

ระบบเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ
สำหรับระบบควบคุมลูกบอลลอยตัว



นายธนรัชต์ อุ่นศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**SERVO SYSTEM USING POLE-PLACEMENT
WITH STATE OBSERVER FOR MAGNETIC
LEVITATION BALL CONTROL SYSTEM**

Thanarat Aunsiri



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

ระบบเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ
สำหรับระบบควบคุมลูกบอลลอยตัว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร. กิรติ สุลักษณ์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร. ชโลธร ธรรมแท้)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปีจันทร์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธนรัชต์ อุณศิริ : ระบบเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ สำหรับระบบควบคุมลูกบอลลอยตัว (SERVO SYSTEM USING POLE-PLACEMENT WITH STATE OBSERVER FOR MAGNETIC LEVITATION BALL CONTROL SYSTEM)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 139 หน้า.

ระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก ที่ใช้แรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ายกลูกบอลให้ลอยอยู่บนอากาศ เป็นระบบมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น และไม่มีเสถียรภาพในการทำงาน ปัจจุบันมีการนำระบบดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมและขนส่งมวลชน เช่น ระบบเบร็ลงแม่เหล็กไฟฟ้า รถไฟฟ้าพลังงานแม่เหล็ก แม้กระทั่งการผลิตพลังงานทดแทนอย่างกังหันลมที่กำลังมีการคิดค้นพัฒนาทั้งแนวตั้งที่มีการใช้งานแม่เหล็กลอยในระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้ดีขึ้น มีการศึกษาพัฒนาระบบควบคุมชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและสามารถควบคุมระบบดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตัวควบคุมที่เป็นที่นิยม คือ ตัวควบคุมพีดี หรือตัวชดเชยชนิดเฟสนำหน้า แต่ตัวควบคุมดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการควบคุมต่ำ มีช่วงการทำงานที่แคบ งานวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว สำหรับระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก โครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบ การทำให้เป็นเชิงเส้น การออกแบบตัวควบคุมชนิดป้อนกลับเซอร์โว โดยใช้ค่าป้อนกลับที่ได้จากตัวสังเกตสถานะ ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองของระบบเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ มีการตอบสนองทางพลวัตที่สภาวะชั่วคราวและที่สถานะคงตัวดีขึ้น และทำให้มีช่วงการควบคุมที่กว้างขึ้น 47.37%

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

THANARAT AUNSIRI : SERVO SYSTEM USING POLE-PLACEMENT
WITH STATE OBSERVER FOR MAGNETIC LEVITATION BALL
CONTROL SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPHON
SRISERTPOL, Ph.D., 139 PP.

MAGNETIC LEVITATION SYSTEM / LINEARIZATION / PD CONTROLLER /
SERVO SYSTEM / OBSERVER

The magnetic levitation ball control system is used to levitate the magnetic ball in the air using the electromagnetic force, the system is non-linear and unstable. Nowadays, this system is applied to use in the industrial and mass transit sectors such as magnetic bearings, magnetic levitation trains, and wind turbines, especially the vertical wind turbines which have been developing to increase the electricity production. There is the study of various control systems to maintain the system stability and be able to control such system effectively. The widely popular controller is the PD-controller or the phase lead compensator. However the performance of this controller is inefficient. This research presents the servo system using pole-placement with a state observer and one integrator for magnetic levitation ball control system, mathematical model of system, making linearization, and the design of servo feedback control with state observer. The results of the simulation and experiment of the servo system using pole-placement with the state observer show the improvement of transient dynamics and the constant state which has wider control range at 43.37%.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพ เข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาโดยตลอด และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย และให้โอกาสการทำงานในหลายด้านด้วยความกรุณาเสมอมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ ขำพิศ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบูรณ์ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตากรุณา

คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ และคณะเจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำวิจัยทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน

คุณนิติศักดิ์ หนูมาน้อย ซึ่งเป็นรุ่นพี่ในกลุ่มวิจัย ที่คอยให้คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ ทั้งวิชาความรู้ด้านงานวิจัย และการดำเนินชีวิต

คุณสุนทร โอบสูงาม และคุณนที ฐานมั่น ผู้เป็นเพื่อนร่วมสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ผู้ทำให้ชีวิตการเรียนในระดับบัณฑิตศึกษามีมากกว่าการเรียน

คุณชนวัฒน์ โพธิ์งาม คุณจักรา นันทสุคนธ์ คุณยุทธพร คำชู คุณเฉลิมพล ผิวไหมคำ คุณณรงค์ศักดิ์ สีแก้ว คุณวินัย ตุ่มทอง คุณชามา สารพร ซึ่งเป็นรุ่นพี่ในกลุ่มวิจัยเดียวกัน ผู้ที่เป็นทั้งพี่และเพื่อนที่คอยให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย และการดำเนินชีวิต

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมปอง อุ่นศิริ และคุณแม่กัลยา อุ่นศิริ รวมถึงครอบครัวที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริม และให้โอกาสทางด้านการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ธนรัชต์ อุ่นศิริ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์	2
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แม่เหล็ก	5
2.1.1 แม่เหล็กถาวร	5
2.1.2 แม่เหล็กชั่วคราว	5
2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.3 ระบบควบคุม	9
2.3.1 แนวคิดและความเป็นมาของระบบควบคุม	9
2.3.2 ระบบควบคุมในปัจจุบัน	11
2.3.3 ตัวชดเชยชนิดเฟสนำหน้า และล่าหลัง	12
2.3.4 ตัวควบคุมพีไอดี	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	การออกแบบโดยวิธีการปริภูมิสเตรต	20
2.4.1	การจัดรูปสมการปริภูมิสเตรตในรูปแบบบัญญัติ	22
2.4.2	โพล ซีโร และค่าเจาะจง (Eigenvalues) จากรูปแบบปริภูมิสเตรต	23
2.4.3	การออกแบบระบบควบคุมของระบบที่เขียนอยู่ในรูปแบบปริภูมิสเตรต	25
2.4.4	การออกแบบระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพล	28
2.5	ตัวประมาณค่าตัวแปรสเตรต หรือตัวสังเกตระบบ	30
2.6	การทำให้เป็นเชิงเส้น	34
2.6.1	การทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์	35
2.6.2	การทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยวิธี Jacobian Linearization	37
2.7	จินเนติกอัลกอริทึม	38
2.8	ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	42
2.9	สรุป	45
3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	46
3.1	โครงสร้างพื้นฐานของระบบลูกบอลแม่เหล็กลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	46
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	47
3.3	แรงเคลื่อนไฟฟ้าของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	48
3.4	การทำให้เป็นเชิงเส้น	50
3.5	การระบุเอกลักษณ์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	53
3.6	สรุป	61
4	การออกแบบระบบควบคุม และตัวสังเกตสถานะ	63
4.1	การจัดรูปแบบสมการปริภูมิสเตรตในรูปแบบบัญญัติของตัวควบคุม	63
4.2	ตัวควบคุมพีดี	65
4.3	ระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ	67
4.3.1	การออกแบบระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพล	68
4.3.2	การออกแบบตัวสังเกตสถานะสำหรับระบบควบคุมเซอร์โว	72

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.3	ระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ	75
4.3	สรุป	76
5	การจำลองสถานการณ์ และผลการทดลองการทำงานของระบบลูบอลลอยตัว	
	ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	78
5.1	เครื่องมือทดลองและการติดตั้ง	78
5.2	การควบคุมและรับสัญญาณผ่าน RAPCON Board	81
5.3	การจำลองสถานการณ์และผลการทดลองการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี ..	85
5.3.1	เงื่อนไขขอบเขตการทำงานของตัวควบคุมพีดี	85
5.3.2	การจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี	88
5.3.3	การทดลองการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี	90
5.4	การจำลองสถานการณ์และผลการทดลองการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุม	
	เซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว	94
5.4.1	เงื่อนไขขอบเขตการทำงานของตัวควบคุมเซอร์โว	
	ด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว	94
5.4.2	การจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โว	
	ด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว	96
5.4.3	การทดลองการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โว	
	ด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว	98
5.5	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุมพีดี และตัวควบคุมเซอร์โว	
	ด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ	103
5.4	สรุป	104
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	106
6.1	สรุป	106
6.2	ข้อเสนอแนะ	107
	รายการอ้างอิง	109

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.	การใช้โปรแกรมเงินเนติกอัลกอริทึม	111
ภาคผนวก ข.	โปรแกรมการระบุเอกลักษณ์ของอุปกรณ์ลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	116
ภาคผนวก ค.	โปรแกรมตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ	119
ภาคผนวก ง.	การใช้โปรแกรม Simulation Response Optimization.....	121
ภาคผนวก จ.	ข้อมูลทางเทคนิคของ RAPCON Board การติดตั้ง Hardware และ Software...	126
ภาคผนวก ฉ.	บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	131
ประวัติผู้เขียน		139

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	กำหนดตัวแปรสำหรับการระบุเอกลักษณ์.....	55
3.2	ข้อมูลของชุดอุปกรณ์ลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทราบค่า.....	56
3.3	ขอบเขตของค่าตัวแปรในโปรแกรมเงินเนติกอัลกอริทึม	57
3.4	แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ของระบบ โดยวิธีเงินเนติกอัลกอริทึม.....	59
5.1	แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Board	80
5.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซนเซอร์	85
5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับสัญญาณที่วัดได้จริง.....	87
6.1	ตารางเปรียบเทียบผลการทดลองของตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ.....	106

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงแผนผังระบบควบคุมแบบวงเปิด	10
2.2	แสดงแผนผังระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	11
2.3	ระบบที่ใช้ตัวชดเชยผสมผสานระหว่างตัวชดเชยแบบเฟสล้ำหลังกับนำหน้า	14
2.4	ตัวควบคุมพีไอดีของระบบการควบคุมแบบวงปิด	15
2.5	ตัวควบคุมแบบสัดส่วน	16
2.6	รูปภาพแสดงระบบควบคุมพร้อมกับตัวประมาณค่าสเตตหรือตัวสังเกตระบบ	25
2.7	รูปแบบของการออกแบบระบบควบคุมแบบปริภูมิสเตต	27
2.8	แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมเซอร์โว Type - 1	28
2.9	แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต	33
2.10	การประมาณค่าเส้นตรงของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ณ จุดที่ระบบทำงานปกติ	35
3.1	แสดงโครงสร้างระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	47
3.2	แผนภาพแสดงแรงที่กระทำต่อลูกบอล	47
3.3	แสดงการระบุเอกลักษณ์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยวิธีปัญญาประดิษฐ์	54
3.4	แสดงการกระจัดของลูกบอลแม่เหล็กในรูปของแรงดันไฟฟ้า	58
3.5	แสดงการกระจัดของลูกบอลแม่เหล็กที่ได้จากการทดลองในรูปของแรงดันไฟฟ้า	58
3.6	แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าเฉลี่ยที่ได้ จากการระบุเอกลักษณ์	59
3.7	แสดงแผนภาพตำแหน่งโพลและซีโรของระบบวงเปิด	61
4.1	แสดง Block Diagram ของเอาต์พุตที่ต้องการ	64
4.2	แผนภาพแบบจำลองการใช้โปรแกรมหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีดี ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	66
4.3	แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมพีดี	67
4.4	แผนภาพการทำงานของระบบเซอร์โวบนตัวสังเกตระบบ	67
4.5	แผนภาพการทำงานของระบบเซอร์โวขณะไม่มีตัวสังเกตระบบ	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพล ร่วมกับตัวสังเกตสถานะ..... 75
5.1	อุปกรณ์สร้างสนามแม่เหล็กพร้อมแท่นวาง และลูกบอลแม่เหล็กถาวร 79
5.2	บอร์ด RAPCON, อแดปเตอร์สำหรับไฟเลี้ยงบอร์ด เชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover เข้าสู่ PCI Serial Card ของคอมพิวเตอร์ 80
5.3	แสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ MATLAB/Simulink กับ RAPCON Board ในการป้อนค่าสัญญาณให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ 82
5.4	แสดงบล็อก Pulse Output ที่ใช้ในการส่งสัญญาณควบคุมไปสู่อุปกรณ์ทดลอง 82
5.5	แสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ MATLAB/Simulink กับ RAPCON Board ในการรับค่าสัญญาณจาก Hall Effect Sensor..... 84
5.6	แสดงบล็อก Analog Input ที่ใช้ในการรับสัญญาณป้อนกลับ..... 84
5.7	แสดงผลการทำงานของตัวควบคุมพีดีเพื่อใช้กำหนดขอบเขตการทำงาน 86
5.8	แสดงขอบเขตการทำงาน และจุดปฏิบัติงานของตัวควบคุมพีดี 87
5.9	แสดงเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับสัญญาณที่วัดได้ 88
5.10	แสดงสัญญาณอินพุตอ้างอิงสำหรับการจำลองสถานการณ์และการทดลองระบบ ด้วยตัวควบคุมพีดี..... 89
5.11	แสดงผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี 90
5.12	แสดงผลการทดลองการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี 91
5.13	แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าควบคุมการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี..... 91
5.14	แสดงสัญญาณความผิดพลาดของการทดลองระบบด้วยตัวควบคุมพีดี..... 92
5.15	แสดงผลการตอบสนองทางพลวัตต่อสัญญาณอินพุตแบบฮาร์โมนิกด้วยตัวควบคุมพีดี 93
5.16	แสดงผลการทำงานของตัวควบคุมเซอร์โวเพื่อใช้กำหนดขอบเขตการทำงาน 95
5.17	แสดงขอบเขตการทำงาน และจุดปฏิบัติงานของตัวควบคุมเซอร์โว 95
5.18	แสดงสัญญาณอินพุตอ้างอิงสำหรับการจำลองสถานการณ์และการทดลองระบบ ด้วยตัวควบคุมเซอร์โว 97
5.19	แสดงผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โว 97
5.20	แสดงผลการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โว 99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.21	แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าควบคุมการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โว..... 99
5.22	แสดงสัญญาณความผิดพลาดของการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โว 101
5.23	แสดงผลการตอบสนองทางพลวัตต่อสัญญาณอินพุตแบบฮาร์โมนิก ด้วยตัวควบคุมเซอร์โว 102
ก.1	ข้อมูลการทดลองใน Work Space 112
ก.2	หน้าต่าง GATool 112
ก.3	การตั้งค่าวัตถุประสงค์และจำนวนตัวแปร..... 113
ก.4	การกำหนดค่าขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการค้นหา..... 113
ก.5	การกำหนดชนิดและขนาดของจำนวนประชากร 114
ก.6	แผนภาพการเลือก Selection Function 114
ก.7	การกำหนดเงื่อนไขการตัดสินใจในการหยุดการค้นหา..... 115
ก.8	การกำหนดหน้าต่างแสดงผลระหว่างการค้นหา..... 115
ค.1	โปรแกรมตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ 120
ง.1	แผนภาพแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink 122
ง.2	แผนภาพแสดง Signal Constraint Window 122
ง.3	แผนภาพแสดง Edit Desired Response 123
ง.4	แผนภาพแสดง Add Parameters..... 123
ง.5	แผนภาพแสดง Add Parameters..... 124
ง.6	แผนภาพแสดง Option ของการ Optimization 124

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

B	=	ความเหนี่ยวนำแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์ (<i>Tesla</i> = $N / A \cdot m$)
Φ	=	ฟลักซ์แม่เหล็ก (<i>Weber</i> = Wb)
H	=	สนามแม่เหล็ก ($Wb / A \cdot m$)
Ni	=	แรงเคลื่อนแม่เหล็ก
μ	=	ค่า Permeability หรือ ค่าบ่งบอกคุณสมบัติของสารแม่เหล็ก ($V.s / A.m$)
μ_0	=	ค่า Permeability ของอากาศ ($V.s / A.m$)
μ_r	=	ค่า Relative Permeability หรือค่าความซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ของสารตัวกลาง
A	=	พื้นที่หน้าตัดที่เกิดฟลักซ์แม่เหล็ก (m^2)
N	=	จำนวนรอบขดลวด (<i>rev</i>)
f, F	=	แรงแม่เหล็ก (N)
m	=	มวลของลูกบอลแม่เหล็กถาวร (kg)
y	=	การกระจัดในทิศทาง y (m)
Y_0	=	ระยะกระจัดที่ตำแหน่งสมดุลในทิศทาง y (m)
i	=	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด (A)
g	=	ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก ($9.81 m/s^2$)
k	=	ค่าคงที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ($kg.m^5/s^2/A$)
R	=	ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ (Ω)
L	=	ความเหนี่ยวนำของขดลวด (H)
L_0	=	ความเหนี่ยวนำของลูกบอลแม่เหล็กถาวร (H)
c_0	=	ค่าคงที่ของ Hall Effect Sensor
c_1	=	ค่าคงที่ของ Hall Effect Sensor
c_2	=	ค่าคงที่ของ Hall Effect Sensor
v	=	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม Hall Effect Sensor (V)
v_e	=	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม Hall Effect Sensor ที่ตำแหน่งสมดุล (V)
δv	=	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม Hall Effect Sensor เทียบกับตำแหน่งสมดุล (V)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

u	=	สัญญาณอินพุตให้แก่ระบบ (V)
u_e	=	สัญญาณอินพุตให้แก่ระบบที่ตำแหน่งสมดุล (V)
δu	=	สัญญาณอินพุตให้แก่ระบบเทียบกับสัญญาณอินพุตตำแหน่งสมดุล (V)
z	=	ผลการตอบสนองที่ได้จากระบบ (m)
x_1	=	การกระจัดในทิศทาง y (m)
x_2	=	ความเร็วในทิศทาง y (m/s)
x_3	=	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด (A)
x_{1e}	=	การกระจัดที่ตำแหน่งสมดุลในทิศทาง y (m)
x_{2e}	=	ความเร็วตำแหน่งสมดุลในทิศทาง y (m/s)
x_{3e}	=	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดที่ตำแหน่งสมดุล x_{1e} (A)
δx_1	=	การกระจัดในทิศทาง y เทียบกับตำแหน่งสมดุล (m)
δx_2	=	ความเร็วในทิศทาง y เทียบกับความเร็วตำแหน่งสมดุล (m/s)
δx_3	=	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเทียบกับกระแสตำแหน่งสมดุล (A)
K_e	=	ค่าอัตราขยายของตัวสังเกต
\hat{K}	=	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเซอร์โว
K_p	=	ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม P
K_I	=	สัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม I
K_D	=	สัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม D
T_i	=	ค่า Time Constant ของตัวควบคุม I
T_d	=	ค่า Time Constant ของตัวควบคุม D
e	=	ค่าความผิดพลาดของการทำงานระหว่างระบบและตัวสังเกต
\mathcal{G}	=	เมทริกซ์ความสังเกตได้
β	=	เมทริกซ์ความควบคุมได้
ω_n	=	ความถี่ธรรมชาติของระบบ (rad/s)
ω_d	=	ความถี่การสั่นหน่วงของระบบ (rad/s)
ζ	=	อัตราส่วนความหน่วง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีในภาคอุตสาหกรรมและการคมนาคมต่าง ๆ ได้มีการนำระบบการใช้แม่เหล็กลอยมาใช้งานมากขึ้น เช่น รถไฟพลังแม่เหล็ก ระบบเบรคแม่เหล็ก กังหันผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมซึ่งมีตัวรองรับเป็นระบบแม่เหล็กลอย เป็นต้น ผู้วิจัยได้เห็นถึงความสำคัญของระบบดังกล่าวที่จะมีบทบาทมากขึ้นในอนาคต โดยการควบคุมลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก เป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ ไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากแรงแม่เหล็ก และระบบมีลักษณะเป็น Type - 0 มีการศึกษาค้นคว้าและนำวิธีการควบคุมชนิดต่าง ๆ มาใช้ควบคุมเพื่อให้ลูกบอลสามารถลอยบนอากาศ และมีผลการตอบสนองตามที่ต้องการ ซึ่งเป็นระบบที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางระหว่างลูกบอลถึงแกนเหล็กกับกระแสที่ป้อนให้แก่ขดลวด เพื่อสร้างแรงแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากตัวควบคุมพีดีซึ่งเป็นตัวควบคุมที่นิยมใช้สำหรับระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กให้ผลการตอบสนองที่ไม่มีประสิทธิภาพ มีความผิดพลาดที่สถานะสมดุล และมีช่วงการควบคุมที่แคบ งานวิจัยนี้นำเสนอการประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้นในช่วงการทำงาน โดยรอบระยะปฏิบัติการของลูกบอลแม่เหล็ก และการออกแบบระบบควบคุมแบบเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว สืบเนื่องจากการควบคุมแบบเซอร์โวเป็นระบบควบคุมชนิดป้อนกลับ ต้องทำงานร่วมกับตัวสังเกตสถานะทำหน้าที่แทนเครื่องมือวัด เพื่อทำการประมาณสถานะของตัวแปรสแตตในระบบเพื่อใช้ในการป้อนกลับของระบบควบคุม โดยระบบควบคุมแบบเซอร์โวมี่คุณสมบัติทำให้ระบบเป็น Type - 1 ส่งผลให้ระบบมีค่าความผิดพลาดที่สถานะสมดุลมีค่าเข้าสู่ศูนย์ ได้ผลการตอบสนองตามสัญญาณอินพุตที่ต้องการ และมีระยะควบคุมเพิ่มขึ้น โดยสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยไปพัฒนาออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบที่ต้องการผลการตอบสนองที่สถานะสมดุลตามสัญญาณอินพุตอ้างอิง ตัวควบคุมชนิดเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ เป็นตัวควบคุมชนิดหนึ่งที่สามารถตอบ โจทย์ได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาและออกแบบตัวควบคุมระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอาศัยการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อควบคุมระบบให้มีผลการตอบสนองตามต้องการ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบลูกบอลแม่เหล็กลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

