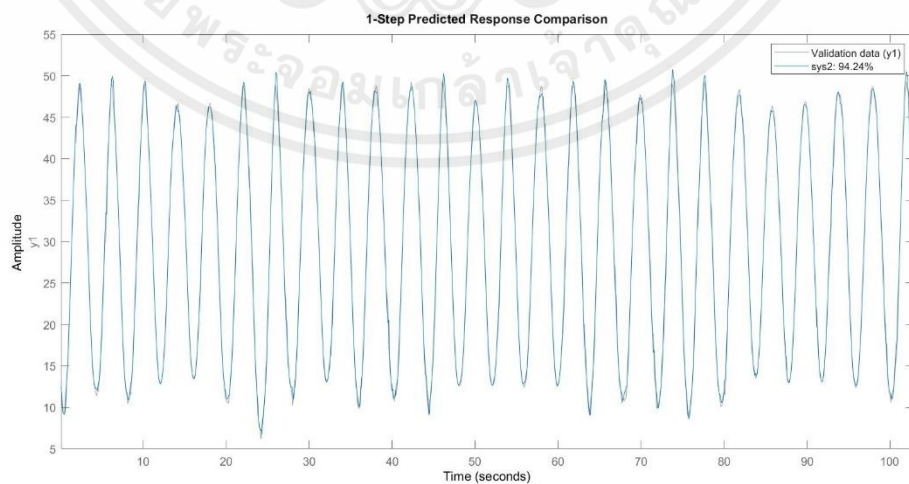
รูปที่ 3.11 พารามิเตอร์การออกแบบโมเดล ARMAX ของระบบที่ 2

นำพารามิเตอร์ของทั้ง 2 ระบบมาคำนวณ จะได้เป็น state space model ของระบบ ดังรูปที่ 3.10

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{array}{cccc} & x1 & x2 & x3 & x4 \\ x1 & 0 & -0.973 & 0 & 0 \\ x2 & 1 & 1.947 & 0 & -0.0001197 \\ x3 & 0 & 0 & 0 & -0.9415 \\ x4 & 0 & 0 & 1 & 1.94 \end{array} \\
 B &= \begin{array}{c} u1 \\ x1 \\ x2 \\ x3 \\ x4 \end{array} \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.1267 \end{array} \\
 C &= \begin{array}{cccc} x1 & x2 & x3 & x4 \\ y1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \\
 D &= \begin{array}{c} u1 \\ y1 \end{array} \begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array}
 \end{aligned}$$

รูปที่ 3.12 State space model ของระบบลูกบอลบนคาน

และจากระบบที่ได้จากการประมาณค่าเมื่อนำอินพุตเดิมใส่เข้าไปในระบบจะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 3.11 ซึ่งระบบที่ได้จากการประมาณนี้มีความใกล้เคียงกับระบบจริงที่ 94.24%



รูปที่ 3.13 สัญญาณเปรียบเทียบระหว่าง ระบบจริงกับระบบที่ทำการประมาณขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบตัวควบคุมสไลด์ดิงโหมด

3.3.1 โครงสร้างการควบคุมแบบสไลด์ดิง

การออกแบบโครงสร้างการควบคุมแบบสไลด์ดิง เริ่มจากการออกแบบวงจรถวลควบคุม แล้วจึงนำวงจรถวลดังกล่าวมาวิเคราะห์หาสมการสถานะเพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรถวลควบคุมที่ออกแบบภายใต้เงื่อนไขของวิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิง

3.3.2 การออกแบบเส้นสไลด์ดิง $S(x)$

การออกแบบเส้นสไลด์ดิง มีส่วนสำคัญมาก เนื่องจากการกำหนดการทำงานของระบบให้มีทิศทางเข้าหาเสถียรภาพที่จุดกำเนิดตามต้องการ โดยทิศทางดังกล่าวจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ของวิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิง เพื่อให้สามารถควบคุมผลตอบสนองของระบบได้

จากฟังก์ชันของตัวแปรสถานะ

$$\dot{x}_1 = f(x, t) + g(x, t)u \quad (3.1)$$

$$y = h(x, t) \quad (3.2)$$

โดยที่ y และ u หมายถึงเอาต์พุตสเกลาร์และตัวแปรอินพุต และหมายถึงเวกเตอร์สถานะ

จุดมุ่งหมายในการควบคุมคือทำให้ตัวแปรเอาต์พุต y ติดตามผลที่ต้องการ y_{DES} นั่นคือจำเป็นที่ตัวแปรข้อผิดพลาดเอาต์พุต $e = y - y_{DES}$ มีแนวโน้มที่จะมีค่าใกล้เคียงศูนย์หลังจากช่วงชั่วคราวของระยะเวลาที่ยอมรับได้

ระยะแรกคือจำกัดฟังก์ชันสเกลาร์ของสถานะระบบ $S(x) : R_n \rightarrow R$ บ่อยครั้งพื้นผิวที่เลื่อนขึ้นอยู่กับข้อผิดพลาดในการติดตาม e_y ร่วมกับอนุพันธ์จำนวนหนึ่ง

$$S(x) = S(e, \dot{e}, \dots, e^{(k)}) \quad (3.3)$$

ฟังก์ชัน $S(x)$ ควรเลือกในลักษณะที่ฟังก์ชัน $S(x)$ หายไป $S(x) = 0$ ทำให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์ที่ "เสถียร" คำตอบใดๆ ของ $e_y(t)$ ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะเป็นศูนย์ในที่สุด

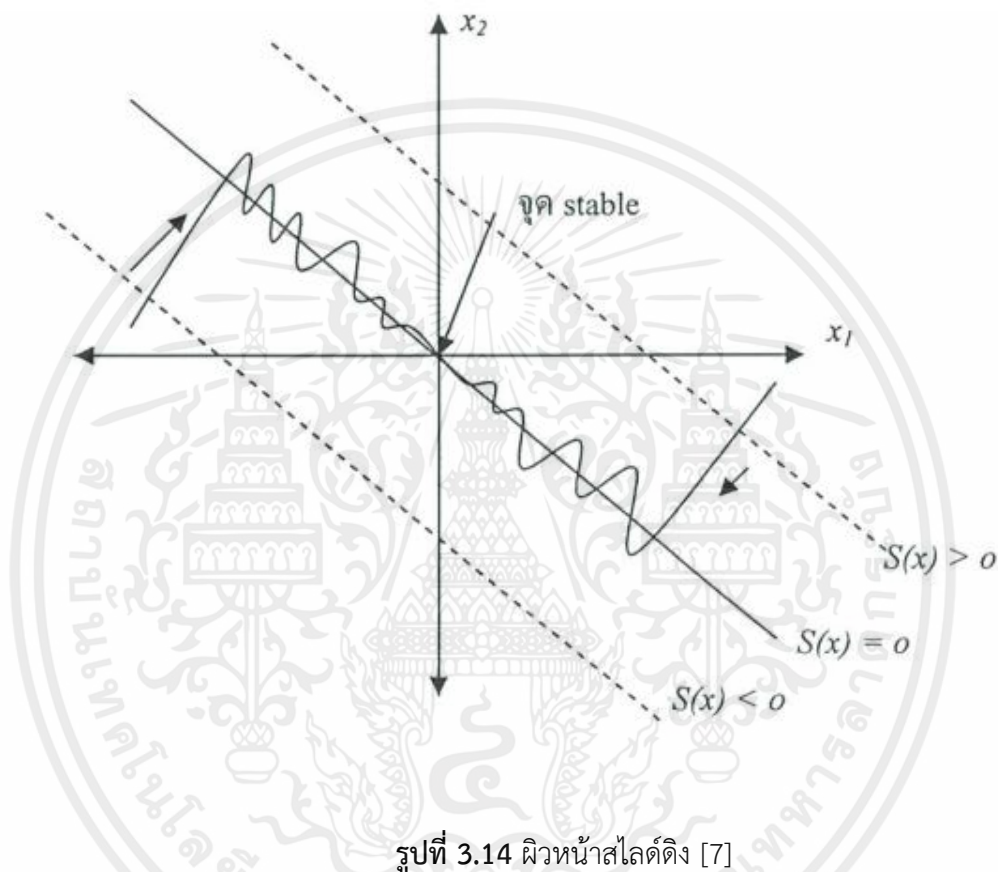
เส้นสไลด์ดิง

$$S(x) = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ a_i ที่เลือกไว้อย่างถูกต้อง ถ้าค่าใดค่าหนึ่งทำให้ตัวแปร $S(x)$ มีค่าเป็นศูนย์ จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนและอนุพันธ์ที่หายไปแบบเอกซ์โปเนนเชียล

จากมุมมองทางเรขาคณิต สมการ $S(x) = 0$ กำหนดพื้นผิวในพื้นที่ข้อผิดพลาดพลาต ซึ่งเรียกว่า "พื้นผิวเลื่อน" วิธีของระบบควบคุมถูกบังคับให้ตกบนพื้นผิวเลื่อน ซึ่งลักษณะการทำงานของระบบเป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบ



รูปที่ 3.14 ผิวหน้าสไลด์ดิง [7]

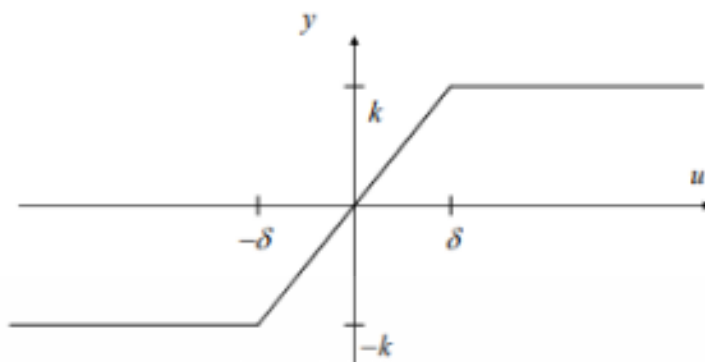
3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขวงจรถอบคุม

การกำหนดวงจรถอบคุมคือ การสร้างเงื่อนไขในการสวิตช์ของสัญญาณควบคุม ตามทางเดินของเส้นสไลด์ดิงในสถานะชั่วขณะ ตามที่ตัวแปรสถานะ x_1, x_2, x_3 และ x_4 บน Phase-Plane แสดงอยู่ด้านบนหรือด้านล่างของเส้นสไลด์ดิงให้เป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้

ได้กำหนดค่า $u(t)$ โดยนำ ผิวหน้าสไลด์ดิงใส่ใน Saturate function ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u = -k \operatorname{sat}(s) \text{ และ } u = -|s|^\beta \operatorname{sat}(s) \quad (3.5) \text{ และ } (3.6)$$