1.3.2 ลูกบอลที่ใช้ทดสอบเป็นลูกบอลแม่เหล็กถาวรทรงกลมมีมวล 0.0413 กิโลกรัม

1.3.3 พิจารณาผลกระทบของแรงที่กระทำต่อลูกบอลแม่เหล็กเฉพาะแรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และแรงซึ่งเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกเท่านั้น

1.3.4 อัลกอริทึมที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ และทำการทดลองจริงจากโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.3.5 ออกแบบตัวควบคุมชนิดเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะเพื่อควบคุมลูกบอลให้ลอยกลางอากาศได้อย่างมีเสถียรภาพและมีผลตอบสนองตามต้องการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพิ่มพูนองค์ความรู้ในการแก้ไขปัญหาสมการระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

1.4.2 สามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตในระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แทนการใช้เครื่องมือวัด

1.4.3 สามารถนำทฤษฎีมาปฏิบัติใช้ในการควบคุมให้สามารถใช้งานได้จริง

1.4.4 เพิ่มพูนความรู้และทักษะในทางวิศวกรรม และสามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อใช้ประโยชน์ในทางวิชาการและภาคอุตสาหกรรม

1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า พื้นฐานระบบควบคุมประเภทต่าง ๆ ตัวควบคุมเซอร์โว ตัวสังเกตสถานะ การจัดรูปแบบสมการปริภูมิสแตต การทำให้เป็นเชิงเส้น การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การจัดรูปสมการปริภูมิสเตต การประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้นเพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาสมการได้ และประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบด้วยเงินเนติกอัลกอริทึม

บทที่ 4 กล่าวถึงการจัดรูปสมการปริภูมิสเตตให้อยู่ในรูปแบบบัญญัติของการควบคุมเพื่อง่ายต่อการออกแบบระบบควบคุม การออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ และการออกแบบตัวควบคุมพีดี พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 5 กล่าวถึงอุปกรณ์โปรแกรมในการเขียนอัลกอริทึมเพื่อใช้ในการควบคุมระบบ อุปกรณ์เชื่อมต่อ เครื่องมือทดลอง ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองการควบคุมการลอยตัวของลูกบอลด้วยสนามแม่เหล็ก การเปรียบเทียบผลการทดลองกับตัวควบคุมพีดี พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากแม่เหล็กถาวรเริ่มเข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้น มีการประยุกต์ใช้แม่เหล็กถาวรเข้ามาทดแทนอุปกรณ์ดั้งเดิมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน เช่น ระบบแบร์ริงแม่เหล็ก ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมที่มีอุปกรณ์รองรับเป็นระบบแม่เหล็กถาวร รถไฟฟ้าพลังงานแม่เหล็ก เป็นต้น การออกแบบระบบควบคุมเพื่อใช้ในระบบแม่เหล็กถาวรสามารถทำได้หลายวิธี การควบคุมระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพและไม่เป็นเชิงเส้น งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบระบบควบคุมลูกบอลแม่เหล็กถาวรด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบด้วยตัวสังเกตสถานะและเพิ่มอินทิเกรต 1 ตัว

หลักการในการออกแบบตัวควบคุมนั้น เริ่มต้นด้วยการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก ประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้น เนื่องจากแรงแม่เหล็กเป็นลักษณะของแรงที่ไม่เป็นเชิงเส้น การจัดรูปสมการปริภูมิสแตต การออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัวโดยใช้หลักการออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับในรูปของปริภูมิสแตต เมื่อพิจารณาระบบ พบว่าระบบเป็น Type - 0 ส่งผลให้ระบบมีความผิดพลาดที่สถานะสมดุลสำหรับอินพุตแบบขั้นบันได ตัวควบคุมเซอร์โวจะทำให้ระบบมีจำนวนแบบของระบบเป็น Type - 1 ส่งผลให้ระบบมีค่าความผิดพลาดที่สถานะสมดุลสำหรับอินพุตแบบขั้นบันไดเข้าสู่ศูนย์ และทำการออกแบบระบบควบคุมร่วมกับตัวสังเกตแบบเต็มอันดับ เนื่องจากในการทดลองจริงนั้น ไม่สามารถวัดค่าตัวแปรสแตตในแต่ละสแตตได้ทั้งหมด จึงจำเป็นที่จะต้องมิตัวสังเกตสถานะเพื่อทำการประมาณค่าตัวแปรสแตตในแต่ละสแตตเพื่อใช้ในการป้อนกลับของระบบควบคุม โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้กล่าวถึงกระบวนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก การทำให้เป็นเชิงเส้น การออกแบบระบบควบคุมชนิดเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกต ทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้า และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แม่เหล็ก (Magnet)

แม่เหล็ก (Magnet) คือ ของแข็งชนิดหนึ่งที่มีสมบัติดูดโลหะบางชนิดได้ แม่เหล็กสามารถทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ นั่นคือสามารถส่งแรงดูดหรือแรงผลักออกไปรอบ ๆ ตัวมันได้ แม้ว่าสนามแม่เหล็กจะเป็นสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้แต่มันก็เป็นสิ่งที่มีคุณสมบัติพิเศษสิ่งหนึ่งซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาการทางด้านเทคโนโลยีในโลกยุคปัจจุบันต่าง ๆ มากมาย กล่าวย้อนกลับไปถึงชาวกรีกและโรมันโบราณรู้จักอำนาจแม่เหล็ก พวกเขาเห็นว่าหินสีดำชนิดหนึ่งมีแรงที่ทำให้โลหะบางชนิดเข้ามาอยู่ติดกับมันได้ และพวกเขายังสังเกตเห็นด้วยว่า เมื่อเอาหินชนิดนี้ผูกแขวนกับเชือกปลายข้างหนึ่งของมันจะชี้ไปทางทิศเหนือเสมอ หลังจากนั้นสิ่งประดิษฐ์สิ่งแรก ๆ ที่ได้จากแม่เหล็กนั่นก็คือ “เข็มทิศ” นั่นเอง ในปัจจุบันมีการนำแม่เหล็กมาใช้เป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากมาย เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้า (จอภาพ ไมโครโฟน ลำโพง มอเตอร์ ฯลฯ) อุปกรณ์ทางการแพทย์ ยานพาหนะ (รถไฟความเร็วสูง) อุปกรณ์และเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม (เบรคแม่เหล็กไฟฟ้า) เป็นต้น โดยชนิดของแม่เหล็กที่มนุษย์สร้างขึ้นและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ แม่เหล็กถาวร และ แม่เหล็กชั่วคราว

2.1.1 แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) หมายถึง แม่เหล็กที่แสดงอำนาจการเป็นแม่เหล็กได้นานซึ่งได้มาจากการนำขดลวดอบน้ำยาพันรอบแท่งเหล็กกล้าหรือวัสดุที่ใช้ทำแม่เหล็กชนิดอื่น แล้วทำการปล่อยกระแสผ่านเข้าไปในขดลวดทำให้โมเลกุลภายในแท่งเหล็กกล้ามีการเรียงตัวของโมเลกุลใหม่อย่างเป็นระเบียบ ทำให้แท่งเหล็กดังกล่าวคงสภาพเป็นแม่เหล็กถาวรซึ่งแม่เหล็กถาวรจะมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันไปตามการใช้งาน เช่น อาจเป็นรูปเกือกม้า ทรงกลม เป็นต้น

2.1.2 แม่เหล็กชั่วคราว หมายถึง แม่เหล็กที่แสดงการเป็นแม่เหล็กในช่วงระยะเวลาที่ต้องการที่จะให้เป็นแม่เหล็กเท่านั้น เช่น แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet) ที่มีลักษณะของการจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวัตถุตัวนำ หมายความว่า ถ้าปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลในวัตถุตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ตัวมันนั้น แต่อำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีเพียงจำนวนเล็กน้อย ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ การเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ทำได้โดยการนำเส้นลวดตัวนำมาพันเป็นขดลวด พันอยู่รอบโลหะที่มีคุณสมบัติเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก เช่น เหล็กอ่อน เป็นต้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของเส้นลวดตัวนำจะเสริมอำนาจกัน ทำให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น จำนวนรอบของการพันเส้นลวดตัวนำ ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำ ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนของแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า และขนาดของแกนแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น

ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

- จำนวนรอบของการพันเส้นลวดตัวนำ เมื่อจำนวนรอบในการพันเส้นลวดตัวนำมากจะเกิดความเข้มสนามแม่เหล็กมาก ในทางกลับกัน ถ้าจำนวนรอบในการพันน้อย ความเข้มสนามแม่เหล็กก็จะน้อยตามไปด้วย
- ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำ ถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำมาก ความเข้มสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นมาก ถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำน้อย ความเข้มสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นน้อย
- ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนของแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุต่างชนิดกันจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน เช่น แกนอากาศจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อย หรือวัสดุที่สามารถเกิดอำนาจแม่เหล็กได้ เช่น เหล็กเพอร์ไรท์ เป็นต้น วัสดุเหล่านี้จะช่วยเสริมอำนาจแม่เหล็กในขดลวดทำให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากขึ้น
- ขนาดของแกนแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า แกนที่มีขนาดใหญ่จะให้ความเข้มสนามแม่เหล็กมาก ส่วนแกนที่มีขนาดเล็กจะส่งผลให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อย

2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field)

จากที่กล่าวมาในเรื่องของแม่เหล็กไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบ ๆ เส้นลวด ลักษณะของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับรูปร่างของเส้นลวดและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าแม่เหล็กไฟฟ้านั่นเอง การพันรอบแกนเหล็กและจำนวนรอบในการพัน ทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force) ดังนั้นความสามารถในการเป็นแม่เหล็ก (Permeability) สูงในวัสดุสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Material) เป็นสารแม่เหล็กสูง นำมาทำแม่เหล็กถาวร (ได้แก่ แมกเนไตต์ เหล็ก นิกเกิล) ซึ่งแสดงโดย เส้นฟลักซ์ข้ามผ่านช่องว่างมายังโรเตอร์ ซึ่งก็ยังมีกรรบนวน (Distributed) ในช่องว่างโดยขึ้นกับความหนาแน่นฟลักซ์ เป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กที่สูง อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นฟลักซ์อยู่ในช่วง 1.7 - 2 Tesla ใน Silicon Steel ทั่วไป ดังนั้นจึงนิยมใช้วัสดุสารเฟอร์โรแมกเนติก ใช้ทำโรเตอร์ (Rotor) หรือเพลา (Shaft) ความแข็งแรงของแรงนั้นสามารถควบคุมด้วยตัวควบคุมกระแสในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า และเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบหาระยะช่องว่างที่เป็นไปได้ซึ่งจะช่วยลดการป้อนกระแสและการสูญเสีย

ซึ่งจะอธิบายโดยสังเขป ทั้งคุณสมบัติของแม่เหล็ก ข้อกำหนดหรือสมมติฐานเบื้องต้น ความหมายและคำจำกัดความต่าง ๆ ผลกระทบของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) คือ สนามแม่เหล็กในช่องว่างใด ๆ สามารถอธิบายได้ด้วยแรงทางกล (Mechanical Force) และการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Electrical Induction) ผลกระทบทั้งสองสามารถวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ ในส่วนของสนามแม่เหล็ก คือ Lorentz Force จะตั้งฉากกับความเร็วของการเปลี่ยนแปลงประจุ Q กับเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก \vec{B} (ความเหนี่ยวนำแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์) ดังสมการที่ 2.1 มีความหมายว่า ความหนาแน่นฟลักซ์ของสนามแม่เหล็ก (Tesla = $N/A \cdot m$) เมื่อแรง 1 นิวตัน กระทำให้เกิดการนำกระแส 1 A และ 1 m

$$\vec{f} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

และการที่เหล็กส่งอำนาจแม่เหล็กออกมารอบตัวมันเอง มีทิศทางพุ่งจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ โดยเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux) ฟลักซ์แม่เหล็กทั้งหมด Φ ที่ผ่านพื้นที่ผิว A คือการ Integral ของความหนาแน่นฟลักซ์ตลอดพื้นที่ผิว

$$\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.2)$$

สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field), H สร้างโดยการเปลี่ยนแปลงกระแส เกิดการสลับไปมาของสนามไฟฟ้า การเกิดสนามแม่เหล็กสมมาตรโดยรอบของตัวนำเมื่อป้อนกระแส i ดังนั้นความเข้มของสนามแม่เหล็กหาจากความหนาแน่นกระแสเทียบกับกึ่งกลางการพันรอบตัวนำ

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = Ni \quad (2.3)$$

เมื่อ N คือจำนวนรอบของการพันขดลวด i คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวดและ \vec{s} คือความยาวเส้นฟลักซ์ โดย $Ni = mmf$ คือแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force) เป็นพลังงานรูปหนึ่งที่ใช้ในการเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็กให้วิ่งรอบวงจรแม่เหล็กหนึ่งรอบ หรืออาจพิจารณาว่าเป็นความสามารถในการทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดใดขดลวดหนึ่ง ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวด กับจำนวนรอบของขดลวดนั้น และความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่นฟลักซ์ คือ

$$B = \mu H \quad (2.4)$$

$\mu = \mu_0 \mu_r$ คือ Permeability หรือ ค่าบ่งบอกคุณสมบัติของสารแม่เหล็กแต่ละชนิดที่ยอมให้เกิดสนามแม่เหล็กได้มากหรือน้อย $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ (V.s/A.m) คือ Permeability ของอากาศ μ_r คือ Relative Permeability หรือค่าความซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ของสารตัวกลาง (μ_r ของเหล็กอยู่ในช่วง 1,000 – 10,000 และ μ_r ของอากาศมีค่าประมาณ 1)

$$\Phi = B_{fe} A_{fe} = B_a A_a \quad (2.5)$$

โดยสมมติให้ Φ มีค่าคงที่รอบวงแม่เหล็กซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างอากาศ ($A_{fe} = A_a$) ดังนั้น $B_{fe} = B_a = B$

การเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance; L) คือองค์ประกอบที่ไม่สามารถรับและคายพลังงานได้ตลอดช่วงเวลา โดยพลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำจะสะสมอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็ก และอธิบายอยู่ในเทอมของกระแสไฟฟ้า จากกฎของ Faraday's Law สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น (Induced Voltage) ในแต่ละรอบของขดลวดซึ่งขดลวดมีจำนวน N รอบ ก็คือ

$$v(t) = N \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.6)$$

เมื่อ λ คือเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้อง (Flux Linkage) ซึ่งจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่จำนวนรอบ N รอบ $N\Phi(t)$ นั้นขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดและค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด คือ $\lambda = N\Phi = Li$ ดังนั้น

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (2.7)$$

แสดงให้เห็นว่าค่า L จะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับค่ากระแส แต่ค่า L จะมีค่าแปรผันตรงกับค่า N^2 และแปรผกผันกับค่า l ดังนั้นสามารถออกแบบค่า L ได้ตามต้องการ เช่น ถ้าต้องการค่า L

เปลี่ยนแปลงมากก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวด แต่ถ้าต้องการค่า L เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ก็เปลี่ยนระยะช่องว่างอากาศให้มากขึ้น

2.3 ระบบควบคุม

2.3.1 แนวคิดและความเป็นมาของระบบควบคุม

เมื่อกล่าวถึงคำว่า การควบคุม (Control) อาจกล่าวได้ว่า การควบคุมเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันก็ได้ ตัวอย่างเช่น เราขับจี๊กรยาน เราจะต้องเลี้ยงให้จักรยานทรงตัววิ่งไปตามเส้นทางได้ นั่นคือเราเป็นผู้ควบคุมจักรยาน จักรยานนั้นถือได้ว่าเป็นเครื่องกลไก ขณะที่ผู้ขับขี่เป็นมนุษย์ หากมองมนุษย์ขับจี๊กรยานเป็นระบบ (System) เราเรียกระบบเช่นนี้ว่า ระบบที่มีการเชื่อมโยงระหว่างมนุษย์กับเครื่องจักร (Man - Machine Interface System) กลไกการควบคุมที่เกิดขึ้นเรียกว่าการควบคุมด้วยมนุษย์ (Manual Control) หากการควบคุมเกิดขึ้นได้ด้วยกลไก และอุปกรณ์ที่มนุษย์สร้างขึ้น เมื่อการควบคุมดำเนินงานไปโดยไม่มีมนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้องเลย เป็นการดำเนินงานโดยอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ของมนุษย์ล้วน ๆ เราเรียกระบบนี้ว่า การควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control) ตัวอย่างเช่น ตู้เย็น เมื่อผู้ใช้ตู้เย็นได้เสียบปลั๊กไฟ และปรับระดับความเย็นตามที่ต้องการแล้ว คอมเพรสเซอร์ก็จะทำงานไปโดยอัตโนมัติ เพื่อรักษาความเย็นภายในตู้เย็นอย่างคงที่ได้สม่ำเสมอ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การควบคุม (Control) เป็นกระบวนการที่กำกับหรือบังคับให้ระบบที่ต้องการควบคุมดำเนินงานตามที่ต้องการ ซึ่งระบบที่ถูกควบคุมอยู่นั้น จะผลิตเอาต์พุต หรือการตอบสนอง (Response) ตามความประสงค์ของมนุษย์ โดยโครงสร้างของระบบควบคุมนั้น อาจพบได้ทั้งระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open - Loop Control Systems) ซึ่งมีการใช้ตัวขับเคลื่อน (Actuator) หรือตัวควบคุมในการควบคุมพลานต์ (Plant) หรือระบบ (System) โดยตรง อีกรูปลักษณะหนึ่งคือการควบคุมแบบวงปิด (Closed - Loop Control Systems) ที่มีการวัดเอาต์พุตหรือการตอบสนองด้วยเซนเซอร์ (Sensor) หรือวิธีใดวิธีหนึ่ง เพื่อนำสัญญาณที่วัดได้ไปป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการ เพื่อทำการปรับแต่งการทำงานของระบบ หรือกระบวนการโดยอัตโนมัติ

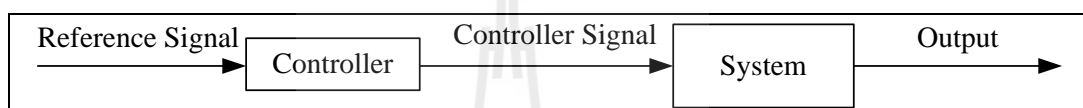
2.3.1.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิดหรือระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ

(Open - Loop Control Systems, Nonfeedback Control Systems)

ในระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้การควบคุมส่วนใหญ่ต้องอาศัยการคาดคะเนและการตัดสินใจของมนุษย์ ตัวอย่างเช่น การควบคุมอุณหภูมิภายในห้องโดยเตาผิง ถ้าเตาผิงที่ใช้มีเพียงอุปกรณ์ตั้งเวลาเปิด - ปิดเท่านั้น ผู้ใช้หรือผู้ควบคุมจะต้องคาดคะเนและตั้งเวลาในการ

เปิดเตาผิงที่นานพอเหมาะเพื่อให้อุณหภูมิห้องอยู่ในระดับที่ต้องการ แต่การควบคุมโดยมนุษย์เช่นนี้ จะไม่แม่นยำและน่าเชื่อถือนัก เนื่องจากผู้ควบคุมไม่สามารถรู้ถึงคุณสมบัติเฉพาะในการสร้างความร้อนของเตาผิงนี้ อีกทั้งยังมีปัจจัยต่าง ๆ จากภายนอก เช่น อุณหภูมิภายนอกห้องที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในห้อง จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้ไม่สามารถปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงของระบบอันเนื่องมาจากปัจจัยจากภายนอกได้

แผนผังของระบบควบคุมแบบวงเปิดสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.1 โดยมีสัญญาณอินพุตหรือสัญญาณอ้างอิงส่งผ่านตัวควบคุม (Controller) ออกมาเป็นสัญญาณกระตุ้น (Signal Controller) เพื่อสั่งให้ระบบทำงานขับเอาท์พุต (Output) ที่ต้องการออกมา



รูปที่ 2.1 แสดงแผนผังระบบควบคุมแบบวงเปิด

2.3.1.2 ระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

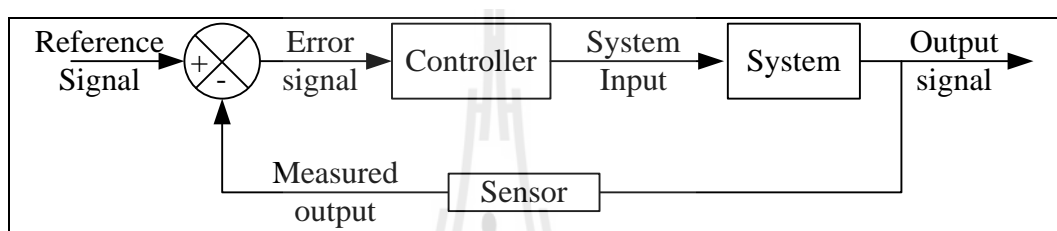
(Closed - Loop Control Systems, Feedback Control Systems)

จากหัวข้อที่แล้วจะเห็นว่าเมื่อปัจจัยภายนอกมา มีอิทธิพลต่อระบบจะทำให้ผู้ควบคุมไม่สามารถควบคุมเอาท์พุตให้เป็นไปตามต้องการได้ ในหัวข้อนี้ได้แก้ไขโดยระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ จะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิด คือ มีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการกลับเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นอินพุตที่จะให้กับระบบ การที่เราจะทราบค่าเอาท์พุตได้เราจะต้องมีการวัดข้อมูลของเอาท์พุต เมื่อเราทราบค่าเอาท์พุตแล้วเรามักจะนำค่าเอาท์พุตที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเอาท์พุตที่เราต้องการจากระบบ จากนั้นความแตกต่างระหว่างเอาท์พุตที่ต้องการและเอาท์พุตที่แท้จริงจะได้รับการส่งต่อไปสู่อุปกรณ์ควบคุม แล้วส่งต่อเป็นอินพุตเข้าสู่ระบบเพื่อทำให้ความแตกต่างของเอาท์พุตที่ต้องการและเอาท์พุตที่แท้จริงลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นเราจะได้ว่าค่าเอาท์พุตของระบบเป็นไปตามที่ต้องการ

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ จากหลักการพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถกล่าวได้ว่า ระบบควบคุมแบบป้อนกลับประกอบด้วยเส้นทางหรือวงรอบของสัญญาณป้อนกลับซึ่งเป็นสัญญาณเอาท์พุต ตั้งแต่หนึ่งวงรอบขึ้นไป แล้วนำสัญญาณป้อนกลับนี้มาเปรียบเทียบกับสัญญาณสั่งการหรือสัญญาณอ้างอิงจะได้

ผลต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองเป็นค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อนำไปควบคุมสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าตามที่กำหนดโดยสัญญาณอ้างอิง

โดยแผนผังของระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับจะเป็นดังรูปที่ 2.2 ระบบควบคุมนี้ประกอบด้วยส่วน Forward (Forward Path) และส่วนป้อนกลับ (Feedback Path) และส่วนตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อน (Error - Sensing Device) ส่วนตรวจจับค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะเปรียบเทียบค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตจริง แล้วส่งสัญญาณที่เกิดจากผลต่างของสัญญาณทั้งสองออกไปที่ตัวควบคุม



รูปที่ 2.2 แสดงแผนผังระบบควบคุมแบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

2.3.2 ระบบควบคุมในปัจจุบัน

การพัฒนาเทคโนโลยีวิศวกรรมด้านระบบควบคุมในปัจจุบัน ได้มีการนำความรู้หลากหลายสาขาวิชาการเข้ามาเป็นองค์ประกอบ ไม่ว่าจะเป็นการนำคณิตศาสตร์ขั้นสูงแขนงต่าง ๆ มาใช้ การนำความรู้ทางด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์ ประกอบกับการมีเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กสมรรถนะสูง ล้วนมีส่วนช่วยผลักดันให้เกิดความก้าวหน้าในวิทยาการของระบบควบคุม อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าเทคโนโลยีระบบควบคุมจะได้รับการพัฒนาให้ก้าวไกลไปขนาดไหน หลักการใหญ่อันได้แก่ การป้อนกลับก็ยังคงเดิม ระบบควบคุมที่ใช้งานอย่างแพร่หลายในยุคปัจจุบันนี้มีหลายชนิด โดยสามารถจำแนกออกตามยุคสมัยในการพัฒนาระบบควบคุม เช่น ระบบควบคุมแบบธรรมดา หรือ ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม (Conventional Control หรือ Classical Control) และระบบควบคุมแบบสมัยใหม่ (Modern Control) เป็นต้น

2.3.2.1 ระบบควบคุมแบบธรรมดา หรือ ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม

(Conventional Control หรือ Classical Control)

ระบบควบคุมแบบธรรมดาหรือ ระบบควบคุมแบบดั้งเดิมนั้น หมายถึง ระบบควบคุมที่ออกแบบและวิเคราะห์อยู่บนโดเมนความถี่ (Frequency Domain) และโดเมนการแปลงลาปลาซ โดยการใช้แบบจำลองในรูปของ ฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer Function) โดยไม่ได้ใช้ข้อมูลรายละเอียดของไดนามิกส์ภายในของระบบ (Internal System Dynamic) ซึ่งพัฒนาการของ ทฤษฎีระบบควบคุมในช่วงนี้นั้น ส่วนใหญ่พัฒนาขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้ในงานทหารและทาง ระบบสื่อสาร อันเนื่องมาจากสงครามโลกครั้งที่สอง และการขยายตัวของโครงข่ายสื่อสารโทรศัพท์ ตัวอย่างของระบบควบคุมชนิดนี้ เช่น ตัวควบคุมพีไอดี (PID - Controller) ตัวชดเชยชนิดเฟส นำหน้า (Phase - Lead Compensator) หรือตัวชดเชยชนิดเฟสล้าหลัง (Phase - Lag Compensator) เป็นต้น

2.3.2.2 ระบบควบคุมแบบสมัยใหม่ (Modern Control)

ระบบควบคุมสมัยใหม่ หมายถึง ระบบควบคุมที่ไม่ได้ใช้เทคนิคในการ ออกแบบแบบดั้งเดิม คือ จาการากของสมการคุณลักษณะ และอยู่บนโดเมนความถี่ แต่เป็นการ ออกแบบโดยมีพื้นฐานจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบซึ่งถูกจัดอยู่ในรูปของสมการเชิง อนุพันธ์ ออกแบบโดยวิธีการปริภูมิสแตต และเป็นการออกแบบอยู่บนโดเมนเวลา (Time Domain) โดยแรงผลักดันที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบควบคุมแบบดั้งเดิม มาสู่ระบบควบคุมแบบ สมัยใหม่มีสองประการหลัก คือ ข้อจำกัดของระบบควบคุมแบบดั้งเดิมต้องงานด้านอวกาศ และการ ประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์กับงานระบบควบคุม โดยตัวอย่างการออกแบบระบบควบคุมสมัยใหม่ เช่น การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีการวางโพล การออกแบบตัวประมาณค่าตัวแปรสแตต ระบบ ควบคุมแบบอัจฉริยะ (Intelligence Control) ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ เป็นต้น

2.3.3 ตัวชดเชยชนิดเฟสนำหน้า และล้าหลัง

2.3.3.1 ตัวชดเชยชนิดเฟสนำหน้า (Phase - Lead Compensator)

การชดเชยแบบเฟสนำหน้า หมายถึงการชดเชยที่กระทำกับระบบ โดยอาศัยตัวชดเชยที่มีลักษณะสมบัติทางเฟสเป็นบวก เฟสที่เป็นบวกจากตัวชดเชยนั้นเป็นสิ่งที่ นำมาใช้ประโยชน์ ให้การยกระดับหรือเพิ่มค่าแก่ Phase Margin (ส่วนเพื่ออัตรายาย) ของระบบ ก่อนมีการชดเชย เพื่อให้ระบบที่ชดเชยแล้วมีปริมาณ Phase Margin พอเพียงตามความต้องการ ตัว ชดเชยมีลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นดังสมการที่ (2.8)

$$G_c(s) = K \frac{s+z}{s+p} \quad (2.8)$$

สำหรับตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า ก็จะมีลักษณะสมบัติทางความถี่คือ โพลของตัวชดเชยมีความถี่สูงกว่าซีโร่

กล่าวโดยสรุปได้ว่า ตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้าให้การปรับปรุงส่วนเพื่อเสถียรภาพ ช่วยปรับปรุงการตอบสนองของระบบให้เกิดได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากแบนด์วิดท์ของระบบวงปิด ที่ผ่านการชดเชยแล้วจะกว้างขึ้น แต่ในอีกแง่มุมหนึ่งอาจไม่ส่งผลดี กล่าวคือ สัญญาณรบกวนในย่านความถี่สูงอาจถูกขยาย และป้อนผ่านระบบได้ ตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้าอาจผลิตสัญญาณควบคุมที่เป็นเอาต์พุตที่มีขนาดใหญ่มากในบางโอกาสจนอาจขับให้ระบบวงปิดเข้าสู่ย่านการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ รวมทั้งอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์บางส่วนเนื่องมาจากขนาดของสัญญาณที่ใหญ่ดังกล่าวนี้ นอกจากนี้ การใช้งานตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้าให้ได้ผลดี อาจมีข้อจำกัดอยู่บ้างในแบบชนิด (Type) ของตัวควบคุม

2.3.3.2 ตัวชดเชยชนิดเฟสล้าหลัง (Phase - Lag Compensator)

การชดเชยแบบเฟสล้าหลัง หมายถึงการชดเชยที่กระทำกับระบบโดยอาศัยตัวชดเชยที่มีลักษณะสมบัติทางเฟสเป็นลบ และมีลักษณะสมบัติทางขนาดแบบลดค่าลง เราใช้ประโยชน์ลักษณะสมบัติทางขนาดที่ลดลงของตัวชดเชยนี้ เพื่อลดขนาด Gain Margin ของระบบก่อนมีการชดเชย ให้น้อยลงในบางย่านความถี่ ซึ่งจะทำให้เกิดจุดตัดข้าม 0 dB หรือ ω_{0dB} ตามต้องการ และที่ความถี่ ω_{0dB} นี้ เราจะได้ Phase Margin ของระบบที่ผ่านการชดเชยแล้วตามต้องการ โดยลักษณะของฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวชดเชยแบบเฟสล้าหลังเป็นดังสมการที่ (2.9)

$$G_c(s) = K \frac{s+z}{s+p} \quad (2.9)$$

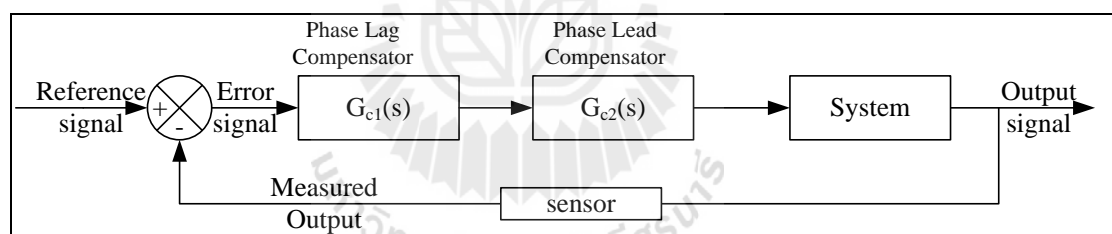
สำหรับตัวชดเชยแบบเฟสล้าหลัง จะมีลักษณะสมบัติทางความถี่คือ โพลของตัวชดเชยมีความถี่ต่ำกว่าซีโร่

กล่าวโดยสรุปได้ว่า ตัวชดเชยแบบเฟสล้าหลังช่วยปรับปรุงหรือคงสภาพส่วนเพื่อเสถียรภาพให้แก่ระบบ ระบบที่ผ่านการชดเชยแล้วจะมีเสถียรภาพที่ดี และยังช่วยปรับปรุงลักษณะสมบัติในย่านความถี่ต่ำของระบบให้ดีขึ้นด้วย นอกจากนี้ ตัวชดเชยชนิดนี้จะลดแบนด์วิดท์ของระบบวงปิดให้แคบลง จึงทำให้การตอบสนองของระบบวงปิดจะช้าลง แต่ก็จะมี

การสั่นและการพุ่งเกินของสัญญาณที่ลดน้อยลงด้วย และจากการที่แบนด์วิดท์แคบลงนี้ จะเป็นการช่วยลดปัญหาจากการรบกวนที่แทรกเข้าสู่ระบบอีกด้วย

จากเนื้อหาที่ผ่านมา การออกแบบใช้งานตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า หรือ เฟสล้าหลังอย่างใดอย่างหนึ่งในสถานการณ์จริงอาจพบว่า ตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้านั้นจะต้องใช้อัตราขยายที่สูงมาก จนทำให้ระบบเข้าสู่ย่านการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้น หรืออาจทำให้มีสัญญาณรบกวนต่อระบบมากเกินไป ส่วนตัวชดเชยแบบเฟสล้าหลัง ก็อาจจะทำให้ระบบวงปิดนั้นมีการตอบสนองที่ช้าจนเกินไป

แนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาทางเทคนิคที่อาจเกิดขึ้นนี้ เป็นการใช้ตัวชดเชยผสมผสานกันระหว่าง ตัวชดเชยแบบเฟสล้าหลังกับนำหน้า (Phase Lag - Lead Compensator) ซึ่งจะนำจุดแข็งของตัวชดเชยแต่ละแบบมาผสมกันในขณะที่จะช่วยลดจุดอ่อนที่อาจเกิดขึ้นลงไปได้บางส่วน ในการใช้งานก็เพียงแค่นำตัวชดเชยทั้งสองแบบนี้มาต่อแบบอนุกรมเรียงต่อกัน ดังแผนภาพบล็อกในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบที่ใช้ตัวชดเชยผสมผสานระหว่างตัวชดเชยแบบเฟสล้าหลังกับนำหน้า

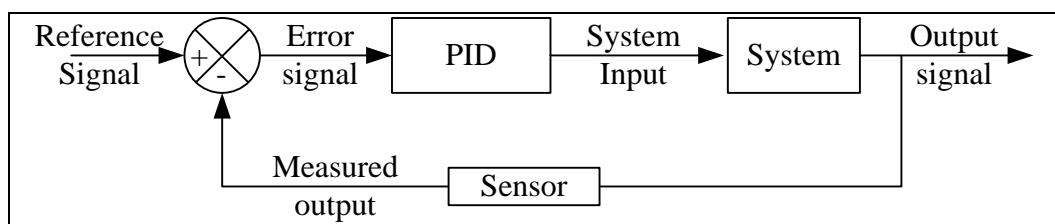
การดำเนินงานออกแบบนั้น เราอาจจะเริ่มออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสล้าหลังก่อน เพื่อให้ได้อัตราขยายในย่านความถี่ต่ำตามที่ต้องการ ตลอดจนปรับปรุงส่วนเฟสไว้ระดับหนึ่ง ต่อจากนั้นจึงออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้าเสริมเข้าไป เพื่อยกระดับส่วนเฟสให้ได้ตามที่ต้องการ พร้อมทั้งขยายแบนด์วิดท์ของระบบวงปิด ช่วยให้ระบบที่ชดเชยแล้วมีการตอบสนองที่รวดเร็วยิ่งขึ้น

2.3.4 ตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมพีไอดี (PID - Controller) เป็นชื่อของตัวควบคุมอันทรงประสิทธิภาพ โดยกว่าร้อยละ 90 ของปัญหาในการควบคุมระบบ สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้ตัวควบคุมชนิดนี้ และเมื่อพิจารณาจะพบว่าลักษณะของตัวควบคุมพีไอดีนั้นจะมีความคล้ายคลึงกับตัวชดเชยผสมระหว่างเฟสล่าช้าหลังกับนำหน้าเป็นอย่างมาก จนอาจกล่าวได้ว่า ตัวควบคุมพีไอดี เป็นตัวชดเชยผสมผสานระหว่างตัวชดเชยแบบเฟสล่าช้าหลังกับเฟสนำหน้ารูปแบบหนึ่งนั่นเอง

โดยชื่อของตัวควบคุม “พี” คือตัวอักษร P ที่เป็นอักษรตัวแรกของคำว่า Proportional หมายถึง การปรับสัดส่วน ส่วนสัญญาณ “ไอ” คือตัวอักษร I ของคำว่า Integral หมายถึง การอินทิเกรตสัญญาณ และ “ดี” คือตัวอักษร D ของคำว่า Derivative หมายถึง การอนุพันธ์สัญญาณ กลไกทั้งสามที่กระทำกับสัญญาณถูกรวมเข้าด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณอย่างเหมาะสม ให้เกิดผลเป็นการควบคุมระบบอย่างอัตโนมัติ ในการใช้งานตัวควบคุมอาจมิได้ใช้กลไกทั้งสามพร้อมกันทีเดียว อาจใช้ “พี” แต่เพียงอย่างเดียว หรือใช้ “พีไอ” ควบคู่กัน เป็นต้น สาเหตุที่กลไกเหล่านี้เมื่อทำงานผสมผสานกันแล้วให้ผลดีต่อการควบคุมระบบก็เพราะตัวควบคุมพีไอดีเสมือนกับเป็นการชดเชยแบบเฟสล่าช้าต่อผสมแบบอนุกรมอยู่กับตัวชดเชยแบบเฟสล่าช้าหลัง ซึ่งตัวชดเชยแต่ละแบบต่างก็มีข้อดีของตัวเอง และใช้เพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะที่แตกต่างกันในการชดเชยพลวัตของระบบ

การใช้งานระบบควบคุมแบบพีไอดี จะต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุม จากนั้น นำผลที่ได้จากกระบวนการ หรือเอาท์พุทของระบบนำมาป้อนกลับดังเช่นระบบการควบคุมแบบวงปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวควบคุมพีไอดีของระบบการควบคุมแบบวงปิด

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.10)$$

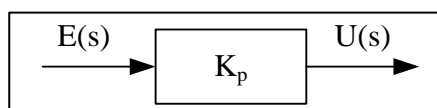
โดยที่ $u(t)$ คือสัญญาณควบคุม $e(t)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณออกจากค่ากำหนด ตัวควบคุม PID ประกอบไปเทคนิคการควบคุมพื้นฐาน 3 แบบ แบบสัดส่วน (Proportional; P)แบบ อินทิกรัล (Integral; I) และแบบอนุพันธ์ (Derivative; D) แต่ละแบบสามารถนำมาประกอบกัน เพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ต้องการ ตัวควบคุมมีพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ค่าอัตราขยายแบบ สัดส่วน (K_p) ค่า Integral Time (T_i) และ Derivative Time (T_d)

กลไกทั้งสาม (พี, ไอ และ ดี) ที่กระทำกับสัญญาณถูกรวมเข้าด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ ปรับแต่งสัญญาณอย่างเหมาะสม ให้เกิดเป็นผลการควบคุมระบบอย่างอัตโนมัติ ในการใช้งานตัว ควบคุมอาจมิได้ใช้กลไกทั้งสามพร้อมกันทีเดียว อาจใช้ พี แต่เพียงอย่างเดียว หรือใช้ พีไอ ควบคู่กัน เป็นต้น สาเหตุที่กลไกเหล่านี้เมื่อทำงานผสมผสานกัน แล้วให้ผลดีต่อการควบคุมระบบ ก็เพราะตัว ควบคุมพีไอดี เสมือนกับเป็นตัวชดเชยแบบเฟสสำหรับน้ำต่อผสมแบบอนุกรมอยู่กับตัวชดเชยแบบ เฟสสำหรับหลัง ซึ่งตัวชดเชยแต่ละแบบต่างก็มีข้อดีของตัวเอง และใช้เพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะที่ แตกต่างกันในการชดเชยพลวัตของระบบ