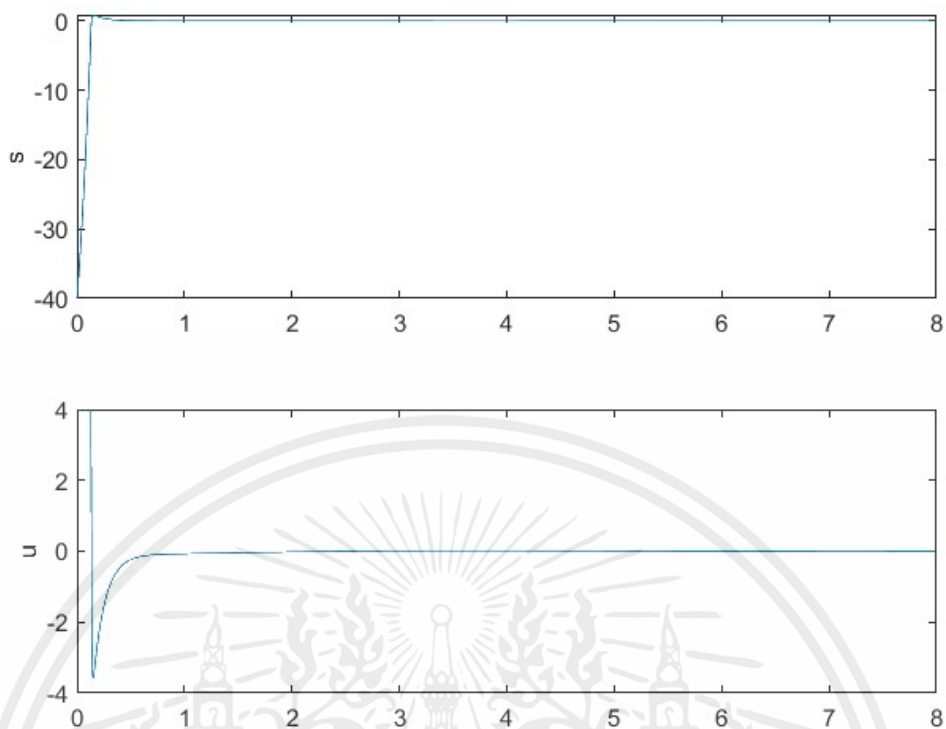
รูปที่ 3.15 Saturation แหล่งที่มา [5]

การทำงานของ Saturation แสดงดังนี้

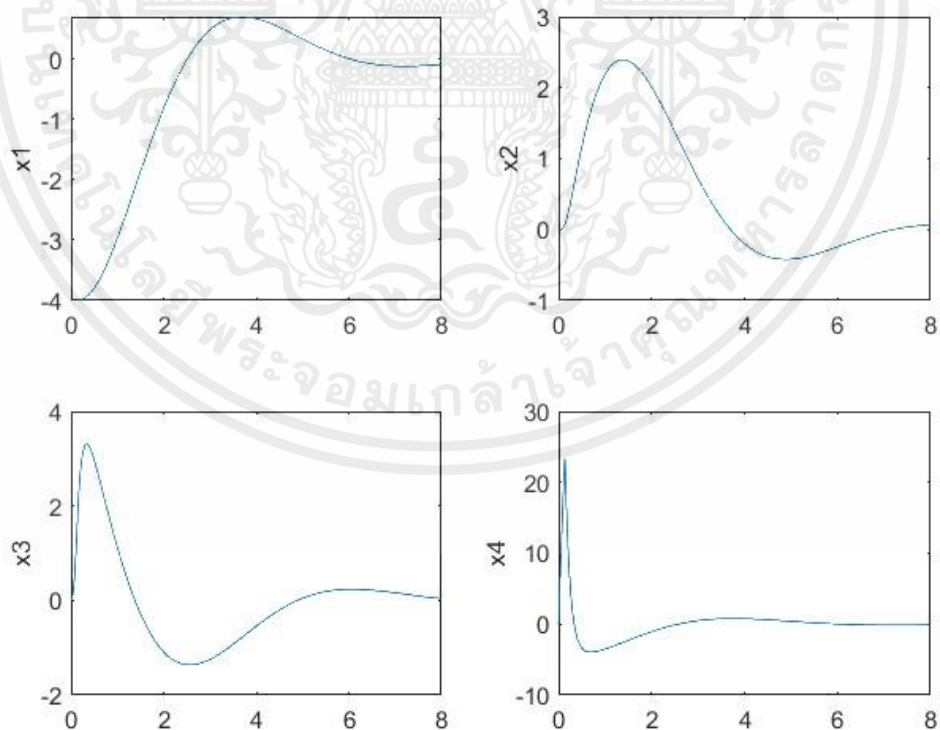
$$y = \operatorname{sat}(u) = \begin{cases} \frac{ku}{\delta}, & \text{if } |u| \leq \delta \\ k \operatorname{sgn}(u), & \text{if } |u| > \delta \end{cases}$$

ทำการจำลองการควบคุมด้วย MATLAB ได้ผลดังรูปที่ (3.6) และ (3.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



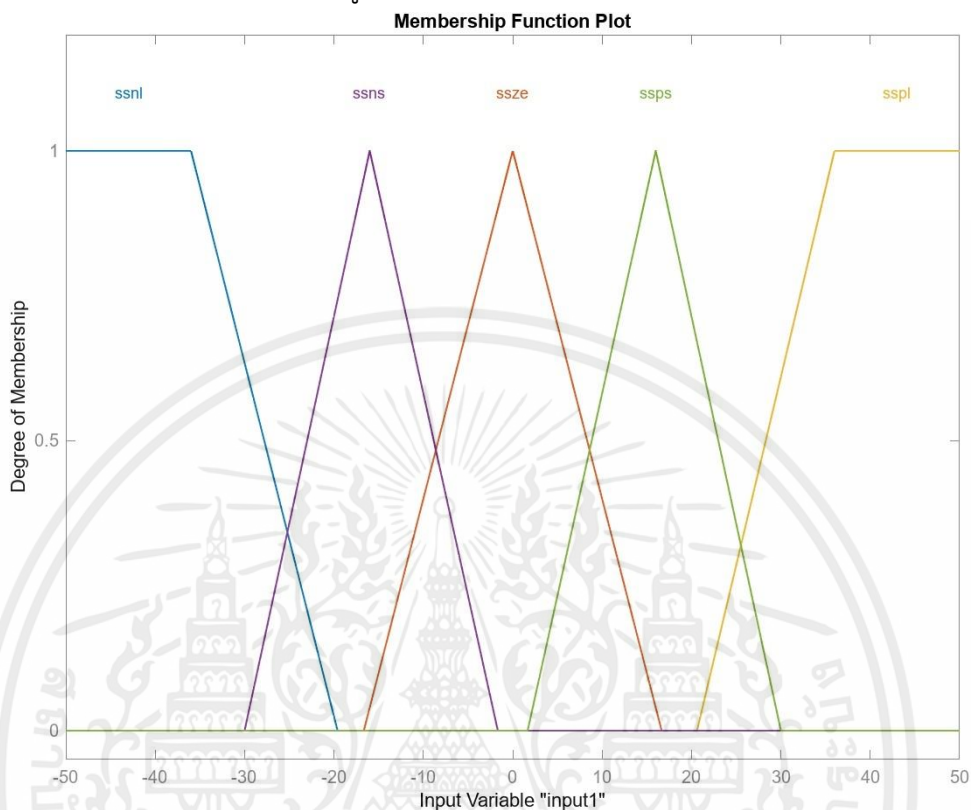
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผิวหน้าสไลด์ดิงและสัญญาณควบคุม



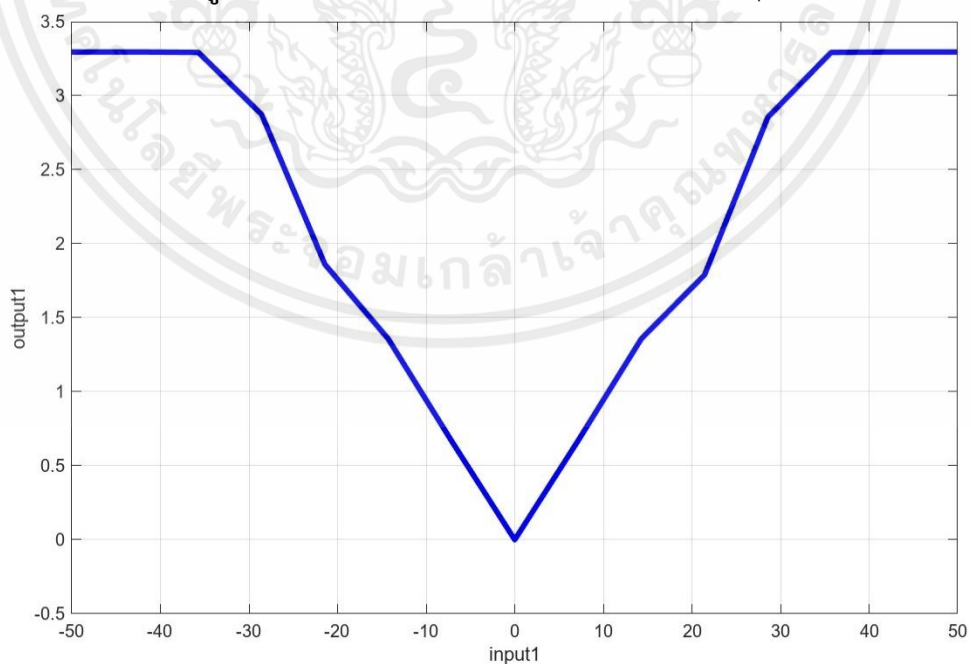
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการกำหนดตัวควบคุมแบบฟuzzyสไลด์ดิงได้ออกแบบตัวควบคุมพร้อมกับการทดลองกับระบบจริง ในส่วนของ reaching phase ได้มีการออกแบบ membership ได้ดังรูปที่ 3.8 และในส่วนของ control surface ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงการออกแบบ membership



รูปที่ 3.19 กราฟแสดง control surface

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 เกณฑ์ความเสถียรของลาปูนอฟ

เกณฑ์ความเสถียรของ Lyapunov ใช้เพื่อกำหนดความเสถียรของระบบไดนามิกซึ่งอยู่ใกล้หรือบรรจบกับจุดสมดุลโดยไม่ต้องแก้สมการสถานะ พิจารณา

$$\dot{x} = f(x) \quad (3.7)$$

ที่จุดสมดุลที่

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

และมี Function ที่มีเงื่อนไขดังนี้

$$V(x): R^n \rightarrow R \quad (3.9)$$

$$V(x) = 0 \text{ if and only if } x = 0 \quad (3.10)$$

$$V(x) > 0 \text{ if and only if } x \neq 0 \quad (3.11)$$

$$\dot{V}(x) = \frac{d}{dx} V(x) = \sum_{i=0}^n f_i(x) \leq 0 \text{ for all values of } x \neq 0 \quad (3.12)$$

หากระบบเป็นไปตามข้อกำหนดเหล่านี้ จะรับประกันความเสถียรได้อย่างแน่นอน

พิจารณาระบบบอลและคาน

$$\left(\frac{J}{R^2} + m\right) \ddot{r} + d(t) = mg\alpha \quad (3.13)$$

เมื่อ $d(t) = \mathcal{L}_d \text{sign}(\dot{r})$ เป็นสมการที่เราไม่ทราบ

จากสมการสถานะของระบบบอลและคาน $x_1 = r, x_2 = \dot{r}$ และ เอาต์พุต

$$y = r = x_1$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + g(x)u + d_1(t) \end{cases} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } f(x) = 0, g(x) = K_1 = \frac{mg}{\left(\frac{J}{R^2} + m\right)}, d_1(t) = g^{-1}(x)d(t) \quad (3.15)$$

ทฤษฎีที่ 1: จาก Sliding manifold

$$\sigma = ax_1 + x_2 \quad (3.16)$$

และจากกฎการควบคุม

$$u = \frac{1}{K_1}(-ax_2 - \mathcal{L}\text{sign}(\sigma)) \quad (3.17)$$

จุดกำเนิดของระบบเสถียรพิสูจน์โดย :

$$V(x) = \frac{1}{2}\sigma^2 \quad (3.18)$$

ทำการหาอนุพันธ์ของ Lyapunov function

$$\dot{V} = \sigma\dot{\sigma} = \sigma(ax_1 + a\dot{x}_2) \quad (3.19)$$

จากสมการที่ 3.17

$$\dot{V} = \sigma(ax_2 + K_1u + d_1(t)) \quad (3.20)$$

$$\dot{V} = \sigma(d_1(t) - \mathcal{L}\text{sign}(\sigma)) \quad (3.21)$$

$$\dot{V} \leq \sigma(\mathcal{L}_d - \mathcal{L}\text{sign}(\sigma)) \quad (3.22)$$

$$\dot{V} \leq |\sigma|\mathcal{L}_d - |\sigma|\mathcal{L} \quad (3.23)$$

$$\dot{V} \leq -|\sigma|(\mathcal{L}_d - \mathcal{L}) \quad (3.24)$$

กำหนด

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_d + \frac{k}{\sqrt{2}}, k > 0 \quad (3.25)$$