เมื่อเราใช้งานกลไก พี ไอ และดี โดยจับคู่กัน ได้แก่ พีดี และ พีไอ เราก็อาจเรียกว่า ตัวควบคุมแบบพีดี (PD - Controller) และตัวควบคุมแบบพีไอ (PI - Controller) ตัวควบคุมแบบพีดี นั้นใช้เพื่อปรับปรุงการตอบสนองชั่วคราวให้ดีขึ้น ขณะที่เสถียรภาพของระบบก็จะต้องดีด้วย ขณะที่ ตัวควบคุมแบบพีไอ เราใช้เพื่อปรับปรุงให้ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวลดน้อยลงจนหมดไป โดยจะต้องไม่ทำให้เสถียรภาพด้อยลงหรือขาดความมั่นคง ซึ่งรายละเอียดของการควบคุมแต่ละ แบบมีดังนี้

2.3.4.1 การควบคุมแบบสัดส่วน

การควบคุมระบบแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนเป็น เทคนิคที่ง่ายที่สุด หลักการคือสัญญาณควบคุม $u(t)$ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความ ผิดพลาด (Error) ที่เกิดจากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตของระบบที่ทำการ ควบคุมนั้น แสดงดังภาพบล็อกรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณความผิดพลาดที่ส่งเข้าไปในระบบเขียนได้ดังสมการที่ (2.11)

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.11)$$

โดยที่ K_p คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมนี้หรือจะเรียกว่า เกนสัดส่วน และ $e(t)$ ความคลาดเคลื่อน = ค่าที่กำหนด - ค่าวัดได้จริง

2.3.4.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล

ผลตอบของการควบคุมแบบสัดส่วนรวมกับการควบคุมแบบอินทิกรัลสามารถอธิบายได้ในสมการที่ (2.12)

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ K_p คือค่าอัตราขยายและ $e(t)$ คือความคลาดเคลื่อน และ T_i คือ Integral Time (วินาที)

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ความแตกต่างอยู่ตรงที่เทอมไบแอส นั่นคือตัวควบคุมแบบสัดส่วนถูกจำกัดด้วยส่วนไบแอสเป็นค่าคงที่ ส่วนการควบคุมแบบอินทิกรัล มีการสะสมความคลาดเคลื่อนในการปรับแต่งไบแอส (ทำหน้าที่เป็นตัวอินทิกรัล) และจะหยุดสะสมเมื่อความคลาดเคลื่อนของระบบเป็นศูนย์ เมื่อผลตอบเข้าที่สมบูรณ์แล้ว เทอมไบแอสของระบบจะมีค่าเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของการรบกวน (Disturbance) การทำงานในลักษณะเช่นนี้มีลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันรีเซตด้วยมือ (Manual - Reset Function) ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกว่ตัวอินทิกรัลว่าฟังก์ชันรีเซต (Reset Function)

คุณสมบัติของตัวอินทิกรัลในการกำจัดความคลาดเคลื่อน (หรือออฟเซต) เป็นข้อดีอย่างมาก จึงเป็นที่นิยมใช้กับระบบควบคุมป้อนกลับ อย่างไรก็ตาม ตัวอินทิกรัลก็มีข้อเสีย นั่นคือทำให้เกิดการล่าช้า (Capacity - Like Lag) และทำให้ช่วงเวลาของการแกว่งยาวนานขึ้น โดยทั่วไป ระบบแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล จะมีช่วงเวลาของการแกว่งนานกว่าระบบเชิงสัดส่วน อย่างเดียว 50% หรือ $T_{PI} = 1.5T_p$ สำหรับระบบที่มีค่าคงตัวเวลา (Time Constant) น้อย (เช่น ระบบควบคุมอัตราการไหล) ปัญหานี้จะไม่มีผลมากนัก แต่สำหรับ

ระบบที่มีค่าคงตัวเวลามาก (เช่น ระบบควบคุมระดับ) ปัญหานี้อาจมีผลมาก จนทำให้ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติที่ไม่สามารถยอมรับได้

การควบคุมแบบอินทิกรัล มีลักษณะเช่นเดียวกับการควบคุมสัดส่วนตรง ผลกระทบของการเพิ่มอัตราขยายของตัวควบคุม หากอัตราขยายมีค่ามากเกินไปจะทำให้ผลตอบสนองของระบบมีการแกว่ง โดยทั่วไป Integral Time ($T_i = 1/K_i$ sec โดยที่ $K_i = \text{repeats/sec}$) เป็นตัวแสดงว่าอัตราการตอบสนองของกระบวนการต่อสัญญาณการควบคุม ค่า T_i ที่น้อยกว่า จะทำให้ตัวควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วกว่าในระยะเริ่มต้น โดยที่ความคลาดเคลื่อนยังเป็นค่าบวกอยู่ ดังนั้นกว่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นศูนย์ (ซึ่งทำให้เทอม $\int_0^t e(t)dt$ หยุดทำงาน) เทอมไบแอสก็จะมีค่าสูงกว่าที่ต้องการ ดังนั้นผลตอบสนองจึงเกิดส่วนพุ่งเกิน (Overshoot) สูงกว่าค่ากำหนด เป็นผลให้ตัวอินทิกรัลทำหน้าที่ปรับให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง การใช้ตัวอินทิกรัลในการควบคุม ควรระวังในเรื่องของความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ (เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ากำหนดขนาดใหญ่) เพราะจะทำให้เกิดปัญหา Integral Windup ถึงแม้ว่า T_i มีค่าถูกต้องในสภาวะการทำงานธรรมดา แต่สัญญาณควบคุมอาจถึงจุดอิ่มตัวขณะผลตอบเกิดส่วนพุ่งเกิน

ข้อสรุปของตัวควบคุมอินทิกรัล

- ทำหน้าที่คล้ายกับรีเซ็ตด้วยมือ (Manual Reset) เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อน
- มีปัญหาการล่าช้า ยังผลให้เกิดการหักล้างทางเวลาในตัวควบคุม จึงไม่เหมาะสมกับระบบที่มีค่าคงตัวเวลายาวนาน
- ทำให้ช่วงเวลาในการแกว่งยาวนานขึ้น

ในระบบควบคุม ค่าที่วัดได้และค่ากำหนดควรเป็นค่าเดียวกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวควรเป็นศูนย์ ถ้ามีความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว สัญญาณที่ออกจากตัวอินทิเกรต (เพิ่มขึ้น ด้วยอัตราคงที่ เมื่อสัญญาณเข้ามีค่าคงที่) ส่งต่อให้กับวงจรรขยาย ความคลาดเคลื่อนเป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมทั้งสัดส่วนและอินทิกรัล โดยสัญญาณออกจะมารวมกันที่วงจรรขยายและส่งสัญญาณไปควบคุมระบบตัวควบคุมจะทำให้ค่าที่วัดได้เพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่ากำหนด นั่นคือทำให้ความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม หาก T_i มีค่าน้อยลง ผลตอบอาจเกิดการแกว่งได้

2.3.4.3 ตัวควบคุมอนุพันธ์

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอินทิกรัล ต่างก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการควบคุมกระบวนการ แต่ความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้ สามารถรู้ได้ล่วงหน้าโดยพิจารณาจากแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณนั่นเอง ตัวอนุพันธ์มีหลักการทํางาน คือ ตัวควบคุมตอบสนองต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนถึงแม้ว่าความคลาดเคลื่อนยังมีค่าเล็กน้อย สัญญาณออกของตัวอนุพันธ์ไม่ได้สัมพันธ์กับขนาดของความคลาดเคลื่อนแต่ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน ถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ ตัวอนุพันธ์จะให้สัญญาณออกเป็นศูนย์ คุณลักษณะข้อนี้มีผลดีคือ ตัวควบคุมจะมีผลตอบสนองที่เกิดก่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้น และทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.13)

$$u(t) = K_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.13)$$

โดยที่ Derivative Time (T_d) เป็นเวลาที่แสดงถึงผลตอบสนองเนื่องจากตัวอนุพันธ์ การเพิ่ม T_d จะทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์มีค่ามากขึ้น เนื่องจากตัวอนุพันธ์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้กับค่าที่วัดได้เท่านั้น แต่ไม่ใช้กับค่ากำหนด เพราะการเปลี่ยนค่ากำหนดมักจะเป็นแบบขั้น (Step) ทำให้ผลตอบสนองของตัวอนุพันธ์เป็นพัลส์และทำให้เกิดการกระแทก (Bump) ของอุปกรณ์ในกระบวนการ สำหรับค่ากำหนดใช้เฉพาะกับตัวควบคุมสัดส่วนและอินทิกรัลตัวอนุพันธ์คือตัวควบคุมที่ก่อให้เกิดผลตรงข้ามกับตัวอินทิกรัล ดังนั้นจึงใช้ในการปรับปรุงกระบวนการที่มีการล่าช้าทางเวลา (Time Lag) มาก ๆ ทำให้ผลตอบสนองรวดเร็วขึ้น และช่วงเวลากว้างที่สั้นลง ข้อเสียของตัวอนุพันธ์คือ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนเป็นอย่างมาก เพราะมีผลตอบสนองโดยตรง ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่วัดได้ ดังนั้น แม้สัญญาณรบกวนจะมีขนาดเล็ก แต่ก็อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสัญญาณออกของตัวควบคุม จึงเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวอนุพันธ์ในการควบคุมผลของสัญญาณรบกวน ยิ่งไปกว่านั้นระบบใดที่มีสัญญาณรบกวนมาก จะไม่สามารถใช้ตัวอนุพันธ์ในวงการอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้เพียงตัวควบคุม PI เท่านั้น

ข้อสรุปของตัวควบคุมอนุพันธ์

- เหมาะสำหรับกระบวนการที่ล่าช้าทางเวลามาก ทำให้การควบคุมถึงจุดที่ต้องการเร็วขึ้น

- ถ้า T_d มากเกินไป ผลของตัวอนุพันธ์จะทำให้ผลตอบสนองไวขึ้นจนกระทั่งระบบอาจขาดเสถียรภาพได้
- ไม่เหมาะกับระบบที่มีตัวแปรกระบวนการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย หรือมีการล่าช้าหลังทางเวลาน้อย เพราะจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ
- ไม่ควรใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนมาก
- ใช้ชดเชยการล่าช้าที่เกิดจากตัวอินทิเกรตด้วยการนำหน้า (Lead) ในตัวอนุพันธ์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าที่กำหนดทันที ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างทันที และส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองของระบบ ถ้านำอนุพันธ์ของความคลาดเคลื่อน นั่นคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนแล้ว ไปรวมกับสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมแบบสัดส่วนและอินทิเกรเตอร์ จะทำให้การทำงานของระบบดีขึ้น การควบคุมเชิงอนุพันธ์ไม่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว แต่จะลดช่วงเวลาที่เข้าสู่ที่ (Settling Time) โดยลดการแกว่งลง

เมื่อเราใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID - Controller) ก็จะได้ผลการทำงานของทั้งตัวควบคุมพีดีและพีไอรวมกัน จะว่ากันตามจริงแล้ว การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี อาจดำเนินการแบบรวดเร็ว หมายถึง ออกแบบองค์ประกอบทั้งสามส่วนไปด้วยกัน หรือดำเนินการแบบสองจังหวะก็ได้ ซึ่งหมายความว่า เราอาจเลือกออกแบบตัวควบคุมพีดีหรือพีไอตัวใดตัวหนึ่งเสียก่อน แล้วจึงออกแบบอีกตัวที่เหลือ ตัวควบคุมในขั้นสุดท้ายก็จะเป็นการต่อเรียงกันของตัวควบคุมทั้งสองตัวนี้

2.4 การออกแบบโดยวิธีการปริภูมิสเตต (State Space Design)

ในการบรรยายสมการเชิงอนุพันธ์ทั่วไปนั้นสามารถบรรยายหรือเขียนอยู่ในรูปแบบของกลุ่มสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่ 1 ได้ ตัวแปรของสมการเชิงอนุพันธ์นั้นเรียกว่าตัวแปรสถานะหรือสเตต ซึ่งถ้าแก้สมการของกลุ่มสมการเชิงอนุพันธ์นั้นแล้วได้ผลลัพธ์ก็สามารถแสดงอยู่ในปริภูมิ (Space) ซึ่งมีตัวแปรเหล่านั้นเป็นแกนของปริภูมิ ความคิดในการบรรยายสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปแบบของปริภูมิสเตต (State Space Description) นี้ก่อให้เกิดวิธีการใหม่ ๆ ในการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งเป็นพื้นฐานของการออกแบบระบบควบคุมที่เรียกว่าการควบคุมสมัยใหม่ที่มีวิธีการที่แตกต่างออกไปจากวิธีการแบบเดิม ๆ ที่กล่าวไปในข้างต้น เช่น ระบบควบคุมชนิดเฟสล่าช้า, นำหน้า ระบบควบคุมพีไอดี เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีการที่เรียกว่าการควบคุมแบบคลาสสิก หรือระบบควบคุมแบบดั้งเดิมนั้นจะใช้สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนเป็นหลักในการออกแบบ ซึ่งในหัวข้อนี้กล่าวถึงการ

ออกแบบระบบควบคุมโดยใช้การพรรณาแบบปริภูมิสแตตเป็นหลัก ซึ่งจะเรียกวธีการออกแบบระบบควบคุมนี้ว่าการออกแบบโดยวธีการปริภูมิสแตต

โดยตัวควบคุมที่เป็นลักษณะของการควบคุมแบบธรรมดา หรือแบบดั้งเดิมนั้น โดยหลักจะใช้วธีการรูกทโลกัส และการตอบสนองเชิงความถี่ซึ่งจะนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบที่ถูกควบคุมมีลักษณะการตอบสนองหรือมีการทำงานตามที่ได้กำหนดไว้ เป้าหมายของการออกแบบระบบควบคุมในแบบวธีการปริภูมิสแตตนั้นมีเป้าหมายเช่นเดียวกัน แต่ต่างกันที่วธีการออกแบบเท่านั้น ข้อดีของการออกแบบโดยวธีการปริภูมิสแตตนี้จะเหมาะมากเมื่อระบบของเรามีความยุ่งยากสลับซับซ้อน คือ มีลักษณะสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสูง หรืออาจจะมีหลายอินพุตและหลายเอาท์พุต

โดยลักษณะรูปแบบของปริภูมิสแตตของระบบสมการเชิงเส้นที่ตัวพารามิเตอร์ของระบบไม่ขึ้นกับเวลา (Linear Time Invariant System) นั้นสามารถเขียนโดยสรุปได้ดังนี้

$$\dot{x} = Ax + Bu + B_1w \quad (2.14)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.15)$$

- โดยที่
- x = ปริภูมิสแตต (State Variable) ($n \times 1$)
 - y = เอาท์พุต (Output) ($m \times 1$)
 - u = อินพุต (Input) ($r \times 1$)
 - w = สัญญาณรบกวนอินพุต (Disturbance Input) ($p \times 1$)
 - A = เมทริกซ์ของระบบ (System Matrix) ($n \times n$)
 - B = เมทริกซ์สัญญาณอินพุต (Input Matrix) ($n \times r$)
 - C = เมทริกซ์สัญญาณเอาท์พุต (Output Matrix) ($m \times n$)
 - B_1 = เมทริกซ์สัญญาณรบกวน (Disturbance Matrix) ($n \times p$)
 - D = เมทริกซ์สัญญาณป้อนไปข้างหน้า (Feedforward Matrix)
 - n = อันดับของระบบ (System Order)
 - m = จำนวนสัญญาณเอาท์พุต (Number Of Outputs)
 - r = จำนวนสัญญาณอินพุต (Number Of Inputs)
 - p = จำนวนสัญญาณรบกวนอินพุต (Number Disturbance Inputs)

จะเห็นว่าสมการที่ (2.15) นั้นเราได้เพิ่ม $B_1 w$ เข้าไปด้วย ซึ่งเป็นส่วนของอินพุตที่เกิดจากสัญญาณรบกวน (Disturbance) ถ้าระบบควบคุมนี้ไม่มีสัญญาณรบกวน เราจะได้ว่า $B_1 w$ มีค่าเป็นศูนย์ หรือ $B_1 = 0$ และสมการ (2.15) นั้นจะมีพจน์ Du เพิ่มเข้าไปด้วย ซึ่งเป็นสัญญาณที่ป้อนไปข้างหน้า ถ้าระบบของเราไม่มีส่วนที่ป้อนไปข้างหน้าพจน์ Du นี้จะมีค่าเป็นศูนย์

2.4.1 การจัดรูปสมการปริภูมิสถานะในรูปแบบบัญญัติ

(State - Space Representation In Canonical Forms)

มีเทคนิคต่าง ๆ มากมายที่มีอยู่สำหรับการที่จะเป็นตัวแทนสมการปริภูมิสถานะเดิมของระบบเพื่อทำการจัดรูปแบบใหม่ให้เป็นที่ยอมรับในทางด้านการออกแบบระบบควบคุม โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดรูปของสมการปริภูมิสถานะนั้นมีเป้าหมายเพื่อทำให้การนำสมการปริภูมิสถานะสามารถนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ตัวตั้งเกตรระบบ ได้สะดวกและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การเขียนสมการสถานะเพื่อแสดงให้อยู่ในรูปแบบบัญญัติ (Canonical Forms) เราจะพิจารณาระบบ ที่ถูกกำหนดโดย

$$y^n + a_1 y^{n-1} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 u^n + b_1 u^{n-1} + \dots + b_{n-1} \dot{u} + b_n u \quad (2.16)$$

เมื่อ u คือ Input และ y คือ Output

สมการสามารถเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดดังสมการที่ (2.17)

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^n + b_1 s^{n-1} + \dots + b_{n-1} s + b_n}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (2.17)$$

โดยการจัดรูปแบบสมการปริภูมิสถานะสำหรับการนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุม คือรูปแบบบัญญัติของตัวควบคุม (Controllable Canonical Form) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (2.18)$$

และ

$$y = [b_n - a_n b_0 \quad b_{n-1} - a_{n-1} b_0 \quad \cdots \quad b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + b_0 u \quad (2.19)$$

โดยรูปแบบบัญญัติของตัวควบคุม เป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาการออกแบบระบบควบคุม โดยเราสามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปแบบดังกล่าวเพื่อทำให้การออกแบบระบบควบคุมในระบบที่มีอันดับสูงมากกว่าอันดับที่ 3 นั้นมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น

รูปแบบบัญญัติของตัวสังเกต (Observable Canonical Form) เช่นเดียวกับรูปแบบบัญญัติของตัวควบคุมโดยการจัดรูปแบบดังกล่าวมีขึ้นเพื่อทำให้การออกแบบตัวสังเกตมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น โดยการเขียนสมการสเตตในรูปของรูปแบบบัญญัติของตัวสังเกต สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & -a_n \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & -a_{n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_n - a_n b_0 \\ b_{n-1} - a_{n-1} b_0 \\ \vdots \\ b_1 - a_1 b_0 \end{bmatrix} u \quad (2.20)$$

และ

$$y = [0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + b_0 u \quad (2.21)$$

2.4.2 โพล ซีโร และค่าเจาะจง (Eigenvalues) จากรูปแบบปริภูมิสเตต

สำหรับสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนนั้น โพลก็คือค่า s ที่ทำให้สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนมีค่าเท่ากับอนันต์ หรืออาจจะกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งก็คือ ถ้าระบบที่ไม่มีอินพุตหรือฟังก์ชัน

แรง (Forcing Function) มีค่าเป็นศูนย์ ค่าโพล $s = \lambda_i$ ซึ่งจะทำให้ระบบมีการตอบสนองเป็นแบบ $Ke^{\lambda_i t}$ และค่า $s = \lambda_i$ นี้เรียกว่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของระบบ สำหรับระบบที่เขียนอยู่ในรูปแบบปริภูมิสแตตที่ไม่มีอินพุต สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.22)

$$\dot{x} = Ax \quad (2.22)$$

และถ้ากำหนดให้ $x(0) = x_0$ เป็นเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) และถ้าสมมติสมการตอบสนองให้มีรูปแบบ

$$x(t) = e^{\lambda_i t} x_0 \quad (2.23)$$

เราจะได้ว่า

$$\dot{x}(t) = \lambda_i e^{\lambda_i t} x_0 = Ax(t) = Ae^{\lambda_i t} x_0 \quad (2.24)$$

หรือ $Ax_0 = \lambda_i x_0$

ซึ่งเราสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2.25)

$$(\lambda_i I - A)x_0 = 0 \quad (2.25)$$

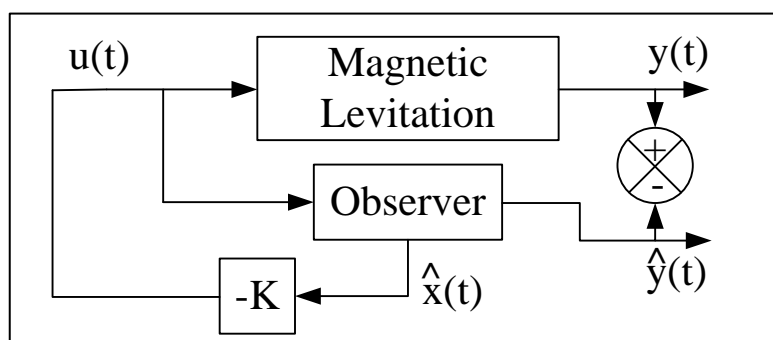
สมการที่ (2.25) เป็นสมการการแก้ปัญหาค่าเจาะจง (Eigenvalue Problem) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันแพร่หลาย โดยสามารถแก้สมการหาค่าเจาะจง λ_i และเวกเตอร์เจาะจง (Eigenvector) x_0 ของตัวเมทริกซ์ A ซึ่งจะได้ว่า

$$\det[(\lambda_i I - A)] = 0 \quad (2.26)$$

สมการที่ (2.26) แสดงสมการที่ใช้ในการหาโพลของฟังก์ชันถ่ายโอน หรือค่าเจาะจงของเมทริกซ์ A นั่นเอง

2.4.3 การออกแบบระบบควบคุมของระบบที่เขียนอยู่ในรูปแบบปริภูมิสแตต (State - Variable Feedback)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบระบบควบคุมของแบบจำลองการเคลื่อนที่หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่เขียนอยู่ในรูปแบบปริภูมิสแตต การออกแบบระบบควบคุมนี้เราจะเรียกว่าระบบควบคุมแบบวงปิดโดยใช้ตัวแปรสแตต การออกแบบระบบควบคุมที่ใช้กับระบบที่เขียนอยู่ในรูปแบบปริภูมิสแตตมีขั้นตอนทั่วไปอยู่ 3 ขั้นตอน กล่าวคือ ขั้นตอนแรกเราจะสมมติว่าเราสามารถวัดค่าตัวแปรสแตตของระบบได้ทุกตัวแล้วให้เราทำการออกแบบระบบควบคุมโดยอาศัยข้อมูลของตัวแปรสแตตทุกตัวของระบบที่สามารถวัดได้นี้ แต่ในความเป็นจริงแล้วสำหรับระบบที่มีอันดับสูง ๆ นั้น โดยปกติแล้วเราจะไม่สามารถวัดค่าตัวแปรสแตตได้ทุกสแตต หรือในทางปฏิบัติ การวัดสแตตทุกสแตตอาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงกับอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) ที่ต้องติดตั้งเพิ่มเติม ดังนั้นในขั้นตอนที่ 2 คือขั้นตอนที่หลังจากเราออกแบบระบบควบคุมจากสมมติฐานที่ว่าเราสามารถวัดค่าตัวแปรสแตตทุกสแตตได้ แต่ในความเป็นจริงเราไม่สามารถวัดได้ทุกสแตต ดังนั้น เราจะสร้างตัวประมาณค่าสแตต (State Estimator) หรือตัวสังเกต (Observer) เพื่อประมาณค่าสแตตที่เราไม่สามารถวัดหรือไม่ต้องการวัดได้ การออกแบบตัวประมาณค่าสแตตหรือตัวสังเกตนั้นมีทั้งการออกแบบเพื่อประมาณค่าตัวสแตตใหม่หมดทุกตัว โดยอาศัยข้อมูลสัญญาณอินพุตและสัญญาณเฉพาะสแตตที่วัดได้ ซึ่งเราจะเรียกว่าการประมาณค่าสแตตหรือตัวสังเกต แบบเต็มอันดับ (Full - Order State Estimator, Full - Order Observer) หรือเราอาจจะออกแบบตัวประมาณค่าสแตตเพื่อประมาณค่าสแตตเฉพาะตัวที่วัดไม่ได้หรือไม่ได้วัดเท่านั้น ซึ่งเราจะเรียกว่าการประมาณค่าสแตตหรือตัวสังเกต แบบลดอันดับ (Reduce - Order State Estimator, Reduce - Order Observer) ขั้นตอนที่ 3 ก็คือ ขั้นตอนที่น่าำตัวควบคุมกับตัวประมาณค่าสแตตหรือตัวสังเกตระบบเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมระบบต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยเนื้อหาภายในจะแสดงวิธีการออกแบบตัวสังเกตแบบเต็มอันดับเท่านั้น



รูปที่ 2.6 รูปภาพแสดงระบบควบคุมพร้อมกับตัวประมาณค่าสแตตหรือตัวสังเกตระบบ

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ เราสรุปได้ว่าการออกแบบระบบควบคุมแบบวงปิดโดยใช้ตัวแปรสแตต (State Variable Feedback) นี้จะมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน คือ ส่วนของตัวควบคุม และ ส่วนของตัวประมาณค่าสแตตหรือตัวสังเกตระบบนั่นเอง

ก่อนเริ่มทำการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีการป้อนกลับของตัวแปรสแตต เราจะกล่าวถึงคุณสมบัติที่สำคัญเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการออกแบบตัวควบคุม หรือที่เรียกว่า ความควบคุมได้ (Controllability) และความเป็นไปได้ในการสร้างตัวประมาณค่าสแตตหรือตัวสังเกตจากข้อมูลสแตตที่วัดได้บางตัวหรือความสังเกตได้ (Observability) ซึ่ง ณ ที่นี้จะกล่าวเพียงที่จำเป็น โดยก่อนจะออกแบบตัวควบคุมได้เราจำเป็นต้องตรวจสอบความควบคุมได้ของระบบเสียก่อน ถ้าระบบไม่มีความควบคุมได้เราก็ไม่สามารถออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการนี้ ในทำนองเดียวกันก่อนที่เราจะออกแบบตัวประมาณค่าสแตตหรือตัวสังเกตเราต้องตรวจสอบก่อนว่าระบบมีความสังเกตได้หรือไม่เช่นเดียวกัน

จากระบบที่เขียนในรูปแบบปริภูมิสแตตดังสมการที่ (2.13) ระบบจะมีความสามารถในการควบคุมได้โดยพิจารณาจากเมทริกซ์ A และเมทริกซ์ B ว่าจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ คือ ค่าลำดับชั้น (Rank) ของเมทริกซ์ความควบคุมได้ (Controllability Matrix) ซึ่งกำหนดว่า

$$\text{Controllability matrix} = \beta = \begin{bmatrix} B \\ AB \\ \vdots \\ A^{n-1}B \end{bmatrix}^T$$

เมทริกซ์ความควบคุมได้นั้นจะต้องมีค่าเท่ากับ n เมื่อ n คือค่าอันดับของระบบที่ต้องการควบคุม

ในส่วนของความสังเกตได้ หรือ Observability นั้น กล่าวถึงระบบที่เขียนในรูปแบบปริภูมิสแตตดังสมการที่ (2.10) และ (2.11) ระบบจะมีความสังเกตได้โดยพิจารณาที่เมทริกซ์ A และเมทริกซ์ C โดยการพิจารณาเมทริกซ์ความสังเกตได้ (Observability Matrix) ซึ่งกำหนดว่า

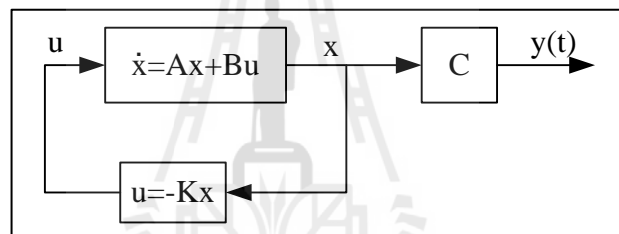
$$\text{Observability matrix} = \mathcal{O} = \begin{bmatrix} C^T & A^T C^T & \cdots & (A^T)^{n-1} C^T \end{bmatrix}$$

ระบบใด ๆ จะมีความสังเกตได้ก็ต่อเมื่อ ค่าลำดับชั้นของเมทริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ n ($\text{Rank}[\mathcal{O}] = n$) เมื่อ n คือ อันดับของระบบหรือของเมทริกซ์ A

ขั้นตอนแรกที่เป็นขั้นตอนการออกแบบเราจะสมมติชั่วคราวก่อนว่าคำสั่งอินพุตอ้างอิง (Command Reference) มีค่าเป็นศูนย์ ($r = 0$) และกฎของการควบคุม (Control Law) ที่กำหนดว่า

$$u = -KX = -[k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_n] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

รูปแบบของการออกแบบระบบควบคุมแบบนี้แสดงในรูปที่ 2.7 จำนวนของค่าอัตราขยาย K จะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรสถานะของระบบที่จะควบคุม



รูปที่ 2.7 รูปแบบของการออกแบบระบบควบคุมแบบปริภูมิสถานะ

ถ้าแทนตัวควบคุมจากสมการที่ (2.27) ลงในสมการที่ (2.14) จะได้ดังสมการที่ (2.28)

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (2.28)$$

ดังนั้น สมการลักษณะเฉพาะเฉพาะของระบบควบคุมแบบปิดดังสมการที่ (2.29)

$$\det[sI - (A - BK)] = 0 \quad (2.29)$$

การออกแบบตัวควบคุมก็คือ การเลือกค่าอัตราขยาย K เพื่อให้รากของสมการที่ (2.29) หรือ โพลของระบบควบคุมมีค่าตามที่เรต้องการนั่นเอง โดยเมื่อกำหนดโพลของระบบควบคุมตาม

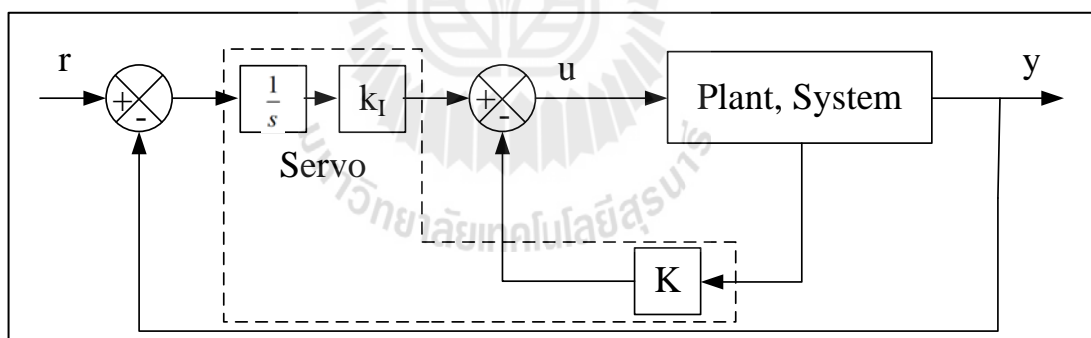
ที่ต้องการแล้วจะสามารถหาค่าอัตราขยายได้จากสูตรของแอกเคอร์มันน์ (Ackermann's Formula) ซึ่งสามารถทำการคำนวณได้ด้วยมือ และสามารถใช้คำสั่งในโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้

2.4.4 การออกแบบระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพล

(Servo System Using Pole – Placement Control Design)

จากที่กล่าวมาในหัวข้อการออกแบบระบบควบคุมของระบบที่เขียนอยู่ในรูปแบบปริภูมิสแตตนั้นเป็นลักษณะของระบบควบคุมโดยการกำหนดโพลของระบบควบคุมตามที่ต้องการ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบควบคุมป้อนกลับด้วยตัวแปรสแตตอีกหนึ่งชนิดซึ่งมีชื่อว่าระบบควบคุมเซอร์โว Type - 1 สำหรับระบบที่มีลักษณะเป็น Type - 0 ด้วยการแทรกตัวอินทิกรัล (Integral) เข้าไประหว่างส่วนเปรียบเทียบความผิดพลาดจากการป้อนกลับ และ พลานต์ (Plant) ซึ่งระบบควบคุมเซอร์โว Type - 1 จะส่งผลทำให้ระบบลักษณะเป็น Type - 1 ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวลดลง จึงเป็นผลดีต่อระบบที่ต้องการควบคุมสัญญาณเอาต์พุตของระบบให้ดำเนินงานตามค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิงของระบบ (Tracking) นั่นเอง

โดยลักษณะแผนภาพการทำงานของระบบควบคุมเซอร์โว Type - 1 มีลักษณะดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมเซอร์โว Type - 1

จากระบบที่เขียนในรูปแบบปริภูมิสแตตดังสมการที่ (2.14) และ (2.15) กำหนดให้

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= Ax + Bu \\
 y &= Cx \\
 u_1 &= -Kx + k_I \xi \\
 \dot{\xi} &= r - y = r - Cx
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

- เมื่อ x คือ สตตเวกเตอร์ของระบบ
 u คือ สัญญาณควบคุม
 y คือ สัญญาณเอาต์พุตของระบบ
 ξ คือ ข้อมูลที่ส่งออกมาจากอินทิกรัล
 r คือ สัญญาณอินพุตอ้างอิง

สามารถเขียนสมการระบบพลศาสตร์ดังสมการที่ (2.31)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \quad (2.31)$$

เราจะออกแบบระบบให้มีเสถียรภาพ กล่าวคือ $x(\infty)$, $\xi(\infty)$ และ $u(\infty)$ เข้าใกล้ค่าคงที่ตามลำดับ ณ สภาวะสมดุล $\dot{\xi}(t) = 0$ และเราได้ $y(\infty) = r$ ดังนั้น ที่สภาวะสมดุล เราจะได้ดังสมการที่ (2.32)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(\infty) \\ \dot{\xi}(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(\infty) \\ \xi(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(\infty) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(\infty) \quad (2.32)$$

เมื่อ $r(t)$ เป็น Unit Step input และ $r(\infty) = r(t) = r(const.)$ สำหรับ $t > 0$ จากสมการที่ (2.31) และ (2.32) จะได้ดังสมการที่ (2.33)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e(t) \\ \dot{\xi}_e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(t) \\ \xi_e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u_e(t) \quad (2.33)$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned} x(t) - x(\infty) &= x_e(t), \\ \xi(t) - \xi(\infty) &= \xi_e(t), \\ u(t) - u(\infty) &= u_e(t) \end{aligned}$$

$$\text{เมื่อ } u_e(t) = -Kx_e(t) + k_I \xi_e(t) \quad (2.34)$$

กำหนด Order ของระบบใหม่เป็น $(n+1)$ เวกเตอร์ความผิดพลาด $e(t)$ โดย

$$e(t) = [x_e(t) \quad \xi_e(t)]^T = (n+1)\text{vector} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.33) และสมการที่ (2.35) จะเขียนได้ว่า

$$\dot{e} = \hat{A}e + \hat{B}u_e \quad (2.36)$$

$$\text{เมื่อ } \hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{จะได้ } u_e = -\hat{K}e$$

$$\text{เมื่อ } \hat{K} = [K \quad -k_I]$$

จะสังเกตได้ว่าระบบควบคุมชนิดนี้จะมีจำนวนของอัตราขยายของตัวควบคุมเป็น $n+1$ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นมาของตัวอินทิกรัลเพื่อใช้ในการลดค่าความผิดพลาดที่สภาวะสมดุลของระบบที่ต้องการให้เข้าสู่ศูนย์

2.5 ตัวประมาณค่าตัวแปรสแตต (State Estimator) หรือตัวสังเกตระบบ (Observer)

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการป้อนกลับตัวแปรสแตต เช่น วิธีการในการปรับเปลี่ยนค่าโพลของระบบ (Pole Placement Method) ระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลของระบบ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการสร้างหรือการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมที่ทำการออกแบบมานั้น จะต้องประกอบด้วยข้อมูลจากสัญญาณของสแตตเวกเตอร์ (State Vector) ของระบบทุกค่า ซึ่งส่วนมากแล้วการวัดข้อมูลจากตัวแปรสแตตหรือสัญญาณสแตตเวกเตอร์ทุกค่าเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะในระบบที่มีอันดับสูง ถึงแม้ในบางระบบจะสามารถวัดค่าตัวแปรสแตตได้แต่ก็อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการวัด หรือบางระบบที่ต้องการอุปกรณ์รับรู้พิเศษ (Special Sensor) เพื่อใช้ใน

การวัดค่าตัวแปรสแตตเหล่านั้น การควบคุมจึงมีการนำเอาตัวประมาณค่าตัว หรือตัวสังเกตมาใช้งาน เพื่อประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบที่จะทำการควบคุม วิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวสังเกต เพื่อให้สามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วจึงมีความสำคัญ ต่อการควบคุมระบบอย่างมาก โดยการออกแบบตัวสังเกตนั้นสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ตัวสังเกต อันดับเต็ม (Full - Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสแตตทุกตัวของระบบ และตัวสังเกต แบบลดอันดับ (Reduce - Order Observer) เมื่อต้องการทราบค่าตัวแปรสแตตที่ไม่สามารถวัดได้บาง ตัวเท่านั้น ตัวสังเกตอันดับเต็มจะทำการประมาณค่าตัวแปรสแตตทุกตัวใหม่ทั้งหมด โดยการนำค่า ของตัวแปรสแตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบมาใช้ในการประมาณ ค่าตัวแปรสแตต ตัวสังเกตแบบลดอันดับ คือ การประมาณค่าตัวแปรสแตตที่ไม่สามารถวัดได้เท่านั้น โดยใช้ค่าของตัวแปรสแตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตของระบบควบคุมที่ส่งเข้าไป ในระบบ ตัวสังเกตที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักใช้กับระบบที่สามารถวัดค่าตัวแปรสแตตได้บางสแตต เพื่อที่จะลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบเมื่อใช้ตัวสังเกต

งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบตัวสังเกตแบบอันดับเต็มโดยตัวสังเกตจะทำการประมาณค่าตัวแปรสแตตทุกตัวใหม่ทั้งหมด โดยใช้ข้อมูลของเอาท์พุตบางตัวที่สามารถวัดได้และสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบที่จะทำการประมาณค่าสแตต สมการระบบสามารถทำหน้าที่เป็นตัวประมาณค่าสแตตของตัวเองได้แต่เป็นการประมาณในลักษณะแบบเปิด (Open - Loop Observer)

พิจารณาระบบเชิงเส้นที่ค่าตัวแปรของระบบไม่ขึ้นกับเวลา ที่ต้องการจะใช้ตัวสังเกตในการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบเขียนในรูปแบบปริภูมิสแตตได้ดังสมการที่ (2.37)

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.37)$$

$$y = Cx \quad (2.38)$$

เมื่อ

- A = เมทริกซ์สแตตของระบบ $[n \times n]$
- B = เมทริกซ์อินพุตของระบบ $[n \times 1]$
- C = เมทริกซ์เอาท์พุตของระบบ $[1 \times n]$
- x = สแตตเวกเตอร์ของระบบ $[n \times 1]$
- u = อินพุตของระบบ $[1 \times 1]$
- y = เอาท์พุตของระบบ $[1 \times 1]$

ตัวสังเกตของระบบพลศาสตร์หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ต้องการจะทำการควบคุมมีรูปแบบดังสมการที่ (2.39)

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}] \quad (2.39)$$

เมื่อ $L =$ เมทริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต $[n \times 1]$

$\hat{x} =$ ค่าตัวแปรสถานะของตัวสังเกต $[n \times 1]$

สมการที่ (2.37) ลบด้วยสมการที่ (2.39) แสดงดังสมการที่ (2.40)

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax + Bu - \{A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}]\} \quad (2.40)$$

จัดรูปสมการจะได้ดังสมการที่ (2.41)

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = [A - LC](x - \hat{x}) \quad (2.41)$$

สมการที่ (2.41) สามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{e} = [A - LC]e \quad (2.42)$$