เมื่อ

$$\dot{V} \leq -\frac{k}{\sqrt{2}}|\sigma| \quad (3.26)$$

$$\dot{V} \leq -k\sqrt{V(x)} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่ามีฟังก์ชันต่อเนื่อง $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \geq 0$, V เป็นความแตกต่างต่อเนื่องบน $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$, $\alpha_1, \alpha_2 \in \mathcal{K}_\infty$ และค่าคงที่ $k > 0$

$$\alpha_1(|x|) \leq V(x) \leq \alpha_2(|x|) \quad (3.28)$$

$$\dot{V}(x) = \langle \nabla V(x), f(x) \rangle \leq -k\sqrt{V(x)} \quad (3.29)$$

ที่ $x \neq 0$, จุดกำเนิดจะเป็นจุดที่ระบบเสถียร



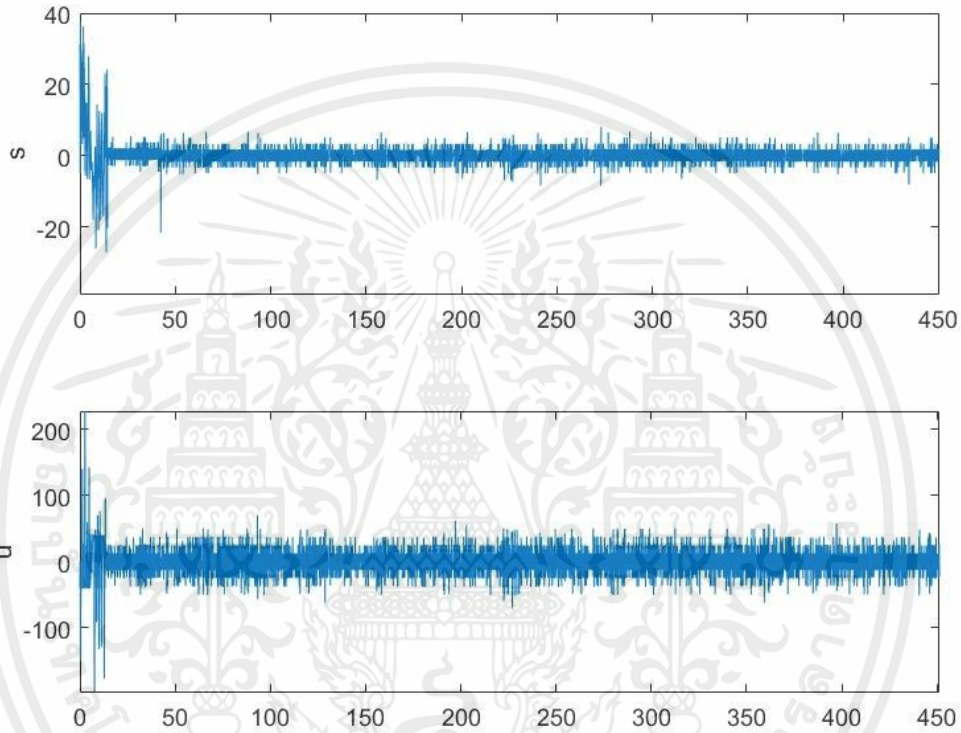
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

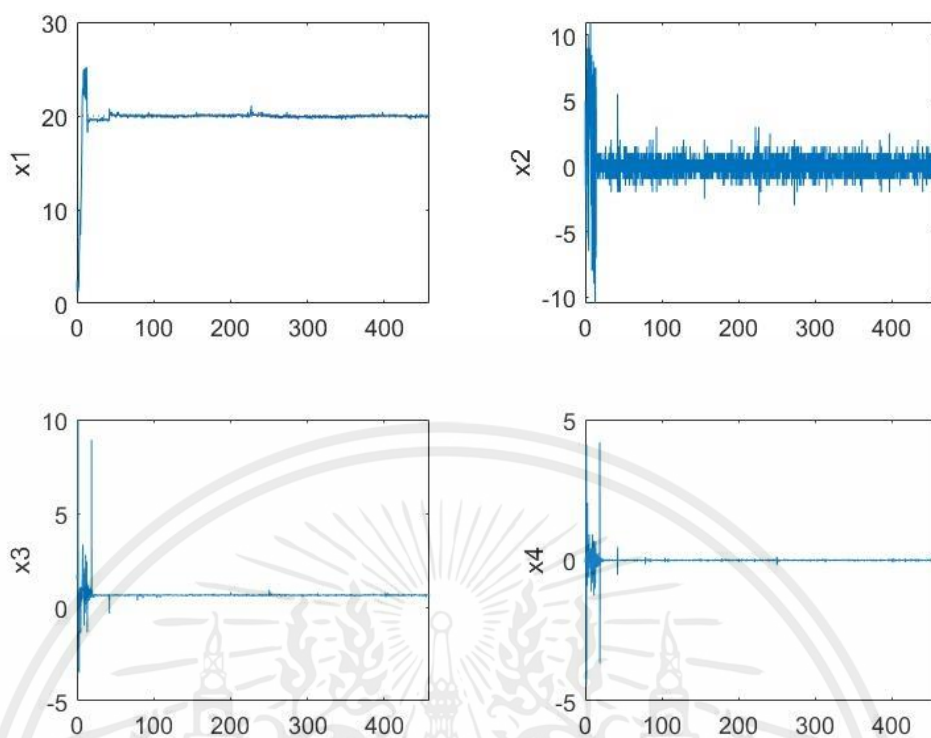
ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งลูกบอลเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = -k \cdot \text{sat}(s)$

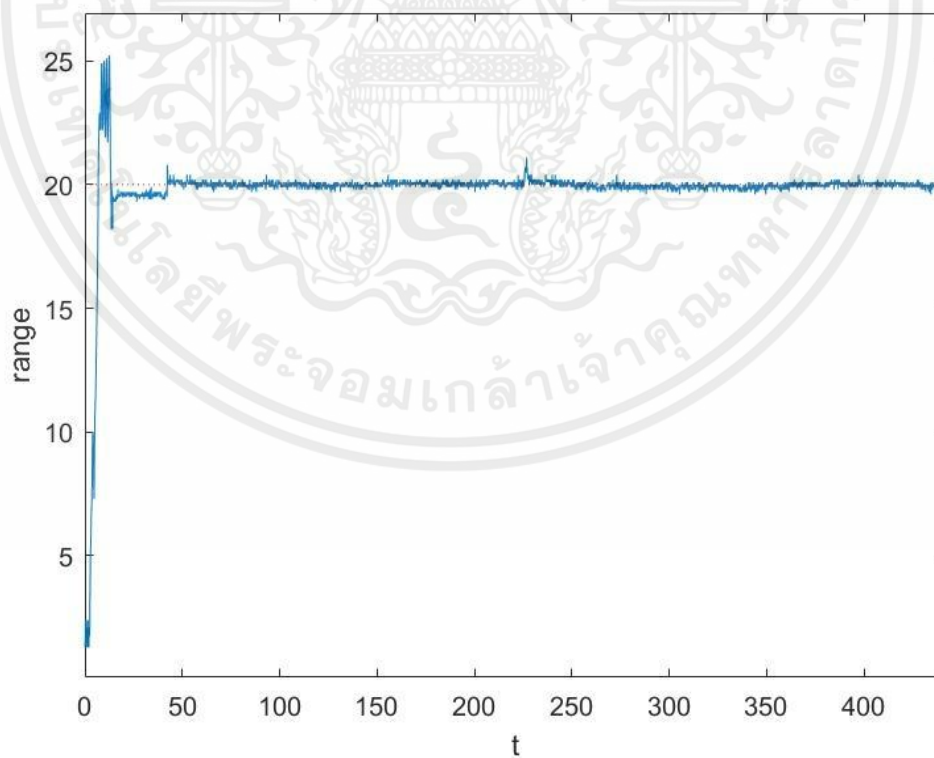
4.1.1 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = -k \cdot \text{sat}(s)$ และที่จุด setpoint = 20 cm.



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิงและสัญญาณควบคุม (sp = 20 cm.)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 (sp = 20 cm.)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา (sp = 20 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

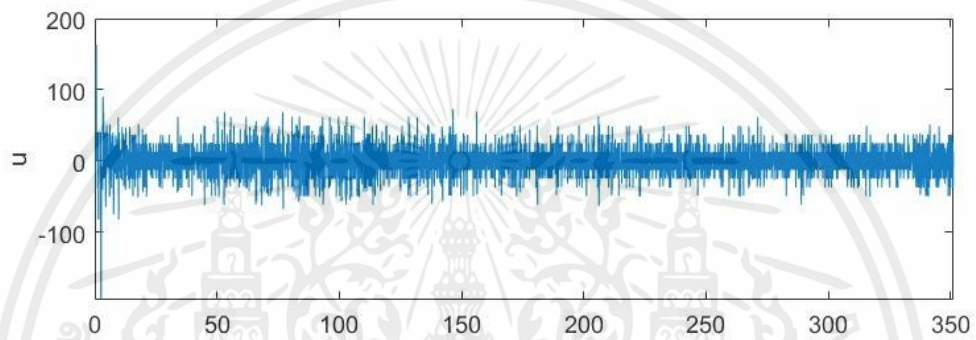
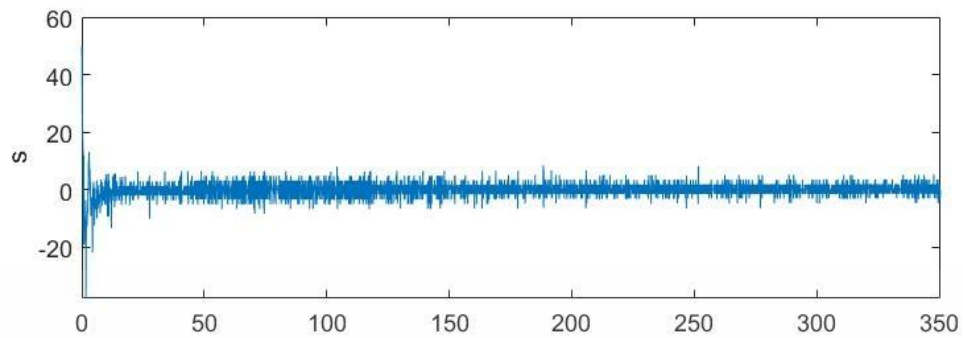
	Second
Rise Time	6.4159
Transient Time	13.0353
Settling Time	13.0267
Settling Min	18.2000
Settling Max	25.2000
Overshoot	26.0000
Peak	25.2000
Peak Time	12.4000

รูปที่ 4.4 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 20 cm.)

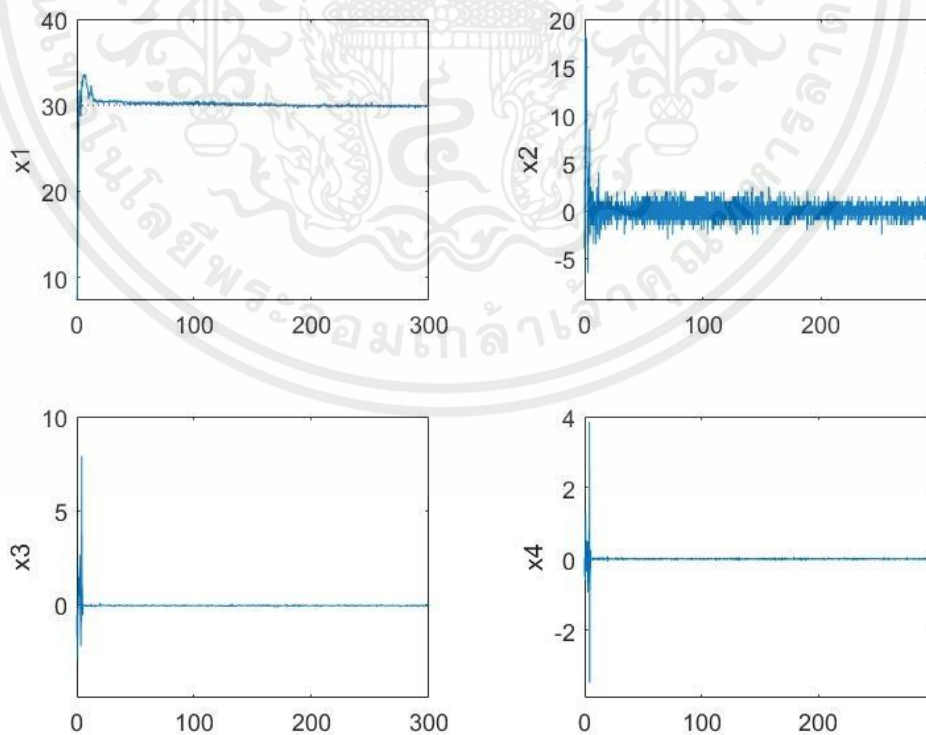


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = -k \cdot \text{sat}(s)$ และที่จุด setpoint = 30 cm.

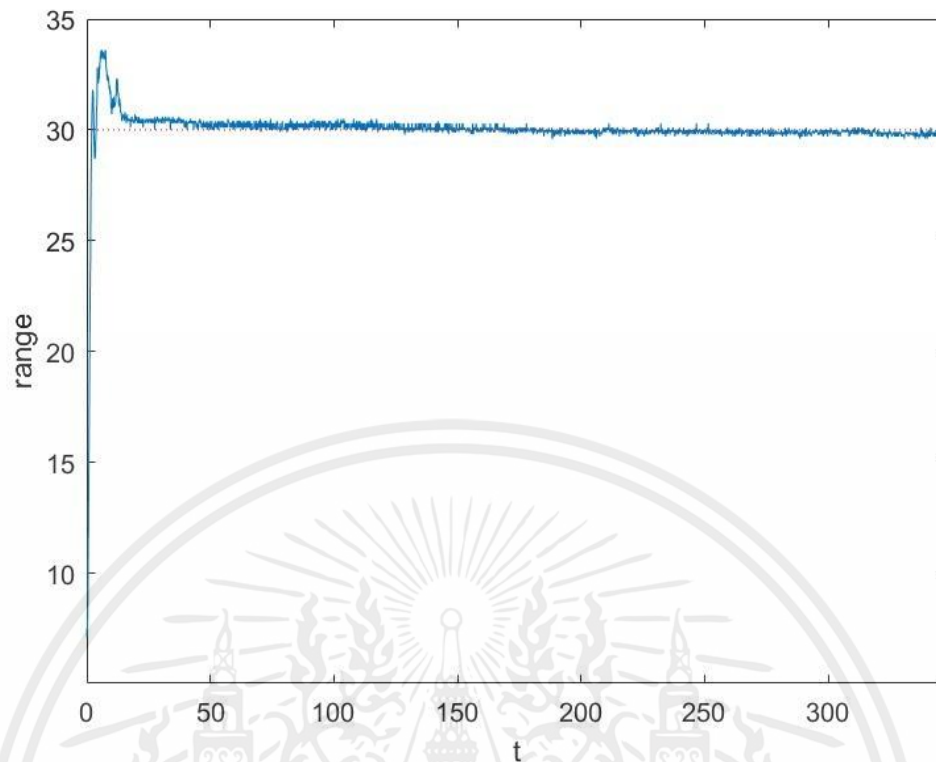


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ้งและสัญญาณควบคุม (sp = 30 cm.)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 (sp = 30 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



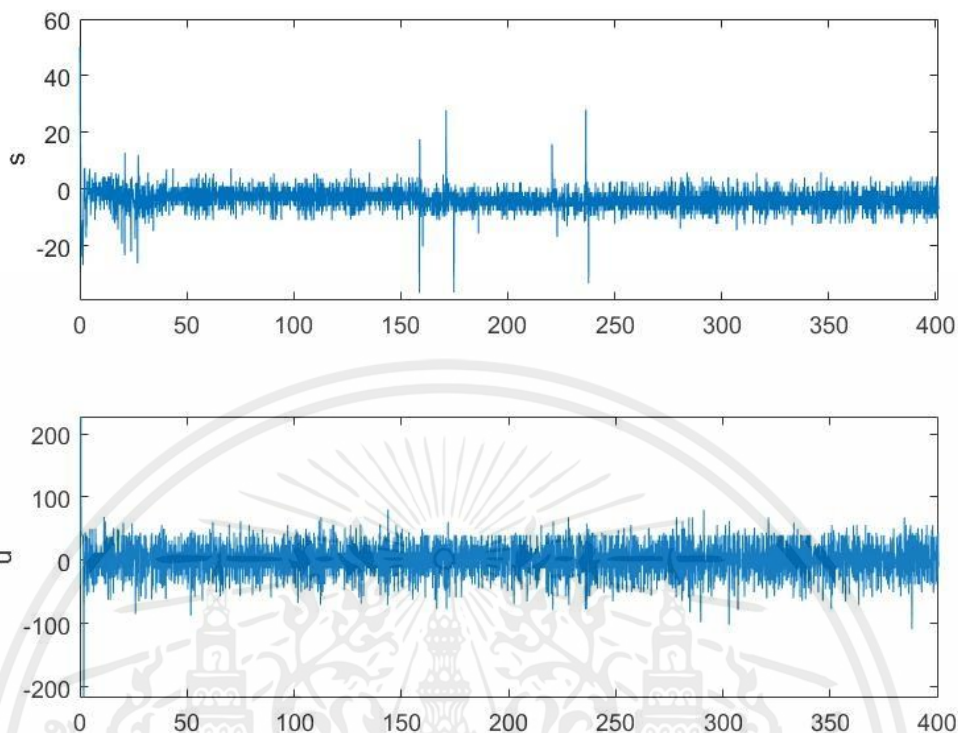
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา (sp = 30 cm.)

	Second
Rise Time	1.6400
Transient Time	12.4025
Settling Time	7.7750
Settling Min	27.6000
Settling Max	33.6000
Overshoot	12.0000
Peak	33.6000
Peak Time	5.9000

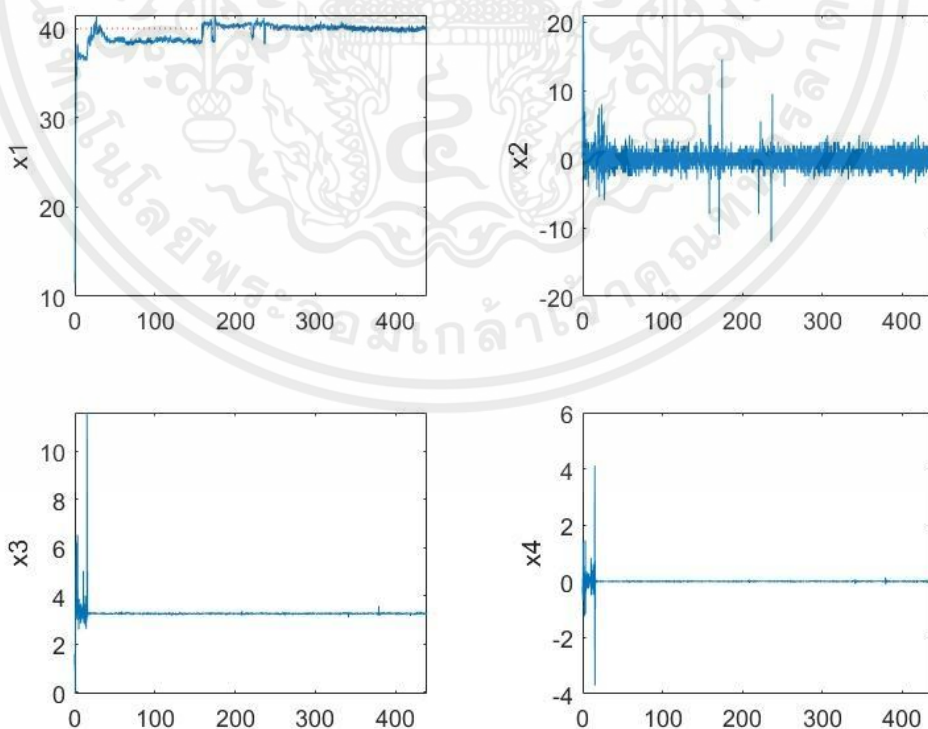
รูปที่ 4.8 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 30 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = -k \cdot \text{sat}(s)$ และที่จุด setpoint = 40 cm.

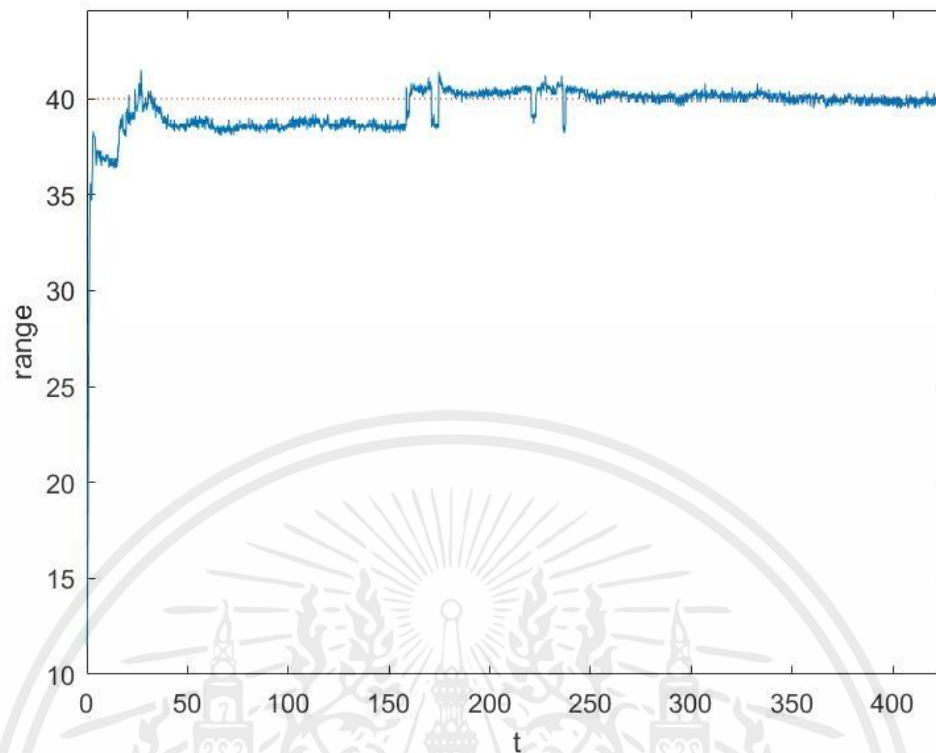


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ้งและสัญญาณควบคุม (sp = 40 cm.)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 (sp = 40 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา (sp = 40 cm.)