เมื่อ $e = x - \hat{x}$ คือ ค่าผิดพลาดของการประมาณค่าสแตต

เมื่อค่าความแตกต่างของ $x - \hat{x} \rightarrow 0$ จะทำให้ค่าความผิดพลาดของตัวแปรสแตตซึ่งวัดได้จากระบบจริง และตัวสังเกตหมดไปผลที่ได้นั้นจะทำให้ตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าของตัวแปรสแตตในระบบที่ต้องการทำการสังเกตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับค่าอัตราขยายของตัวสังเกต (Observer Gain) นี้จะมีวิธีการเกี่ยวกับการเลือกค่าอัตราขยาย K ของกรณีของการออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับของตัวแปรสแตต โดยสามารถหาได้จากสูตรของแอกเคอร์มันน์ดังสมการที่ (2.43)

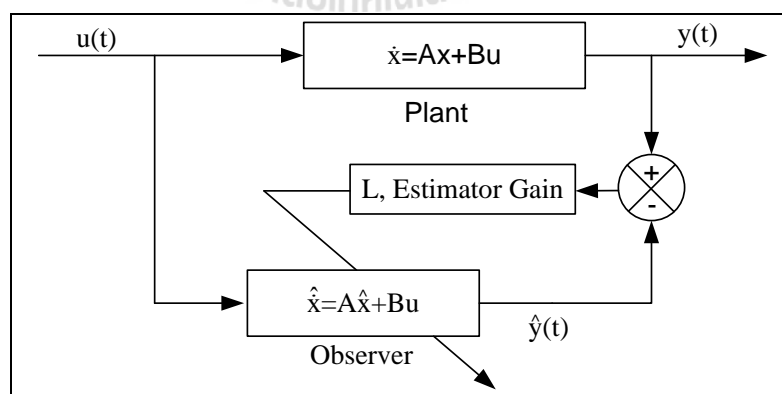
$$L = \phi(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \cdot \\ \cdot \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

เมื่อสมการลักษณะเฉพาะ คือ

$$q(\lambda) = \lambda^n + \alpha_1 \lambda^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} \lambda + \alpha_n \quad (2.44)$$

$$q(A) = A^n + \alpha_1 A^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} A + \alpha_n I \quad (2.45)$$

หลักการการทำงานของตัวสังเกตจะนำอินพุตและเอาต์พุตของระบบที่ต้องการทราบค่าตัวแปรสแตตภายในระบบ รวมทั้งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างระบบที่จะทำการสังเกต และตัวสังเกตมาประมวลผลโดยผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อปรับค่าตัวแปรให้ตัวสังเกต เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจนได้ค่าประมาณของตัวแปรสแตตที่ต้องการภายในระบบที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ทั้งนี้การสร้างตัวสังเกตจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรทั้งหมดของระบบที่จะทำการสังเกตเพื่อนำค่าตัวแปรนั้นมาใช้ในโครงสร้างของตัวสังเกต



รูปที่ 2.9 แผนภาพหลักการทำงานของตัวสังเกต

เมื่อ	L	=	ค่าเมตริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต $[n \times 1]$
	$u(t)$	=	ค่าอินพุตของระบบ $[1 \times 1]$
	$y(t)$	=	ค่าเอาต์พุตของระบบ $[1 \times 1]$
	$\hat{y}(t)$	=	ค่าเอาต์พุตของตัวสังเกต $[1 \times 1]$
	$\hat{x}(t)$	=	ค่าตัวแปรสแตตของตัวสังเกต $[n \times 1]$

ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อใช้งานต้องทำการหาค่าตัวแปรในระบบของตัวสังเกตซึ่งได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ที่ต้องการประมาณค่าตัวแปรสแตตเพื่อหาค่าของตัวแปรที่ถูกต้องของระบบเพื่อนำไปใช้งาน ซึ่งจะทำการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบที่ต้องการโดยใช้ตัวสังเกตมีความผิดพลาดลดลง และอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ คือการกำหนดตัวแปรของตัวสังเกตในขั้นตอนการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต เพื่อให้ระบบของตัวสังเกตมีความเสถียรและมีความรวดเร็วในการตอบสนองเพียงพอที่จะทำให้ค่าสัญญาณความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด นั่นก็คือสัญญาณประมาณ $\hat{x}(t)$ จะมีค่าเท่ากับสัญญาณสแตตจริงหรือ $x(t)$ ในทางปฏิบัติการออกแบบจะให้โพลของตัวสังเกตอยู่บนแกนจริง (Real Axis) เพื่อที่จะนำไปทำการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตหากเราสามารถจัดรูปให้ไปอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่ารูปแบบบัญญัติของตัวสังเกตได้ ส่งผลให้การออกแบบตัวควบคุมมีความสะดวกมากขึ้น โดยสามารถใช้สูตรของแอกเคอร์มันน์ช่วยในการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกตได้

2.6 การทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization)

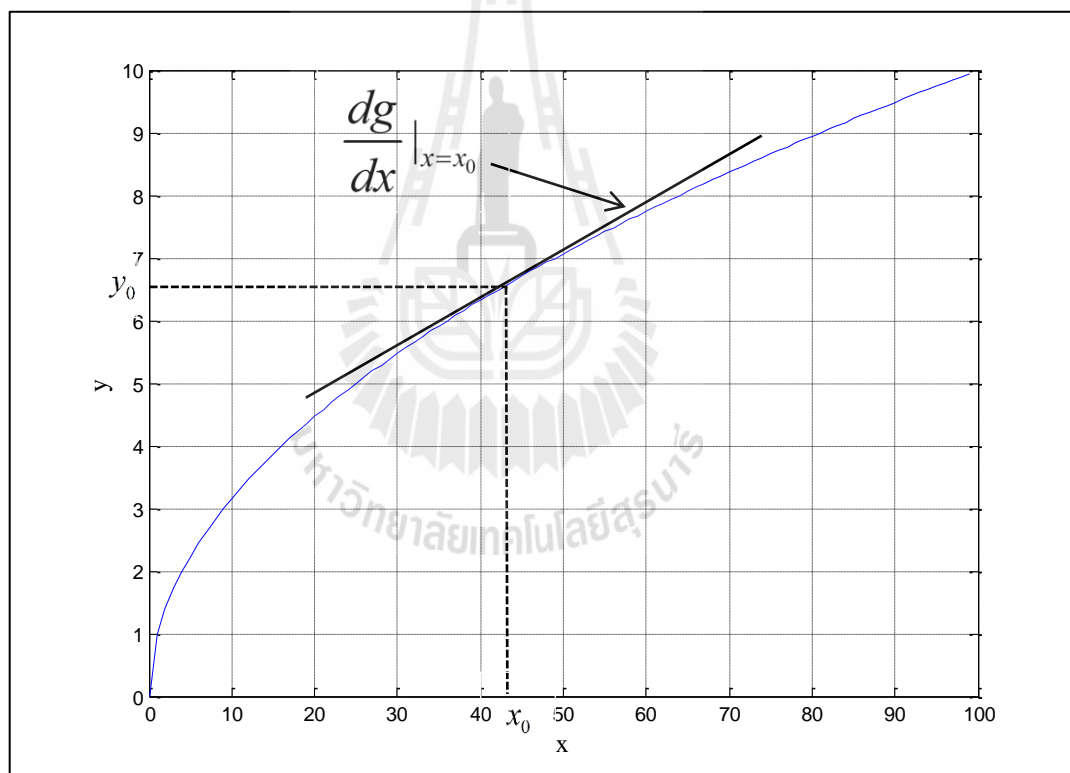
ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้แก่ระบบ โดยทั่วไปจะพบว่าในระบบต่าง ๆ ที่พบในธรรมชาติ แม้กระทั่งอุปกรณ์ที่มนุษย์สร้างขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์นั้นส่วนใหญ่ล้วนแต่มีลักษณะสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นทั้งสิ้น การทำให้เป็นเชิงเส้น จึงมีบทบาทที่สำคัญในการประมาณสมการไม่เชิงเส้น (Nonlinear Equation) ที่ใช้ในการอธิบายระบบ ให้เป็นสมการเชิงเส้น เพื่อนำไปสู่การหาฟังก์ชันถ่ายโอนได้อย่างเหมาะสม ยกตัวอย่างเช่น การใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series) การทำให้เป็นเชิงเส้นโดยวิธีของจาโคเบียน (Jacobian Linearization) เป็นต้น ยกตัวอย่างเทคนิคการทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series) เข้าไปแทนฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่พบในสมการดั้งเดิม การกระจายนั้นดำเนินการโดยรอบจุดปฏิบัติงานของระบบ

2.6.1 การทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์

สมมติมีฟังก์ชันไม่เชิงเส้นซึ่งเป็นตัวแทนสมการการเคลื่อนที่ของระบบทางกลทั่วไปดังสมการที่ (2.46)

$$y(t) = g(x(t)) \quad (2.46)$$

โดยที่ฟังก์ชัน $g(x(t))$ เป็นฟังก์ชันที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปร $y(t)$ และตัวแปร $x(t)$ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจจะแสดงได้ดังเส้นโค้งในรูปที่ 2.10 ซึ่งมีลักษณะสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.10 การประมาณค่าเส้นตรงของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ณ จุดที่ระบบทำงานปกติ

จากรูปที่ 2.10 ถ้าจุดที่ระบบทำงานปกติ (Normal Operating Point) คือ x_0 จากรูปจะเห็นว่า เส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร $x(t)$ และตัวแปร $y(t)$ มีความต่อเนื่อง

ที่จุดที่ระบบทำงานปกตินี้ ดังนั้น จากอนุกรมเทย์เลอร์ จะได้ว่า บริเวณในช่วงใกล้กับจุดทำงานปกติ สมการอนุกรมเทย์เลอร์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.47)

$$y = g(x) = g(x_0) + \frac{dg}{dx} \Big|_{x=x_0} (x - x_0) + \frac{d^2g}{dx^2} \Big|_{x=x_0} \frac{(x - x_0)^2}{2!} + \dots \quad (2.47)$$

ถ้าค่า $(x - x_0)$ มีค่าน้อย เราสามารถประมาณค่าสมการโดยละเลยพจน์ที่มีอันดับสูงกว่าหนึ่งในสมการอนุกรมเทย์เลอร์ได้โดยไม่สูญเสียความแม่นยำหรือความถูกต้อง ดังนั้น จากสมการที่ (2.47) จะได้ดังสมการที่ (2.48)

$$y = g(x) = g(x_0) + \frac{dg}{dx} \Big|_{x=x_0} (x - x_0) \quad (2.48)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับระบบที่มีตัวแปรมากกว่า 1 ตัว เราสามารถเขียนสมการอนุกรมเทย์เลอร์ได้ดังสมการที่ (2.49)

$$y = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.49)$$

สมการอนุกรมเทย์เลอร์ของสมการที่มีตัวแปรหลายตัวดังสมการที่ (2.37) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.50)

$$y = g(x_{1,0}, x_{2,0}, \dots, x_{n,0}) + \frac{\partial g}{\partial x_1} \Big|_{x=x_0} (x_1 - x_{1,0}) + \frac{\partial g}{\partial x_2} \Big|_{x=x_0} (x_2 - x_{2,0}) + \frac{\partial g}{\partial x_n} \Big|_{x=x_0} (x_n - x_{n,0}) + \dots, \quad (2.50)$$

โดยวิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประมาณสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ให้เป็นเชิงเส้นได้ในช่วงระยะเวลาการปฏิบัติงานระยะหนึ่งเท่านั้น หากเกินกว่าระยะเวลาปฏิบัติงานก็จะไม่สามารถประมาณให้เป็นเชิงเส้นได้

2.6.2 การทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยวิธี Jacobian Linearization

การทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยวิธี Jacobian Linearization เป็นวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้นที่เหมาะสมกับลักษณะของสมการเชิงอนุพันธ์ที่ต้องการจัดรูปในลักษณะปริภูมิสแตต หรือในรูปเมทริกซ์ ที่มีหลายตัวแปร ด้วยการประยุกต์การกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์เข้ามาใช้ในการทำให้เป็นเชิงเส้น สมมติให้สมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังสมการที่ (2.51)

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (2.51)$$

เมื่อ f คือฟังก์ชันใด ๆ และ $f(\bar{x}, \bar{u}) = 0$ สมมติให้ \bar{x} เป็นจุดปฏิบัติงาน และ \bar{u} เป็นอินพุต ณ ตำแหน่งปฏิบัติงาน และเมื่อพิจารณาการเริ่มต้นการทำงานของระบบ จากค่าเริ่มต้น $x(t_0) = \bar{x}$ และการให้อินพุต $u(t) = \bar{u}$ สำหรับที่เวลา $t \geq t_0$ ส่งผลให้ $x(t) = \bar{x}$

เรารู้ว่า เริ่มต้นระบบ $x(t_0) = \bar{x}$ ด้วยอินพุต $u(t) = \bar{u}$ สถานะของระบบจะยังคงที่ $x(t) = \bar{x}$ ตลอดเวลา t แต่มีสิ่งที่เกิดขึ้นเล็กน้อยตอนเริ่มต้นออกไปจาก \bar{x} และ \bar{u} โดยเรากำหนดตัวแปรความเบี่ยงเบนของความแตกต่างดังสมการที่ (2.52) และ (2.53)

$$\delta x(t) = x(t) - \bar{x} \quad (2.52)$$

$$\delta u(t) = u(t) - \bar{u} \quad (2.53)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ (2.52) และ (2.53) ลงในสมการที่ (2.51) เราจะได้สมการที่ (2.54)

$$\dot{\delta x}(t) = f(\bar{x} + \delta x(t), \bar{u} + \delta u(t)) \quad (2.54)$$

ถัดไปเป็นการนำอนุกรมเทย์เลอร์เข้าไปกระจายเพื่อทำสมการดังกล่าวให้เป็นเชิงเส้นตามวิธีของการทำให้เป็นเชิงเส้น โดยอนุกรมเทย์เลอร์ โดยการตัดทอนที่มีอันดับมากกว่าหนึ่งออกไปเช่นเดียวกัน

$$\dot{\delta x}(t) \approx f(\bar{x}, \bar{u}) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{\substack{x=\bar{x} \\ u=\bar{u}}} \delta x(t) + \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{\substack{x=\bar{x} \\ u=\bar{u}}} \delta u(t) \quad (2.55)$$

แต่ $f(\bar{x}, \bar{u}) = 0$ ดังนั้น

$$\dot{x}(t) \approx \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{\substack{x=\bar{x} \\ u=\bar{u}}} \delta x(t) + \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{\substack{x=\bar{x} \\ u=\bar{u}}} \delta u(t) \quad (2.56)$$

เราสามารถนำสมการ (2.56) ไปใช้ประมาณค่าสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นเชิงเส้นได้ และเมื่อจัดทำในสมการปริภูมิสแตต จะมีลักษณะดังนี้

$$\dot{\delta x}(t) = A\delta x(t) + B\delta u(t) \quad (2.57)$$

เมื่อเมทริกซ์ A เป็นเมทริกซ์ของระบบ และเมทริกซ์ B เป็นเมทริกซ์อินพุต

2.7 จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm)

จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) เป็นเทคนิคการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ที่ทรงประสิทธิภาพเทคนิคหนึ่งและเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยรับการพัฒนามาจากการหลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์จินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งเป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่ามีวิวัฒนาการอยู่ในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบ และได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computing) โดยปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพ และมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยจินเนติกอัลกอริทึมเป็นขั้นตอนในการค้นหาคำตอบให้กับระบบ ดังนั้นจินเนติกอัลกอริทึมจึงเป็นเครื่องมือในการช่วยคำนวณอย่างหนึ่งที่คอยทำงานอยู่ข้าง ๆ ระบบ โดยที่วัฏจักรของจินเนติกอัลกอริทึม โดยธรรมชาติแล้วประกอบไปด้วย 3 กระบวนการที่สำคัญ ได้แก่ การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic Operation, GO) และ การแทนที่ (Replacement) โดยแต่ละกระบวนการมีขั้นตอนดังนี้

2.7.1 การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection)

การคัดเลือกสายพันธุ์ คือขั้นตอนในการคัดเลือกประชากรที่ดีในระบบไปเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์เพื่อให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป ซึ่งการคัดเลือกสายพันธุ์เป็นขั้นตอนในการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดจากภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด ซึ่งโครโมโซมที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นตัวต้นกำเนิดสายพันธุ์หรือพ่อแม่เพื่อใช้ในการให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป โดยปกติแล้วเพื่อให้ได้

สายพันธุ์ที่ดีต้นกำเนิดของสายพันธุ์จะต้องดีด้วยจึงกลายเป็นปัญหาว่าจะทำการคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ดีได้อย่างไรการคัดเลือกสายพันธุ์เป็นการจำลองการคัดเลือกโครโมโซมที่จะสามารถอยู่รอดได้ในแต่ละรุ่น สำหรับ GA นั้นจะทำการคัดเลือกโครโมโซมโดยการพิจารณาที่ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้น ๆ ดังนั้นโครโมโซมไหนมีค่าความเหมาะสมที่ดีย่อมหมายถึงการเป็นโครโมโซมที่ดีและควรมีโอกาสที่จะให้ลูกหลาน (Offspring) ในจำนวนที่มากกว่าได้ ซึ่งย่อมเป็นการบ่งบอกว่าโอกาสในการอยู่รอดในรุ่นถัดไปก็จะมีเพิ่มมากขึ้นด้วย

2.7.2 ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic Operation, GO)

คือกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมด้วยวิธีการทางสายพันธุ์เป็นขั้นตอนการนำเอาโครโมโซมที่เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์นั้นมาทำการเปลี่ยนแปลงให้เกิดโครโมโซมใหม่ขึ้นมา กลายเป็นโครโมโซมลูกหลาน ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้เป็นขั้นตอนสำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งในวัฏจักรของ GA ที่ซึ่งมีการคาดหวังว่าโครโมโซมลูกหลานที่เกิดขึ้นมานั้นจะได้รับส่วนดีของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์โดยผ่านปฏิบัติการทางสายพันธุ์นี้ถ้าพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากปฏิบัติการทางสายพันธุ์ที่เกิดขึ้นกับประชากรซึ่งเป็นคำตอบของระบบแล้ว เราสามารถเปรียบเทียบปฏิบัติการทางสายพันธุ์ได้กับการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบนั่นเอง โดยปกติทั่วไปปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของ GA จะมีอยู่ 2 วิธีหลัก ๆ คือ การทำครอสโอเวอร์และการทำมิวเทชัน

1) ครอสโอเวอร์เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม (Recombination Operator) โดยทำการรวมส่วนย่อยระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้นไป เพื่อให้กลายเป็นโครโมโซมลูกหลาน โครโมโซมลูกหลานที่ได้จากการครอสโอเวอร์จะมีพันธุกรรมจากต้นกำเนิดสายพันธุ์อยู่ในตัว โดยจะมีการกำหนดอัตราการทำครอสโอเวอร์เอาไว้ ส่วนใหญ่จะใช้ความน่าจะเป็น (P_c) เป็นตัวกำหนดอัตราดังกล่าว การทำครอสโอเวอร์มีวิธีด้วยกัน 3 วิธีคือ

- การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว (Single - Point Crossover) การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวนี้โครโมโซมลูกหลานจะมีสายพันธุ์ของแต่ละต้นกำเนิดอยู่อย่างละหนึ่งส่วน จุดตัดในการทำ ครอสโอเวอร์โดยปกติจะได้มาจากการสุ่มเลือกตัวอย่างของการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว

- การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด (Multiple - Point Crossover) การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด โครโมโซมลูกหลานจะมีสายพันธุ์ของต้นกำเนิดอยู่มากกว่าหนึ่งส่วน หลักการเลือกจุดของครอสโอเวอร์นี้มีอยู่หลายแบบแต่ละแบบจะให้ผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสายพันธุ์ในโครโมโซมลูกหลานที่แตกต่างกันออกไป โดยวิธีที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับใช้ทั่วไปคือการสุ่มเลือกจุดครอสโอเวอร์ การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุดจะให้ผลของลูกหลานที่มีความ

หลากหลายกว่าการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวอันจะมีผลให้การลู่เข้าสู่คำตอบของระบบสามารถครอบคลุมพื้นที่ของคำตอบได้มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซมลูกหลานได้มากกว่าการทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวอาจจะทำให้มีโอกาสเบี่ยงเบนของคำตอบที่มีอยู่ในโครโมโซมลูกหลานได้ในอัตราที่สูงกว่าเช่นกัน