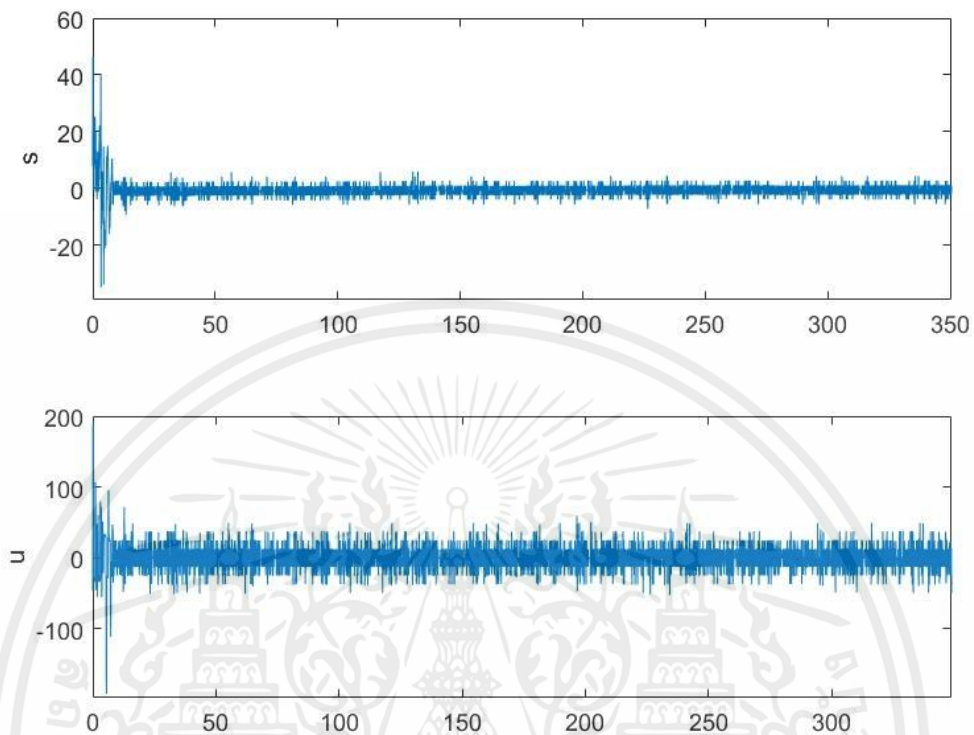
	Second
Rise Time	2.8900
Transient Time	19.4167
Settling Time	15.3500
Settling Min	35.4000
Settling Max	40.5000
Overshoot	1.2500
Peak	40.5000
Peak Time	26.9000

รูปที่ 4.12 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 40 cm.)

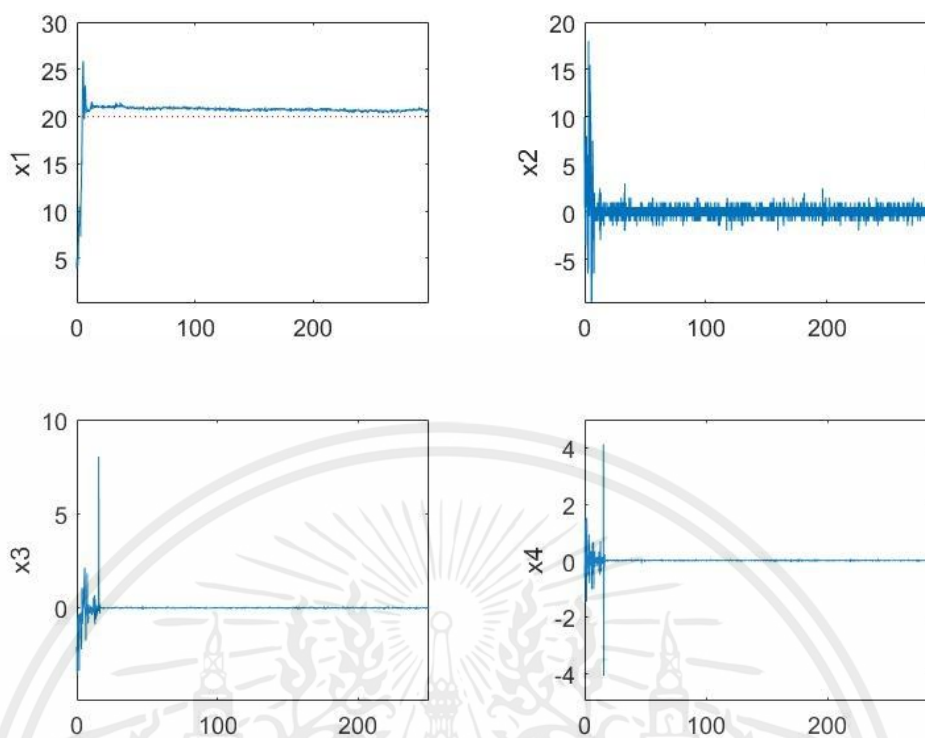
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งลูกบอลเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = -|s|^{\beta} \text{sat}(s)$

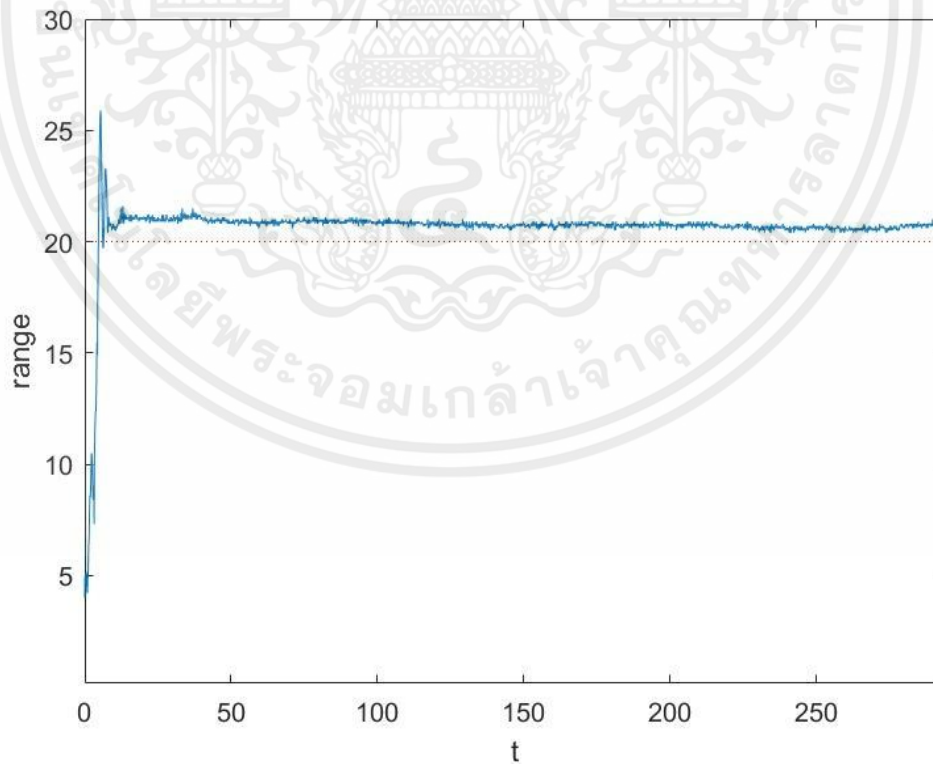
4.2.1 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = -|s|^{\beta} \text{sat}(s)$ และที่จุด setpoint = 20 cm.



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิงและสัญญาณควบคุม (sp = 20 cm.)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 ($sp = 20$ cm.)



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา ($sp = 20$ cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

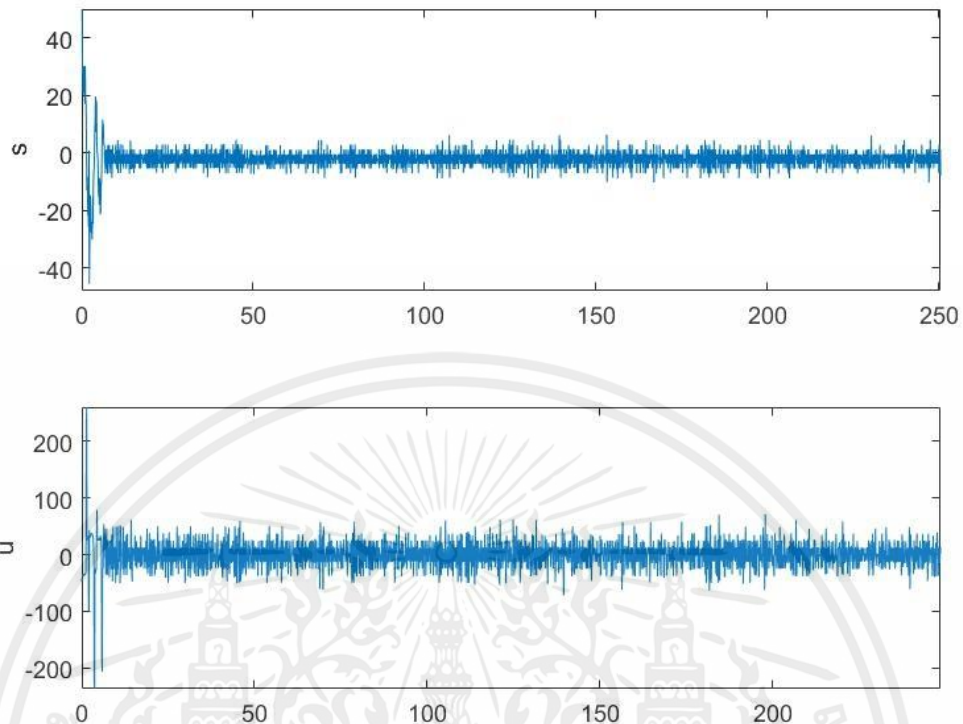
	Second
Rise Time	3.2000
Transient Time	17.2500
Settling Time	17.2000
Settling Min	18.4000
Settling Max	21.9000
Overshoot	9.5000
Peak	21.9000
Peak Time	5.1000

รูปที่ 4.16 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 20 cm.)

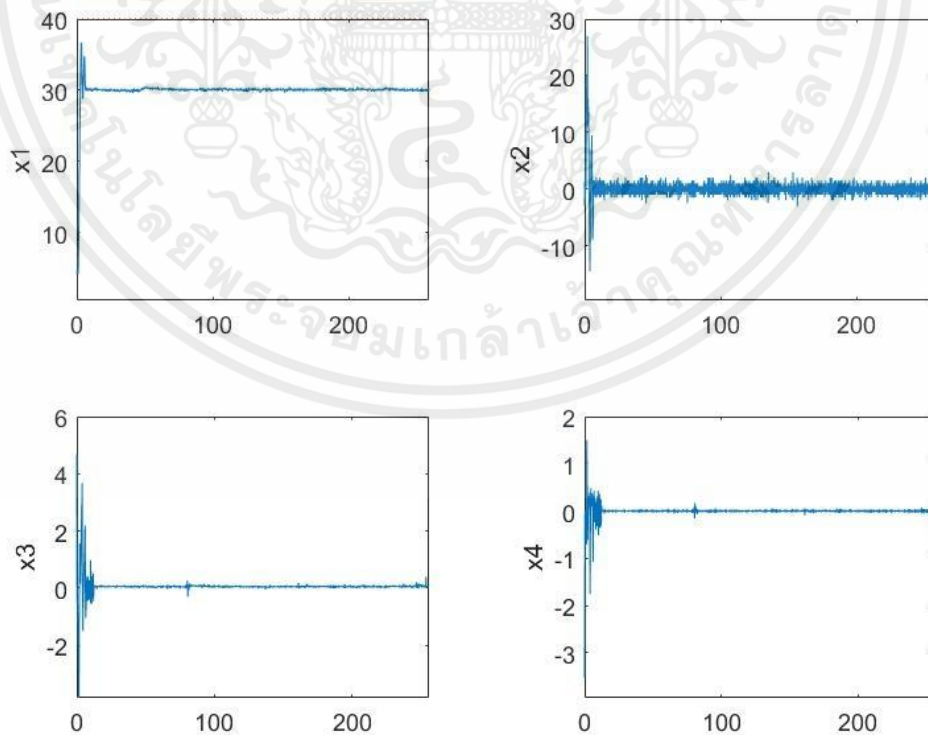


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = -|s|^{\beta} \text{sat}(s)$ และที่จุด setpoint = 30 cm.

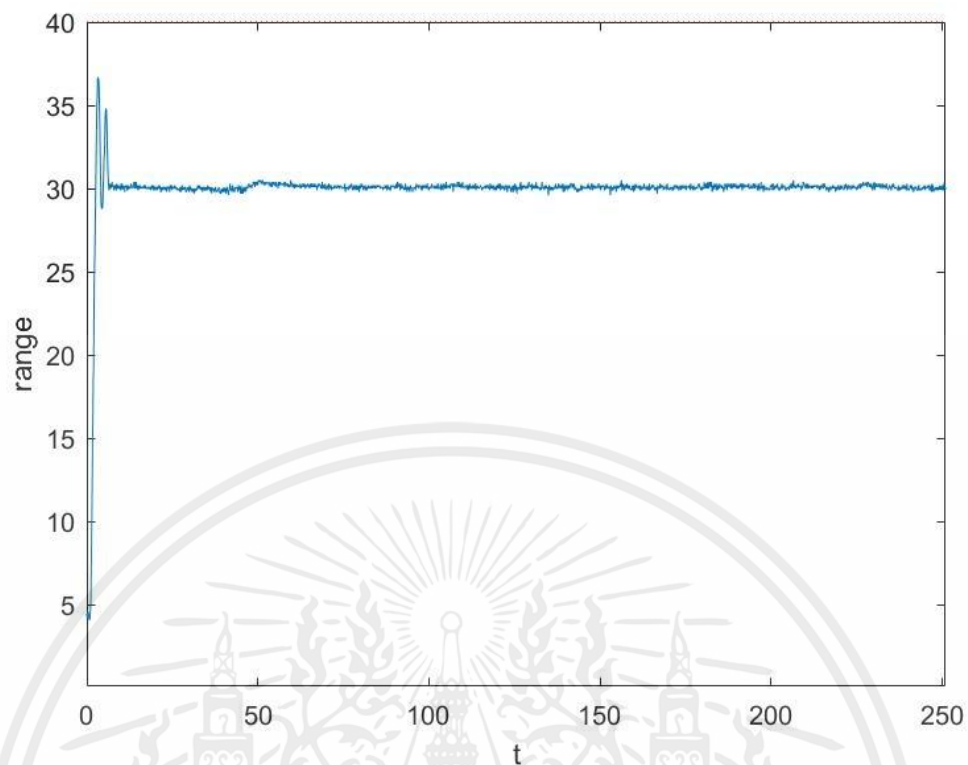


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ้งและสัญญาณควบคุม (sp = 30 cm.)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 (sp = 30 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



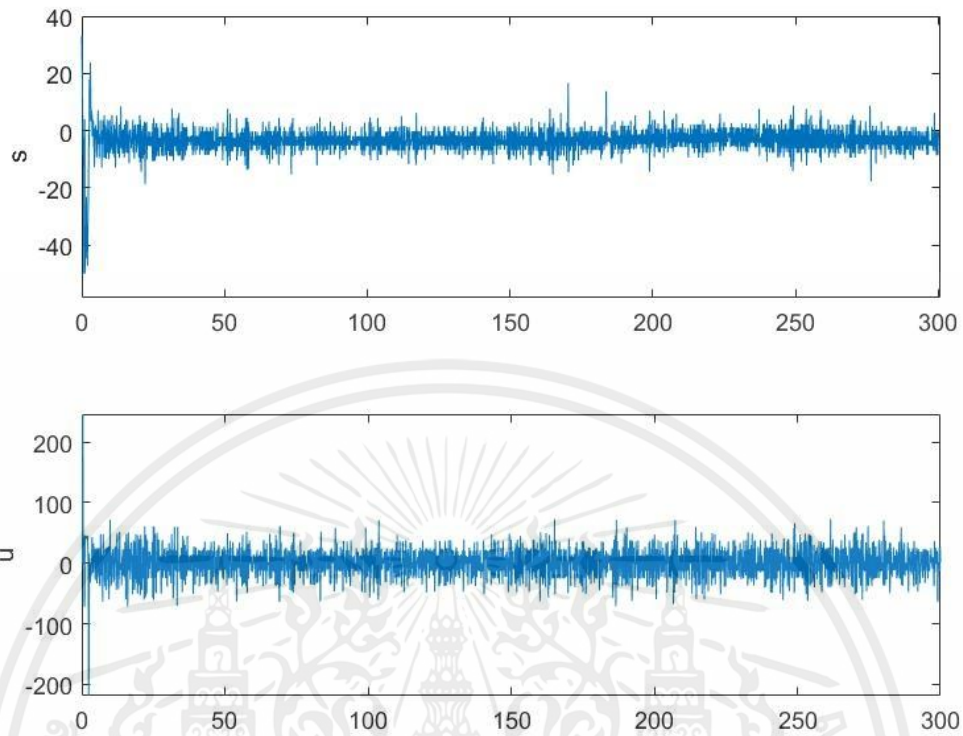
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา (sp = 30 cm.)

	Second
Rise Time	2.3667
Transient Time	2.9350
Settling Time	2.6750
Settling Min	27.2000
Settling Max	30.7000
Overshoot	2.3333
Peak	30.7000
Peak Time	51.1000

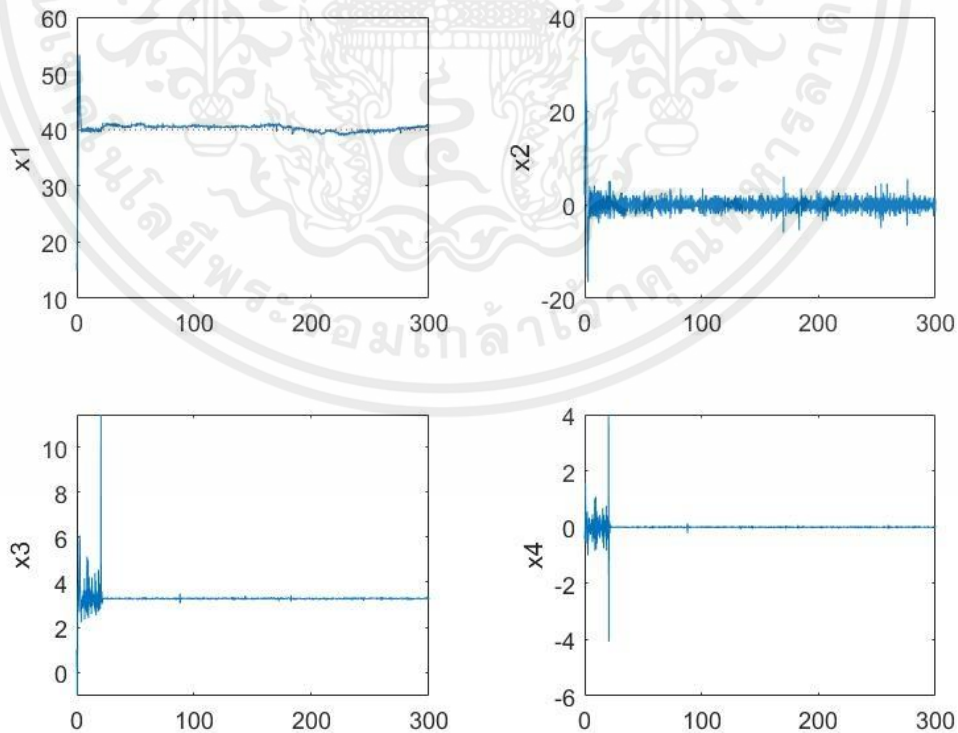
รูปที่ 4.20 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 30 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม $u = -|s|^{\beta} \text{sat}(s)$ และที่จุด setpoint = 40 cm.

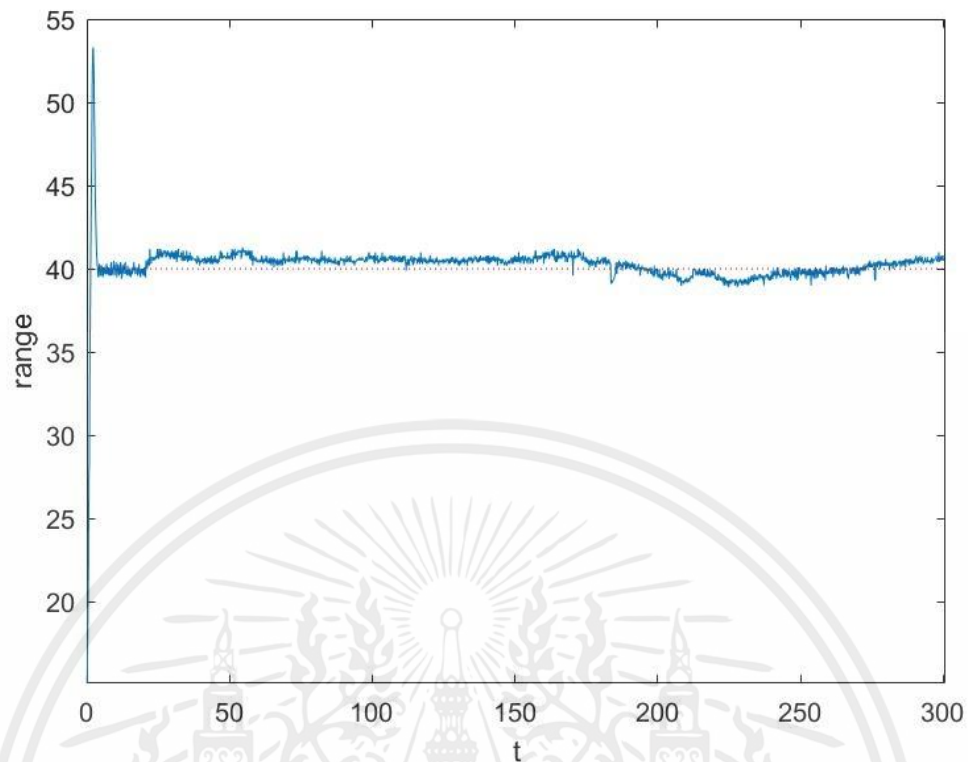


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิ้งและสัญญาณควบคุม (sp = 40 cm.)



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 (sp = 40 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา (sp = 40 cm.)