- ครอสโอเวอร์แบบสม่ำเสมอ (Uniform Crossover) การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียวและหลายจุดมีการกำหนดจุดตัดเอาไว้ก่อนที่จะทำการสลับส่วนย่อยของโครโมโซมที่จุดนั้น ๆ วิธีดังกล่าวมีความแตกต่างไปจากการทำครอสโอเวอร์แบบสม่ำเสมอที่ซึ่งถูกออกแบบให้ทุกจุดบนโครโมโซมสามารถเป็นจุดตัดได้ในทางปฏิบัติจะมีการใช้ครอสโอเวอร์แมสก์หรือตัวพราง (Cross Over Mask) ช่วยในการทำครอสโอเวอร์ตัวพรางดังกล่าวจะเป็นชนิดไบนารี และมีขนาดจำนวนบิตเท่ากับความยาวของโครโมโซมค่าของตัวพรางที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะเป็นตัวบอกถึงการครอสโอเวอร์ระหว่างต้นกำเนิดสายพันธุ์ตำแหน่งที่ตัวพรางมีค่าเป็น 1 โครโมโซมลูกหลานจะได้จากการสลับส่วนย่อยของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ ถ้าตำแหน่งที่ตัวพรางมีค่าเป็น 0 โครโมโซมลูกหลานจะยังคงเป็นส่วนย่อยของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์โดยไม่มีการสลับส่วนแต่อย่างใด

2) มิวเทชันเป็นวิธีการแปรผันยีนหรือส่วนย่อยของโครโมโซม ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในทางชีววิทยานั้นเองปกติแล้วอัตราการทำมิวเทชันจะมีค่าค่อนข้างต่ำหรืออาจจะกล่าวได้ว่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเทชันนั้นมีค่าน้อยถ้ามิวเทชันคือการเปลี่ยนแปลงยีนในโครโมโซมแล้วมิวเทชันจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงตัวเลขของโครโมโซมนั้นเองเพราะในทางปฏิบัติแล้วยีนของโครโมโซมก็คือ บิตในระบบตัวเลขของคอมพิวเตอร์การทำ มิวเทชันเปรียบเสมือนกับการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบเช่นเดียวกับการทำครอสโอเวอร์นอกเหนือไปจากนั้นแล้วมิวเทชันยังทำให้เกิดความหลากหลายขึ้นในกลุ่มประชากรมีผลให้คำตอบที่เกิดขึ้นในกระบวนการของจินเนติกอัลกอริทึมครอบคลุมพื้นที่การค้นหาตอบทั่วถึงยิ่งขึ้นอัตราการทำมิวเทชันเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเพราะจะมีผลต่อพฤติกรรมการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึมและขนาดของประชากรเพื่อให้การสำรวจพื้นที่ในการค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างทั่วถึงดังนั้นการกำหนดอัตราการทำมิวเทชันต้องมีความเหมาะสมที่สุดต่อระบบด้วยเพื่อก่อให้เกิดผลในการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น สรุปได้ว่าจุดประสงค์หลักของการทำมิวเทชัน คือเพื่อให้จินเนติกอัลกอริทึมสามารถหลุดพ้นออกจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น โดยการป้องกันไม่ให้โครโมโซมประชากรเกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่มีความคล้ายคลึงกันทั้งหมด ซึ่งการทำครอสโอเวอร์และมิวเทชันเป็นการสร้างการเปลี่ยนแปลงของต้นกำเนิดสายพันธุ์ซึ่งให้ผลเป็นโครโมโซมลูกหลาน การทำครอสโอเวอร์มีผลให้โครโมโซม

ลูกหลานได้รับสายพันธุ์จากต้นกำเนิดโดยโครโมโซมลูกหลานจะได้รับส่วนที่ดีจากส่วนย่อยของต้นกำเนิดสายพันธุ์ไปในขณะที่การทำมิวเทชันเป็นการสร้างความแปรผันขึ้นในโครโมโซมลูกหลานเพื่อให้เกิดประชากรใหม่ที่ดีกว่าขึ้นปฏิบัติการทางสายพันธุ์ทั้งสองถูกใช้ในจินเนติกอัลกอริทึมโดยหวังว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้โครโมโซมลูกหลานมีสายพันธุ์ที่ดีขึ้นอันจะนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดต่อไป

2.7.3 การแทนที่ (Replacement)

การแทนที่ คือ การที่ลูกหลานกำเนิดใหม่ไปแทนที่ประชากรเก่าในรุ่นก่อนจุดประสงค์ในการแทนที่นั้นค่อนข้างชัดเจนกล่าวคือ การนำโครโมโซมลูกหลานมาแทนที่ประชากรรุ่นก่อน จะทำให้ประชากรรุ่นใหม่ประกอบไปด้วยโครโมโซมใหม่ ๆ ซึ่งเป็นโครโมโซมที่ดีกว่าเพราะได้สืบสายพันธุ์ที่ดีจากต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกแล้วกลยุทธในการคัดเลือกกว่าโครโมโซมไหนจะถูกแทนที่นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ

1) การแทนที่ประชากรทั้งรุ่น (Generational GA) เป็นการนำประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเก่าทั้งหมด ดังนั้นถ้าในระบบหนึ่งมีจำนวนประชากรเท่ากับ N จำนวนของโครโมโซมลูกหลานที่จะมาแทนที่จะต้องมีขนาด N เช่นกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายเนื่องมาจากไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนของการคัดเลือกกว่าประชากรส่วนไหนจะถูกแทนที่ แต่การที่ไม่มีขั้นตอนดังกล่าวกลายเป็นข้อเสีย นั่นคือ โครโมโซมที่ดี ๆ ในรุ่นก่อนจะถูกแทนที่ไปด้วยวิธีที่ง่าย ๆ คือ ก่อนที่จะทำการแทนที่ให้คัดเลือกเก็บโครโมโซมที่ดีที่สุด 2 – 3 ตัวแรกเอาไว้โดยอาจจะใช้วิธีการคัดเลือกดังที่อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้วิธีดังกล่าวอาจเรียกได้ว่าเป็นกลยุทธคัดเลือกหัวกระทิ (Elitist Strategy) อย่างไรก็ตามประชากรที่เหลืออยู่อาจจะถูกรอบงำด้วยโครโมโซมหัวกระทินี้ได้โดยง่ายกล่าวคือ ถ้าไม่มีโครโมโซมใหม่ที่ดีกว่าเกิดขึ้น โครโมโซมที่ดีที่สุดจากรุ่นก่อนก็จะถูกเก็บไว้อยู่ตลอดไป และไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ขึ้นทำให้ GA ไม่สามารถสร้างวิวัฒนาการโครโมโซมใหม่ ๆ ขึ้นมาได้ถึงแม้ว่าผลของโครโมโซมหัวกระทิจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้แต่วิธีนี้ก็ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าทำให้ระบบโดยรวมดีขึ้น

2) การแทนที่ประชากรแบบบางส่วน (Partial GA) เป็นการนำเอาประชากรลูกหลานไปแทนที่ประชากรเดิมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจะต้องมีการคัดเลือกประชากรที่จะถูกแทนที่ ซึ่งโดยปกติจะพิจารณาจากค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้นเองโครโมโซมเก่าจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมใหม่เพียง 1 หรือ 2 ตัวเท่านั้น กลวิธีในการแทนที่มีอยู่หลายวิธี เช่นการแทนที่ประชากรที่ด้อยที่สุดหรือการแทนที่ประชากรโดยการสุ่มเลือก เป็นต้น

2.8 ปรัชญ์นัวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษาในช่วงเวลาที่ผ่านมา งานวิจัยต่าง ๆ นี้ ได้ให้ความรู้ในการพัฒนางานวิจัย เช่น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก การออกแบบตัวควบคุมเพื่อใช้ในการควบคุมระบบดังกล่าว

Jayawant et al. (1968) ได้นำเสนอบทความที่อธิบายถึงระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งทำมาจาก LCR Circuits ในการปรับเปลี่ยนลักษณะคุณสมบัติเฉพาะของสมการทางแรงและระยะทางระหว่างแม่เหล็กทั้งสอง (แม่เหล็กลอยและเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก) ที่มีเสถียรภาพ แสดงวิธีหาสมการตั้งต้นของแรงลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปที่ขดลวดและแรงของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยมีสมการตั้งต้นของแรงระหว่างสนามแม่เหล็ก คือ $f = -\frac{1}{2}i^2 \frac{dL(x)}{dx}$ โดยผลที่ได้จากการทดลองและวิเคราะห์ทราบถึงความสัมพันธ์ของแรงระหว่างแม่เหล็กทั้งสอง ตำแหน่งที่ใกล้เคียงจากอ้างอิงที่สุดของแม่เหล็กลอย

Wong (1986) ได้นำเสนอรายละเอียดการออกแบบ การใช้ระบบควบคุมของระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ควบคุมระบบแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ไม่มีเสถียรภาพในการใช้งาน โดยนำเสนอรายละเอียดการวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบตั้งแต่สมการตั้งต้น การสร้าง Transfer Function จนถึงเทคนิคการออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้าและ ผลการตอบสนองของระบบหลังการชดเชย

Yoshifumi et al. (1993) ได้นำเสนอบทความที่นำเสนอถึงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมสองชนิด เพื่อใช้ในการควบคุม ระบบลูกบอลแม่เหล็กถาวรลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้า เนื้อหาในบทความกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตลอดจนการออกแบบระบบควบคุมชนิด สไลด์ดิ้ง โหมด (Sliding Mode) และ ระบบควบคุมแบบ คั้ง เดิม (PD + Lead Controller) ซึ่งผลการทดลองพบว่า ตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้ง โหมดมีประสิทธิภาพในการควบคุมที่เหนือกว่าระบบควบคุมแบบคั้งเดิม โดยสามารถดูได้จากผลการตอบสนองของระบบที่พบว่าระบบควบคุมแบบสไลด์ดิ้ง โหมดสามารถทำงานได้ดีกว่าทั้งในเรื่องของเสถียรภาพในการทำงานและการควบคุมลูกบอลแม่เหล็ก

Mohamed et al. (1995) ได้นำเสนอความคิดและการทดลองการควบคุมแรงของแม่เหล็ก (Force Control) ของระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้า (Magnetic Levitation) โดยใช้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux Density) ในช่องว่างระหว่างแม่เหล็กไฟฟ้ารูปตัวยูกับแบร์ริง โดยแรงของแม่เหล็ก (Magnetic Force) นั้น ได้มาจากสัดส่วนความสัมพันธ์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งระบบยังไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นก่อนที่จะทำการควบคุมแรงของแม่เหล็ก จะต้องทำให้ระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กมีเสถียรภาพในการทำงานก่อนด้วยระบบควบคุม

แบบ Basic State Feedback Control หลังจากระบบมีเสถียรภาพในการทำงานแล้ว จะใช้ H_∞ Controller เพื่อทำการออกแบบ Force Controller พบว่าระบบที่ออกแบบตามแนวความคิดนี้สามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้โดยมีเวลาที่ผลการตอบสนองเข้าสู่ช่วงที่กำหนดที่ 0.25 วินาที

Hurley and Wölfle (1997) ได้นำเสนอบทความที่อธิบายถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการออกแบบระบบควบคุมสำหรับระบบลูกบอลเหล็กทรงกลมลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยนำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้หลักของ Magnetic Co - Energy Function ในการสร้างแบบจำลอง และเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของระบบนั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแกนของขดลวดและลูกบอลเหล็ก นำเสนอการ Optimized Core Parameter เพื่อให้ทราบค่าความเหนี่ยวนำที่ระยะต่าง ๆ การทำให้เป็นเชิงเส้น ณ จุดสมดุลด้วย Taylor's Series และการออกแบบระบบควบคุมพีดี ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการนำมาใช้ออกแบบระบบควบคุมพีดี ในการทดลองและเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษาระดับปริญญาตรีที่ต้องการศึกษาการออกแบบระบบควบคุมอีกด้วย

Munaro et al. (2002) นำเสนองานวิจัยที่มุ่งเน้นไปที่การทำให้เป็นเชิงเส้นในระบบที่มีการป้อนกลับ ซึ่งเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้การประมาณค่า ซึ่งเป็นที่รู้จักกันว่าหลักการนี้ไม่รับรองผลสำหรับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และใช้สมมติฐานที่เหมาะสมเพื่อให้แน่ใจว่าระบบที่ได้มีเสถียรภาพ ในที่นี้จะแสดงให้เห็นถึงหลักการที่ถูกต้องของการวิเคราะห์ระบบ เพื่อใช้ออกแบบตัวป้อนกลับของระบบ ซึ่งระบบที่ใช้ทำการทดลองเป็นระบบแม่เหล็กลอยตัว เมื่อโมเดลและค่าพารามิเตอร์ได้มาจากการคำนวณจากระบบป้อนกลับซึ่งได้ทำการคำนวณไว้เรียบร้อยแล้ว โดยเมื่อทำการทดสอบแล้ว ระบบป้อนกลับมีเสถียรภาพ และมั่นคงในสถานะสมดุล โดยผลที่ได้จากการทดลองนั้นสามารถนำหลักการของระบบในงานวิจัยนี้ไปใช้กับระบบจริงที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง โดยนำไปสู่การแสดงให้เห็นถึงความมีประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอในงานวิจัย เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพอย่างเต็มที่ โดยทำ Linearization ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้ยังแสดงถึงความถูกต้องของโมเดลต้นแบบที่นำมาใช้ในการทดสอบซึ่งเป็นระบบแม่เหล็กลอยตัว จนถึงการนำเสนอการวิเคราะห์ระบบควบคุมซึ่งออกแบบในโมเดลนี้

นายสัญญา แววนิล (2007) ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมชนิดเฟสนำหน้า และระบบควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด สำหรับระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ จากนั้นออกแบบตัวชดเชยชนิดเฟสนำหน้า แล้วทำการพัฒนาตัวควบคุมดังกล่าวด้วยแนวทางของการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด ทำให้ตัวควบคุมที่มีโครงสร้างที่คล้ายกับตัวชดเชยแบบมูมนำ แต่มีลักษณะการทำงานคล้ายกับการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด ด้วยวิธีการดังกล่าวทำให้ตัวควบคุมที่สร้างขึ้นสามารถรักษาสมดุลของลูกบอลให้ลอยอยู่ในอากาศได้

Lee et al. (2007) ได้นำเสนอบทความการพัฒนาการพัฒนาระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (State Feedback Control) โดยการนำ $\alpha\beta\gamma$ - filter มาใช้ในการควบคุมระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเนื้อหานี้แนะนำเสนอการจำลองผลการตอบสนองของการติดตามสัญญาณของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยวิธีการสังเกต (Observer - Based State Feedback Control) และการใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วย $\alpha\beta\gamma$ - filter ซึ่งเหมาะสำหรับการติดตามประมาณค่าตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของสัญญาณ และเปรียบเทียบผลการตอบสนองของทั้ง 2 ระบบ โดย $\alpha\beta\gamma$ - filter นั้นแสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองที่ดีจึงเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนารูปแบบระบบควบคุมการติดตามแบบป้อนกลับในอนาคตของผู้ที่สนใจต่อไป

Shu'aibu et al. (2010) ได้นำเสนอรายละเอียดการออกแบบตัวชดเชยแบบเฟสนำหน้า ในการควบคุมระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก โดยนำสมการ Co - Energy Function มาใช้เพื่อสร้าง Transfer Function และ State Space Mathematic Model ซึ่งระบบที่ได้มีขนาดเสถียรภาพ เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพจึงทำการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้การชดเชยแบบเฟสนำหน้าในการควบคุม จากนั้นทำการออกแบบชุดทดลองแล้วทำการทดลองระบบจริง พบว่าสามารถรักษาสมดุลของลูกบอลให้ลอยอยู่ในอากาศได้

Yasser et al. (2010) นำเสนอวิธีการควบคุมระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็น SISO (Single Input Single Output) ด้วยระบบควบคุมปรับตัวได้อย่างง่ายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับ Offset Error Reduction ซึ่งบทบาทของโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีหน้าที่ชดเชยโครงสร้างของระบบที่เป็นเชิงเส้นโดยมีวัตถุประสงค์ที่จะลดขนาดของความผิดพลาดที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบในระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยผลที่ได้จากการใช้กระบวนการเหล่านี้ในการควบคุมระบบพบว่าค่าความผิดพลาดนั้นลดลงและผลการตอบสนองของระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถที่จะมีความประพฤติตามโมเดลอ้างอิงได้

Yang et al. (2010) นำเสนอการสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมให้ระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ในจุดสมดุลได้โดยอัลกอริทึม Adaptive Algorithm สำหรับระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีสัญญาณอินพุตเป็นตำแหน่งของวัตถุที่ลอยอยู่ และแรงของแม่เหล็กไฟฟ้าที่คู่ควัด และมีสัญญาณเอาต์พุตเป็นกระแสที่ส่งให้กับเครื่องกำเนิดแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะใช้ระบบควบคุมแบบ Sliding Mode ซึ่งผลจากการทดลองโดยดูจากผลการตอบสนองของระบบ พบว่าโมเดลที่นำเสนอสามารถตามรอยสัญญาณอ้างอิงได้เป็นอย่างดี

Suster และ Jadlovská (2012) นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมสำหรับระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งระบบมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น

(Non - Linear Mathematical Model) ออกแบบใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดีและ Pole - Placement Method ซึ่งผลที่ได้จากการเปรียบเทียบตำแหน่งของบอลลูกกับตำแหน่งอ้างอิง นั้นสามารถใช้งานได้ดี โดยสามารถใช้สนับสนุนการเรียนรู้ระบบที่เป็นแบบไม่เชิงเส้นได้เป็นอย่างดี

2.9 สรุป

จากปริญญานิพนธ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ สำหรับระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก การทำให้เป็นเชิงเส้น การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ รวมถึงการวิเคราะห์โครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดังกล่าว ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยเป็นอย่างมาก โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาและออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว สำหรับระบบควบคุมลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบซึ่งมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อใช้ในการควบคุมระบบให้มีผลการตอบสนองตามสัญญาณอินพุตที่ต้องการ และมีประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดีกว่าระบบควบคุมพีดี หรือระบบควบคุมแบบดั้งเดิม



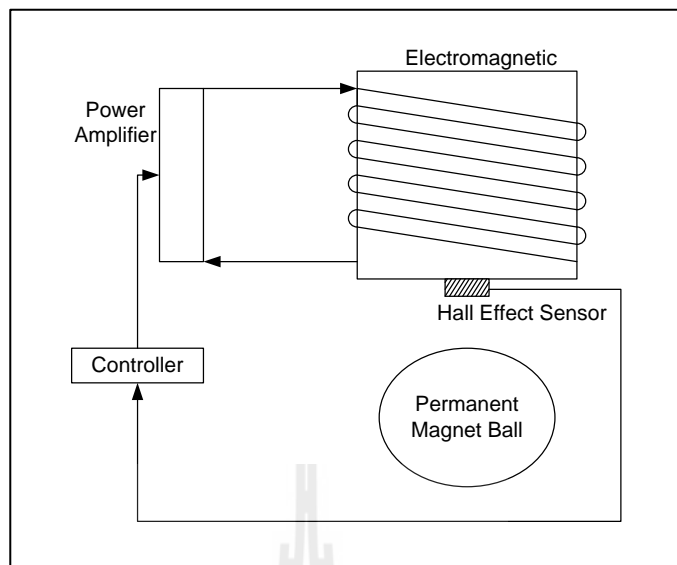
บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทำการจำลอง การปฏิบัติการทดลอง รวมถึงการทำการวิเคราะห์ระบบนั้นจะต้องมีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเสียก่อน ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบนั้นสามารถหาได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎี หรือการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เคยมีการศึกษาซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองพื้นฐานของระบบ จากนั้นนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พื้นฐานที่ได้มาวิเคราะห์ และศึกษาว่ามีตัวแปรใดบ้างที่มีผลกระทบต่อระบบ การหาพารามิเตอร์ของระบบเพื่อใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การจัดรูปสมการปริภูมิสแตตให้เหมาะสมกับการใช้งาน เพื่อนำมาใช้ในการสร้างระบบควบคุม และตัวสังเกตสำหรับระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบลูกบอลแม่เหล็กลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