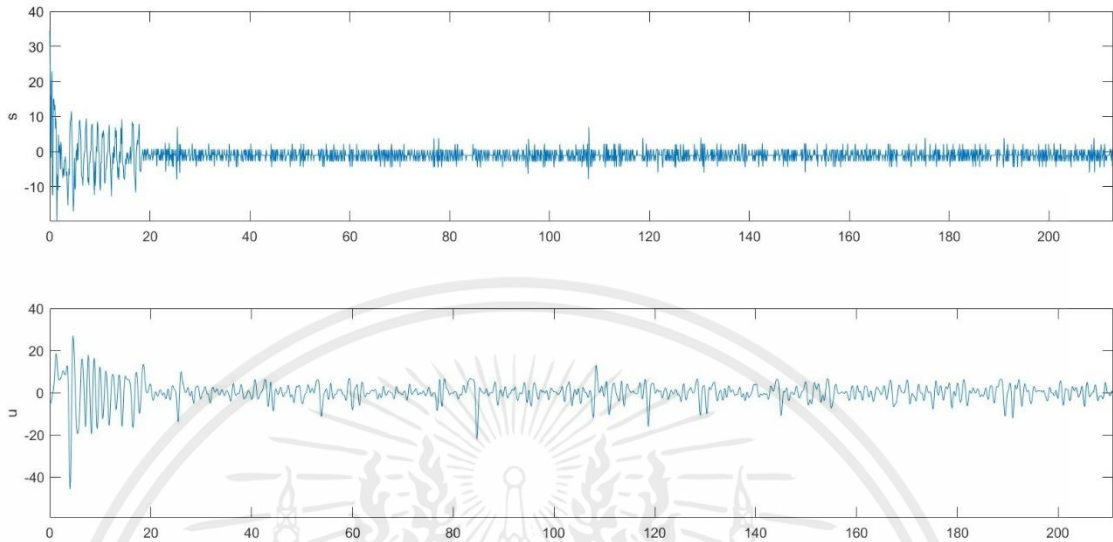
	Second
Rise Time	4.3333
Transient Time	34.0125
Settling Time	33.8000
Settling Min	36.2000
Settling Max	41.4000
Overshoot	3.5000
Peak	41.4000
Peak Time	277

รูปที่ 4.24 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 40 cm.)

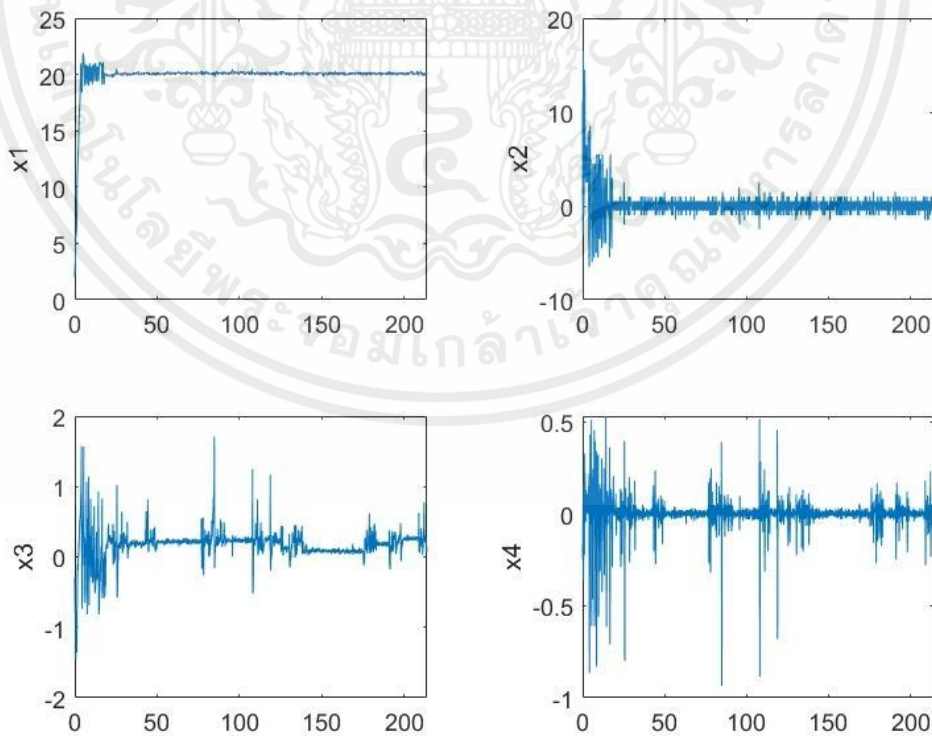
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งลูกบอลเมื่อใช้ตัวควบคุมพีซีเอสไลด์ดิง

4.3.1 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมพีซีเอสไลด์ดิงและที่จุด setpoint = 20 cm.

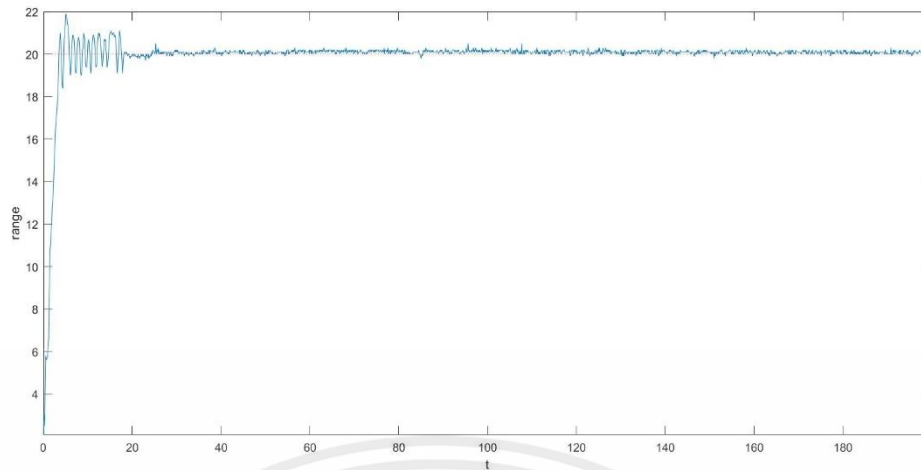


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดหน้าสไลด์ดิงและสัญญาณควบคุม (sp = 20 cm.)



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 (sp = 20 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



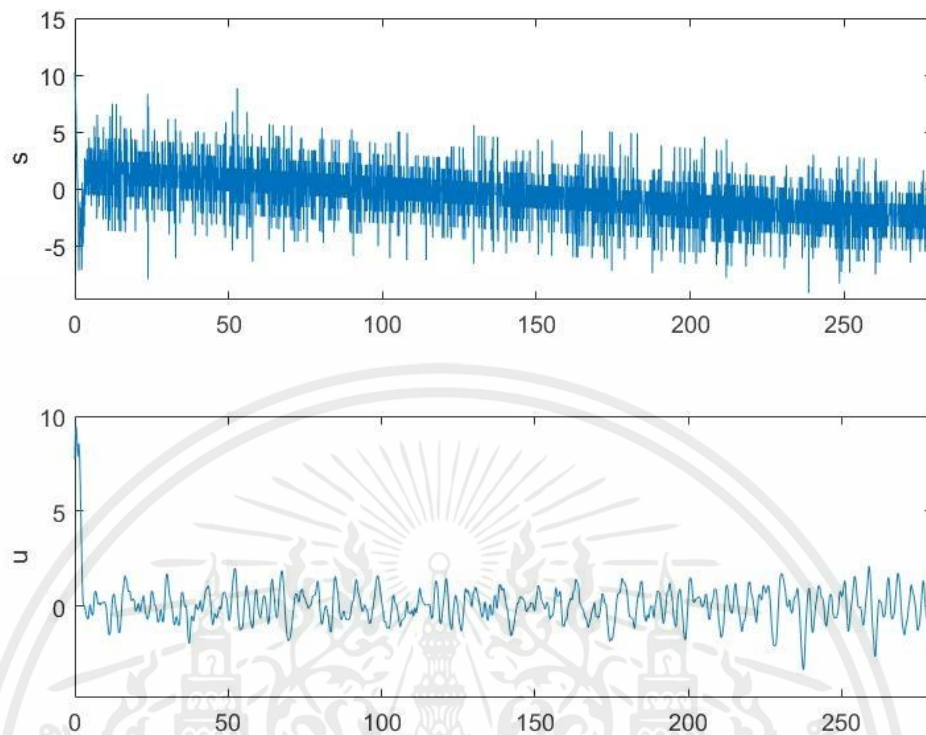
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา (sp = 20 cm.)

	Second
Rise Time	4.5000
Transient Time	13.0000
Settling Time	7.5750
Settling Min	19.1000
Settling Max	25.9000
Overshoot	29.5000
Peak	25.9000
Peak Time	5.4000

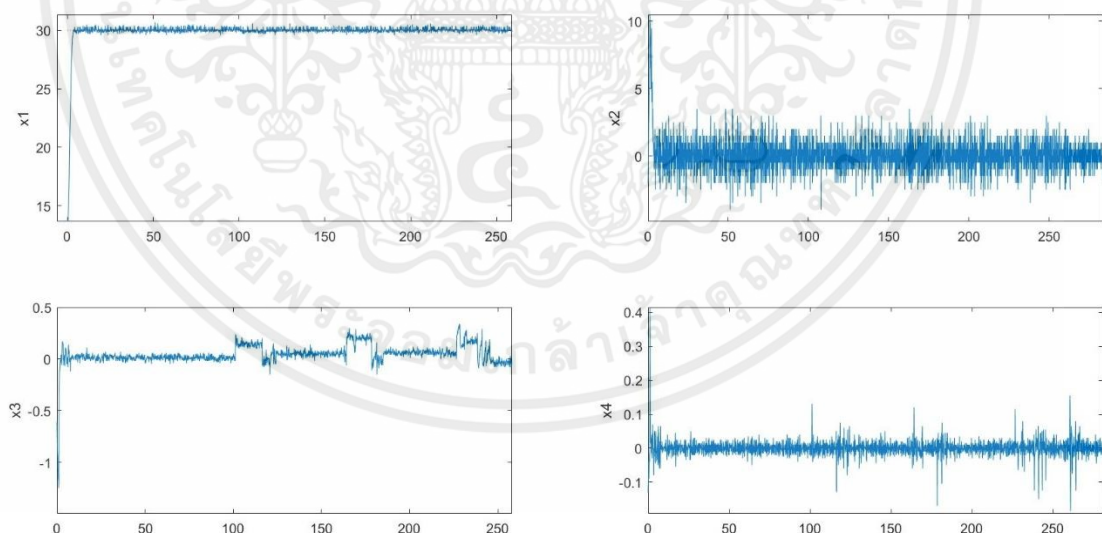
รูปที่ 4.28 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 20 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมพีซีสไลด์ดิงและที่จุด setpoint = 30 cm.

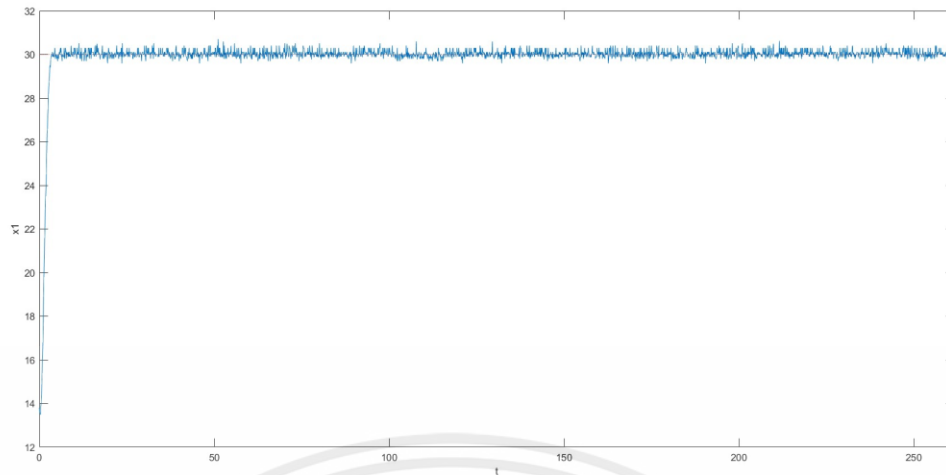


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิงและสัญญาณควบคุม (sp = 30 cm.)



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 (sp = 30 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



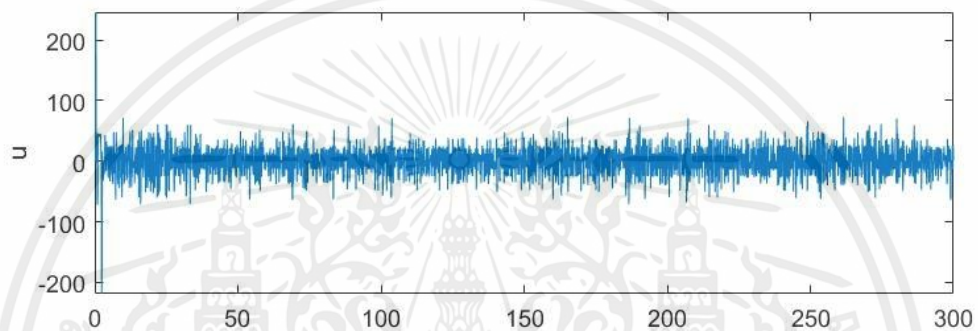
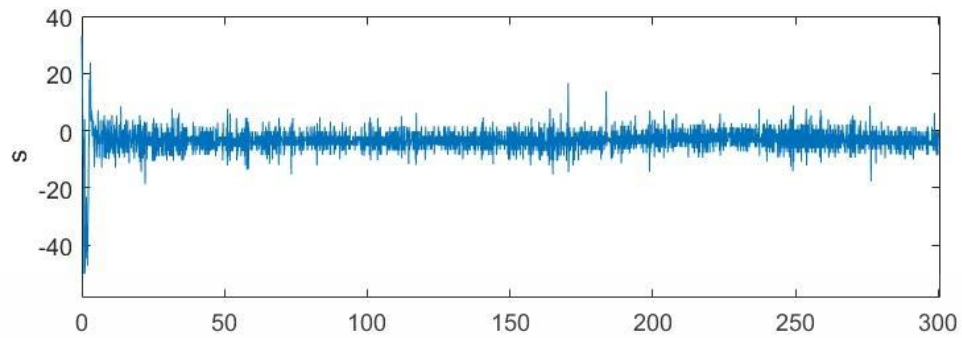
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา (sp = 30 cm.)

	Second
Rise Time	2.4176
Transient Time	5.9810
Settling Time	5.9400
Settling Min	28.4000
Settling Max	36.7000
Overshoot	22.3333
Peak	36.7000
Peak Time	3.3000

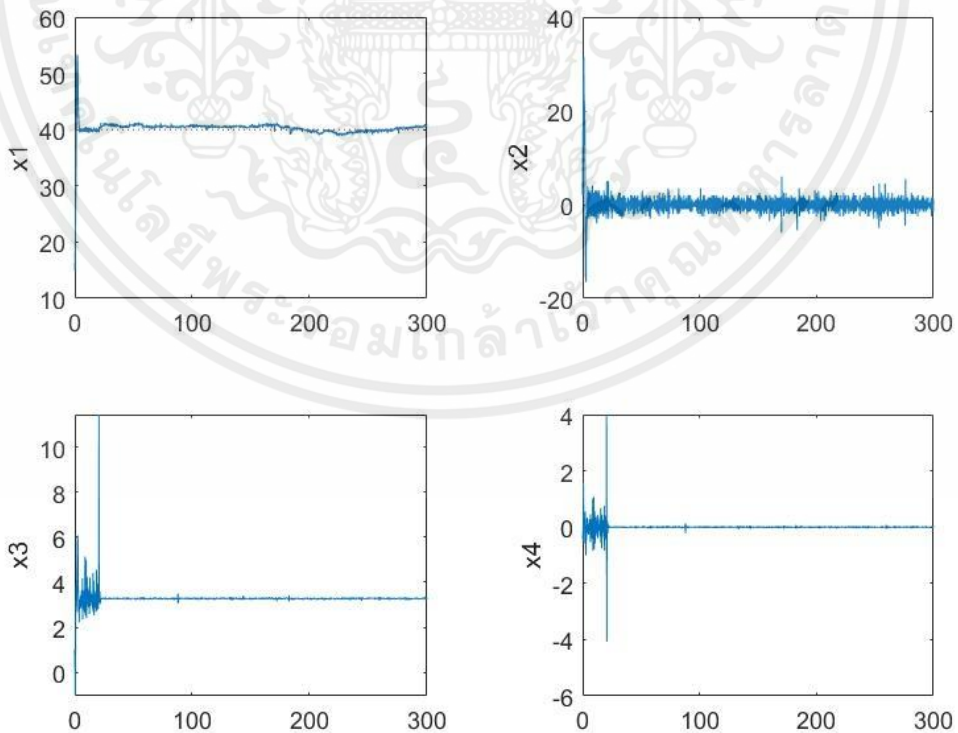
รูปที่ 4.32 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 30 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุมพีซีสไลด์ดิงและที่จุด setpoint = 40 cm.

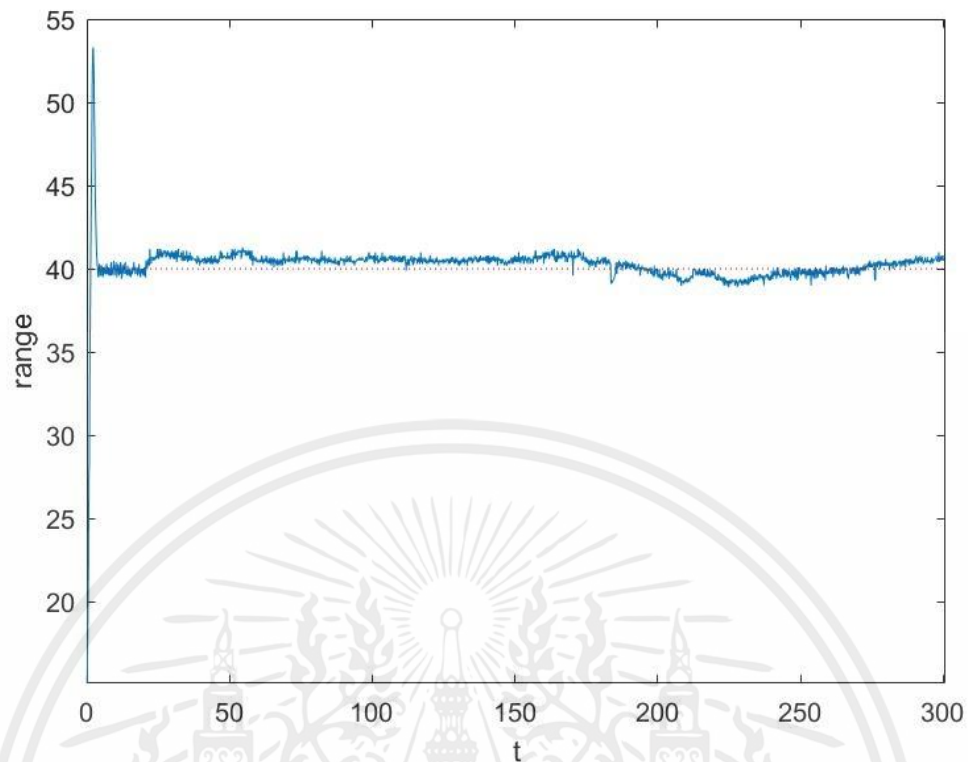


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผิวหน้าสไลด์ดิงและสัญญาณควบคุม ($sp = 40$ cm.)



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสถานะทั้ง 4 ($sp = 40$ cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของลูกบอลและเวลา (sp = 40 cm.)

	Second
Rise Time	1.1682
Transient Time	3.2000
Settling Time	2.9923
Settling Min	36.7000
Settling Max	53.3000
Overshoot	33.2500
Peak	53.3000
Peak Time	2.2000

รูปที่ 4.36 ตารางแสดงผลตอบสนองของระบบ (sp = 40 cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญาณิพนธ์นี้ เป็นการทดลองการควบคุมโดยใช้วิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งมาควบคุมบอลซึ่งอยู่บนคาน โดยออกแบบจากโมเดลที่ได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ โดยเลือกใช้โมเดล ARMAX เนื่องจากโมเดลมีพลวัตของสัญญาณอินพุตและสัญญาณรบกวนที่เหมือนกัน ซึ่งจะมีความสมเหตุสมผลในกรณีที่แบบจำลองดังกล่าว ถูกใช้เพื่ออธิบายพลวัตของระบบที่มีสัญญาณอินพุตและสัญญาณรบกวนมาพร้อมกัน พบว่าเราสามารถหาแบบจำลองของระบบที่มีความใกล้เคียงกับระบบจริงได้อยู่ที่ 94.24 เปอร์เซ็นต์

ในส่วนของการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้ง ได้ออกแบบตัวลดการเกิด chattering เพื่อลดปัญหาการสั่นและปัญหาอื่นที่อาจตามมาจากส่วนของสัญญาณอินพุต โดยเลือกใช้ฟังก์ชันอิมตัวต่อมาทำการปรับเปลี่ยน reaching phase โดยใช้สมการ $u = -|s|^{\beta} \cdot sat(s)$ และพีชชีสไลด์ดิ้ง จากผลการทดลองพบว่า การปรับเปลี่ยน reaching phase ส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น อีกทั้งพบว่า reaching phase แบบ $u = -|s|^{\beta} \cdot sat(s)$ ทำให้การควบคุมที่ setpoint ที่ 30 เซนติเมตร (จุดกลางของคาน) มีประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถใช้ในการลด overshoot ของระบบได้ เมื่อเทียบผลตอบสนองที่ setpoint อื่นๆ การควบคุมโดยใช้พีชชีสไลด์ดิ้งมีผลการควบคุมให้ระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ไวกว่า

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

การควบคุมแบบสไลด์ดิ้งที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน โดยใช้การระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้ Armax ซึ่งสามารถทดลองใช้การระบุเอกลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ เช่น การระบุเอกลักษณ์ทางคณิตศาสตร์แบบลากรองมาใช้แบบในการทดลองของระบบได้

บรรณานุกรม

- [1] Calos G. Bolivar-Vincenty, and Gerson Beauchamp-Baez, “Modeling the Ball-and-Beam System from Newtonian Mechanics and from Lagrange Methods”, Excellence in Engineering to Enhance a Country ‘s Productivity, Ecuador, 2014.
- [2] Karel J. Keesman. “System Identification”, Wageningen : Springer London Dordrecht Heidelberg New York, 2011.
- [3] Hoon Lee, M.S., “Chattering Suppression in sliding mode control system”, dissertation in graduate school of mechanical engineering, Ohio states university. 2007
- [4] Mohammad Khalid Khan, “Design and Application of Second Order Sliding Mode Control Algorithms”, thesis in graduate school of engineering, University of Leicester, 2003
- [5] รศ.ดร.วิฑิต ฉัตรรัตน์กุลชัย. “System Modeling And Control”: เขตบางเขน : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [6] รศ.ดร.วิฑิต ฉัตรรัตน์กุลชัย. “การควบคุมอัตโนมัติขั้นสูง Advanced Automatic Control”: เขตบางเขน : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [7] ประจักษ์ จันดำ, “การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีแบบสไลด์ดิง.” วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2550
- [8] อับดุลฮาฟิซ เจ๊ะโซ๊ะ, “การระบุคุณลักษณะด้วยวิธีพื้นฐานปรินิพันธ์สำหรับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้อแบบอิสระ.” วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2563
- [9] Hassan K. Khalil, "Nonlinear Systems. 3rd edition.". Prentice Hall, 2002
- [10] Kevin M. Passino, Stephan Yurkovich, "Fuzzy Control First Edition", Addison-Wesley, January 1, 1997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [11] Authors: Manivanna Boopathi and A. Abudhahir, “FUZZY SLIDING MODE CONTROL (FSMC), ”Adaptive fuzzy sliding mode controller for wheel slip control in antilock braking system, Journal of Engineering Research 4(2):132-150, June 2016



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้