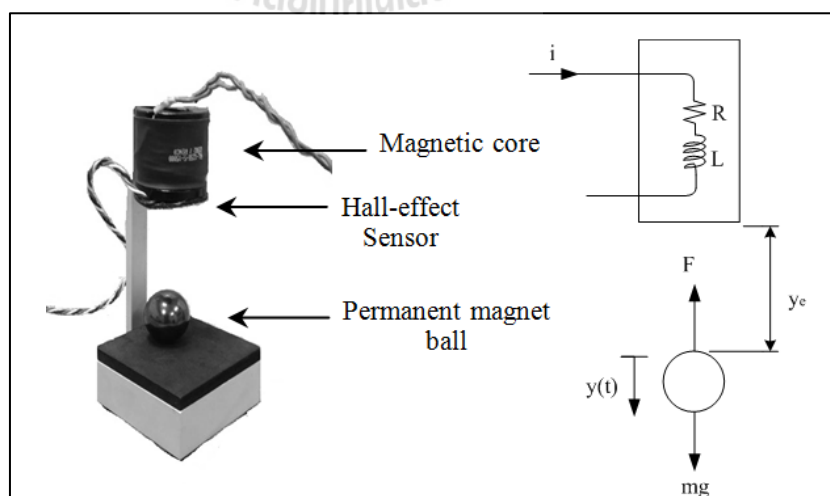
โครงสร้างแบบจำลองอย่างง่ายของระบบลูกบอลแม่เหล็กลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยอุปกรณ์ควบคุมระบบทางไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์จ่ายแรงดันไฟฟ้า ชุดระบบควบคุม และ เซนเซอร์วัดระยะ (Hall Effect Sensor) ที่สำหรับใช้วัดระยะกระจัดของการลอยตัวของลูกบอลแม่เหล็ก โดยที่ลูกบอลแม่เหล็กจะถูกดึงดูดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกสร้างจากขดลวดสนามแม่เหล็กเพื่อให้ลอยอยู่กลางอากาศได้อย่างเป็นอิสระตามต้องการภายใต้เงื่อนไขที่สภาวะคงตัว โดยแรงดึงดูดที่กระทำกับลูกบอลแม่เหล็กจะถูกควบคุมให้สมดุลกับมวลของลูกบอลแม่เหล็ก โดยมีสัญญาณจาก เซนเซอร์วัดระยะที่จะส่งไปยังชุดควบคุมเพื่อปรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังขดลวดเหนี่ยวนำที่ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.1 แต่เนื่องจากความไม่มีเสถียรภาพของระบบ จึงทำให้ระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะต้องมีระบบควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบและเพื่อใช้ควบคุมการกระจัดของการลอยตัวของลูกบอลด้วย



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างระบบลูกลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบลูกลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลงของระยะระหว่างลูกลอยชนิดแม่เหล็กถาวรกับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า y และกระแสในขดลวดสนามแม่เหล็กกำหนดให้เป็นตัวแปร i ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นเป็นผลของสนามแม่เหล็กที่กระทำกับลูกลอยแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงแรงที่กระทำต่อลูกลอย

จากสมการการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ลอยตัวหาได้จากผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อลูกบอล (สมการการเคลื่อนที่ของนิวตัน) ได้

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -F(u, y) + mg \quad (3.1)$$

เมื่อ y คือระยะห่างระหว่างลูกบอลแม่เหล็กถาวรกับขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า m คือน้ำหนักของลูกบอลแม่เหล็กถาวร และ g คือค่าแรงโน้มถ่วงของโลก

แรงของสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อลูกบอลเพื่อให้ลูกบอลแม่เหล็กลอยตัว ประมาณค่าได้จากสมการ

$$f = k \frac{i}{y^3} \quad (3.2)$$

เมื่อ k คือค่าคงที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Constant) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสมการทำให้แรงที่ลูกบอลเกิดสมดุล แทนค่าสมการที่ (3.2) ลงในสมการที่ (3.1) ดังนั้นจะได้สมการการเคลื่อนที่ของลูกบอล

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = g - k \frac{i}{my^3} \quad (3.3)$$

3.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จาก Kirchoff's Voltage Laws ซึ่งเป็นสมการผลรวมทางพีชคณิตของแรงดันรอบวงปิดเท่ากับศูนย์ จะได้สมการ Voltage Equation ของขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$$u = Ri + L(x) \frac{di}{dt} \quad (3.4)$$

เมื่อ $L(x)$ คือผลรวมของค่าความเหนี่ยวนำของระบบซึ่งมี L เป็นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดในขณะที่ไม่มียุคบอล และ L_0 เป็นค่าความเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้นจากส่วนประกอบของยุคบอล และมี Y_0 เป็นระยะการกระจัดในตำแหน่งสมดุล

$$L(x) = L + \frac{L_0 Y_0}{y} \quad (3.5)$$

เมื่อยุคบอลอยู่ที่ตำแหน่งสมดุล ($y = Y_0$) และมีค่าเหนี่ยวนำของขดลวดมีค่ามากกว่าค่าความเหนี่ยวนำของยุคบอลแม่เหล็กถาวร ($L \gg L_0$) ดังนั้น $L(x) = L$ แทนค่า $L(x) = L$ ในสมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (สมการที่ 3.4) และทำการจัดรูปสมการ เราจะได้สมการแรงดันไฟฟ้างดังนี้

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i + \frac{1}{L}u \quad (3.6)$$

เมื่อ R, L คือค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ตามลำดับ และ i คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวด

สมการแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม Hall effect Sensor ที่เกิดจากการลอยตัวของยุคบอลสามารถประมาณค่าโดย

$$v = c_0 + c_1 \frac{1}{y^2} + c_2 i \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.3) และ (3.6) กำหนดให้ $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [y \ \dot{y} \ i]^T$ เป็นสมการสเตตของระบบ z คือผลการตอบสนองที่ได้จากระบบควบคุม v คือระยะการกระจัดของยุคบอลที่ได้จากเครื่องมือวัด และ u คือสัญญาณอินพุตจากระบบสามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.8)$$

$$\dot{x}_2 = g - k \frac{i}{mx_1^3} \quad (3.9)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{R}{L}x_3 + \frac{1}{L}u \quad (3.10)$$

ผลการตอบสนองของระบบ และระยะกระจัดของลูกบอลจากเครื่องมือวัด

$$z = x_1 \quad (3.11)$$

$$v = c_0 + c_1 \frac{1}{x_1^2} + c_2 x_3 \quad (3.12)$$

3.4 การทำให้เป็นเชิงเส้น (Linearization)

ในแบบจำลองของระบบ พบว่าระบบมีลักษณะของแรงแม่เหล็กที่ไม่เป็นเชิงเส้น อย่างไรก็ตามเรามีทฤษฎีที่สามารถพัฒนาปรับปรุงระบบให้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นในช่วงการทำงานได้ โดยผู้วิจัยได้นำทฤษฎีการทำให้เป็นเชิงเส้นโดยจาโคเบียน (Jacobian Linearization) เพื่อแทนฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่พบในสมการดั้งเดิมของระบบ โดยดำเนินการ ณ จุดปฏิบัติงาน

ที่ จุดสมดุลเมื่อลูกบอลลอยอยู่นิ่ง ดังนั้น $\left(m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0\right)$ พบว่า

$$x_{1e} = \left(\frac{ku_e}{gmR}\right)^{1/3}, \quad x_{2e} = 0, \quad x_{3e} = \frac{u_e}{R}$$

เมื่อ u_e เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำให้ลูกบอลแม่เหล็กลอย ณ ตำแหน่งสมดุล ที่ระยะสมดุล x_{1e}

ใช้ทฤษฎีของ Jacobian Linearization ณ จุดปฏิบัติงาน

$$\delta \dot{x}(t) \approx \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=x_e} \delta x(t) + \frac{\partial h}{\partial u} \Big|_{u=u_e} \delta u(t) \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.8), (3.9), (3.10) และ (3.11) กำหนดให้

$$h_1 = x_2 \quad (3.14)$$

$$h_2 = -\frac{x_3 k}{x_1^3 m} + g \quad (3.15)$$

$$h_3 = -\frac{R}{L} x_3 + \frac{1}{L} u \quad (3.16)$$

$$h_4 = x_1 \quad (3.17)$$

$$h_5 = c_0 + c_1 \frac{1}{x_1^2} + c_2 x_3 \quad (3.18)$$

และ $x_e = [x_{1e} \quad x_{2e} \quad x_{3e}]$

$$\delta \dot{x}_1(t) = \frac{\partial h_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_{1e}} \cdot \delta x_1(t) + \frac{\partial h_1}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_{2e}} \cdot \delta x_2(t) + \frac{\partial h_1}{\partial x_3} \Big|_{x_3=x_{3e}} \cdot \delta x_3(t) + \frac{\partial h_1}{\partial u} \Big|_{u=u_e} \cdot \delta u(t)$$

$$\delta \dot{x}_2(t) = \frac{\partial h_2}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_{1e}} \cdot \delta x_1(t) + \frac{\partial h_2}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_{2e}} \cdot \delta x_2(t) + \frac{\partial h_2}{\partial x_3} \Big|_{x_3=x_{3e}} \cdot \delta x_3(t) + \frac{\partial h_2}{\partial u} \Big|_{u=u_e} \cdot \delta u(t)$$

$$\delta \dot{x}_3(t) = \frac{\partial h_3}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_{1e}} \cdot \delta x_1(t) + \frac{\partial h_3}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_{2e}} \cdot \delta x_2(t) + \frac{\partial h_3}{\partial x_3} \Big|_{x_3=x_{3e}} \cdot \delta x_3(t) + \frac{\partial h_3}{\partial u} \Big|_{u=u_e} \cdot \delta u(t)$$

$$\delta z(t) = \frac{\partial h_4}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_{1e}} \cdot \delta x_1(t) + \frac{\partial h_4}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_{2e}} \cdot \delta x_2(t) + \frac{\partial h_4}{\partial x_3} \Big|_{x_3=x_{3e}} \cdot \delta x_3(t) + \frac{\partial h_4}{\partial u} \Big|_{u=u_e} \cdot \delta u(t)$$

$$\delta v(t) = \frac{\partial h_5}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_{1e}} \cdot \delta x_1(t) + \frac{\partial h_5}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_{2e}} \cdot \delta x_2(t) + \frac{\partial h_5}{\partial x_3} \Big|_{x_3=x_{3e}} \cdot \delta x_3(t) + \frac{\partial h_5}{\partial u} \Big|_{u=u_e} \cdot \delta u(t)$$

แทนค่า h

$$\delta \dot{x}_1(t) = (0) \cdot \delta x_1(t) + (1) \cdot \delta x_2(t) + (0) \cdot \delta x_3(t) + (0) \cdot \delta u(t)$$

$$\delta \dot{x}_2(t) = \left(3g \frac{(gmR)^{\frac{1}{3}}}{(ku_e)^{\frac{4}{3}}} \right) \cdot \delta x_1(t) + (0) \cdot \delta x_2(t) + \left(-\frac{gR}{u_e} \right) \cdot \delta x_3(t) + (0) \cdot \delta u(t)$$

$$\begin{aligned}\delta \dot{x}_3(t) &= (0) \cdot \delta x_1(t) + (0) \cdot \delta x_2(t) + \left(-\frac{R}{L}\right) \cdot \delta x_3(t) + \left(\frac{1}{L}\right) \cdot \delta u(t) \\ \delta z(t) &= (1) \cdot \delta x_1(t) + (0) \cdot \delta x_2(t) + (0) \cdot \delta x_3(t) + (0) \cdot \delta u(t) \\ \delta v(t) &= \left(-\frac{2c_1 gmR}{ku_e}\right) \cdot \delta x_1(t) + (0) \cdot \delta x_2(t) + (c_2) \cdot \delta x_3(t) + (0) \cdot \delta u(t)\end{aligned}$$

จะได้

$$\begin{aligned}\delta \dot{x}_1 &= A_{11} \delta x_1 + A_{12} \delta x_2 + A_{13} \delta x_3 + B_{11} \delta u \\ \delta \dot{x}_2 &= A_{21} \delta x_1 + A_{22} \delta x_2 + A_{23} \delta x_3 + B_{12} \delta u \\ \delta \dot{x}_3 &= A_{31} \delta x_1 + A_{32} \delta x_2 + A_{33} \delta x_3 + B_{13} \delta u \\ \delta z &= C_{11} \delta x_1 + C_{12} \delta x_2 + C_{13} \delta x_3 + D_{12} \delta u \\ \delta v &= C_{21} \delta x_1 + C_{22} \delta x_2 + C_{23} \delta x_3 + D_{22} \delta u\end{aligned}$$

เมื่อ $\delta x = x - x_e$, $\delta u = u - u_e$, $\delta z = z - z_e$, $\delta v = v - v_e$ จะได้สมการปริภูมิสถานะของระบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{x}_1 \\ \delta \dot{x}_2 \\ \delta \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{3g(gmR)^{\frac{1}{3}}}{(ku_e)^{\frac{1}{3}}} & 0 & -\frac{gR}{u_e} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \delta x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \delta u$$

$$\delta v = \begin{bmatrix} -\frac{2c_1 gmR}{ku_e} & 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \delta x_3 \end{bmatrix}$$

กำหนดให้ $x_1 = \delta x$, $u_1 = \delta u$, $z_1 = \delta z$, $v_1 = \delta v$

ดังนั้นจะได้สมการปริภูมิสถานะของระบบเป็น

$$\dot{x}_l = Ax_l + Bu_l \quad (3.19)$$

$$v_l = Cx_l + D \quad (3.20)$$

โดยมีเมทริกซ์ A, B, C และ D ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{3g(gmR)^{\frac{1}{3}}}{(ku_e)^{\frac{1}{3}}} & 0 & -\frac{gR}{u_e} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}$$

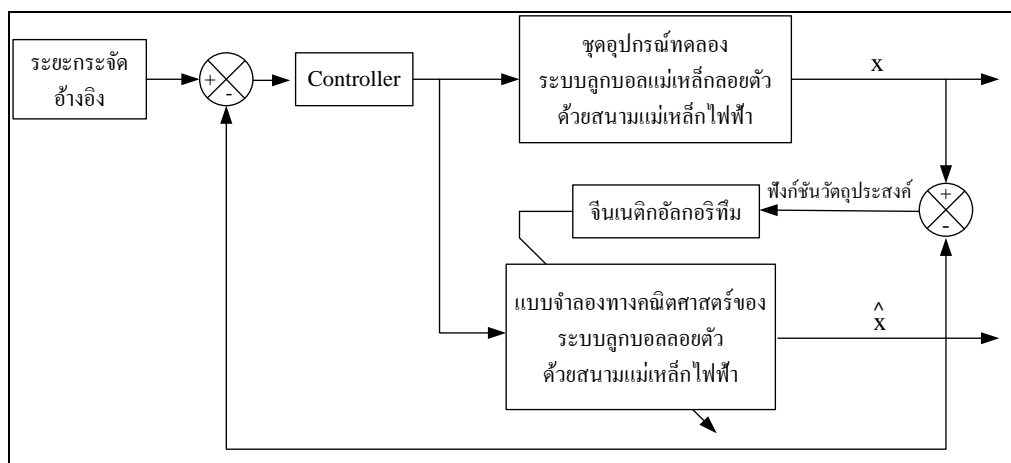
$$C_1 = [1 \quad 0 \quad 0]$$

$$C_2 = \left[-\frac{2c_1 gmR}{ku_e} \quad 0 \quad c_2 \right], \quad D = [0]$$

เมทริกซ์ C_1 เป็นเมทริกซ์แสดงผลการตอบสนองของโมเดลระบบ และ C_2 เป็นเมทริกซ์ของการกระตุ้นของลูกบอลแม่เหล็กซึ่งได้จากเซนเซอร์

3.5 การระบุเอกลักษณ์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ในบริบทของวิศวกรรมระบบควบคุม การวิเคราะห์และการออกแบบระบบจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการภายใต้การควบคุมเสมอ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยทั่วไปจะอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ตั้งอยู่บนหลักฟิสิกส์พื้นฐานของระบบที่สนใจ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะอธิบายพฤติกรรมทางพลวัตของระบบรวมทั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ปรากฏในแบบจำลองจะอธิบายความหมายทางฟิสิกส์ของระบบอย่างไรก็ตาม แนวทางดังกล่าวอาจประสบปัญหาในกรณีที่ไม่มีทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบ โดยเราสามารถทำการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบได้โดยอาศัยวิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบ (System Identification) ซึ่งเป็นกระบวนการคำนวณเพื่อหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัตที่สนใจโดยอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับอินพุตและเอาต์พุตของระบบจากการทดลองและการตรวจวัดอย่างเหมาะสม เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการระบุเอกลักษณ์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
โดยวิธีปัญญาประดิษฐ์

การค้นหาลักษณะของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง โดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติ และหลักการทางสายพันธุ์ โดยจินเนติกอัลกอริทึมเป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่าได้รับการจัดให้เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพ และมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด โดยข้อมูลที่ใช้ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะใช้ระยะกระจัดอ้างอิงระหว่างลูกบอลแม่เหล็กจนถึงอุปกรณ์สร้างสนามแม่เหล็กเป็นอินพุตของระบบ และในส่วนการตอบสนองหรือเอาต์พุตของระบบนั้นจะเป็นระยะกระจัดของลูกบอลแม่เหล็กจนถึงอุปกรณ์สร้างสนามแม่เหล็กซึ่งวัดได้จากการทดลองจริง โดยระยะการกระจัดระหว่างลูกบอลแม่เหล็กจะอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม Hall Effect Sensor ที่สามารถใช้สมการแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม Hall Effect Sensor เพื่อทำการแปลงค่าแรงดันให้เป็นระยะการกระจัดได้ ซึ่งในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้นำสมการมาเขียนอยู่ในรูปของสมการเชิงตัวเลข (Numerical) เพื่อที่จะสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ของชุดอุปกรณ์ระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เนื่องจากระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นระบบที่มีลักษณะที่ไม่มีเสถียรภาพในการทำงาน ดังนั้นระบบจึงไม่สามารถทำงานในลักษณะระบบป้อนกลับแบบวงเปิดได้ ระบบจึงต้องมีการนำตัวควบคุมหรือตัวชดเชยเพื่อทำให้ระบบมีเสถียรภาพในการทำงาน

จากสมการที่ (3.19) และ (3.20) จะได้สมการปริภูมิสแตตของระบบเป็นดังนี้

$$\dot{x}_{l,1} = x_{l,2} \quad (3.21)$$

$$\dot{x}_{l,2} = \frac{3g(gmR)^{\frac{1}{3}}}{(ku_e)^{\frac{1}{3}}} x_{l,1} - \frac{gR}{u_e} x_{l,3} \quad (3.22)$$

$$\dot{x}_{l,3} = -\frac{R}{L} x_{l,3} + \frac{1}{L} u_l \quad (3.23)$$

โดยมีเอาต์พุตของระบบ

$$v = -\frac{2c_1 gmR}{ku_e} x_{l,1} + c_2 x_{l,3} + v_e \quad (3.24)$$

เนื่องจาก $v_l = v - v_e$

ตัวแปรที่ต้องการประมาณค่าสำหรับการระบุเอกลักษณ์แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 กำหนดตัวแปรสำหรับการระบุเอกลักษณ์

พารามิเตอร์	R	k	L	c_1	c_2	u_e	v_e
ตัวแปร	X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	X(6)	X(7)

ซึ่งในการระบุเอกลักษณ์สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อที่จะทำให้ได้ค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จะต้องมีการกำหนดขอบเขตความเป็นไปได้ของตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งขอบเขตเหล่านั้นจะถูกกำหนดตามลักษณะทางกายภาพของระบบ

ข้อมูลของพารามิเตอร์ที่ทราบค่าในการประมาณค่าของชุดอุปกรณ์ระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของชุดอุปกรณ์ลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทราบค่า

ประเภท	พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
น้ำหนักลูกบอลแม่เหล็ก	m	41.3	กรัม
ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม	k_I	24.7202	-
ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม	K_1	-500.0005	-
ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม	K_2	-12.4652	-
ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม	K_3	0.0664	-
ระยะการจัดสมดุลของลูกบอล	x_{1e}	0.02	เมตร
กระแสที่สภาวะสมดุล	x_{3e}	1.05	แอมป์
แรงดันไฟฟ้า ณ ขดลวดเหนี่ยวนำที่สภาวะสมดุล	u_e	1.79	โวลต์

ขอบเขตความเป็นไปได้ของค่าตัวแปรบางชนิดแสดงดังต่อไปนี้

R คือ ค่าความต้านทานของขดลวดที่อยู่ภายในอุปกรณ์กำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าความต้านทานจะมีค่าเป็นบวกเสมอ และเนื่องจากขดลวดนั้นเป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างดี จึงไม่ควรมีความต้านทานที่มากจนเกินไป

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่อยู่ภายในอุปกรณ์กำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งค่าของความเหนี่ยวนำของขดลวดโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าไม่เกิน 1 H

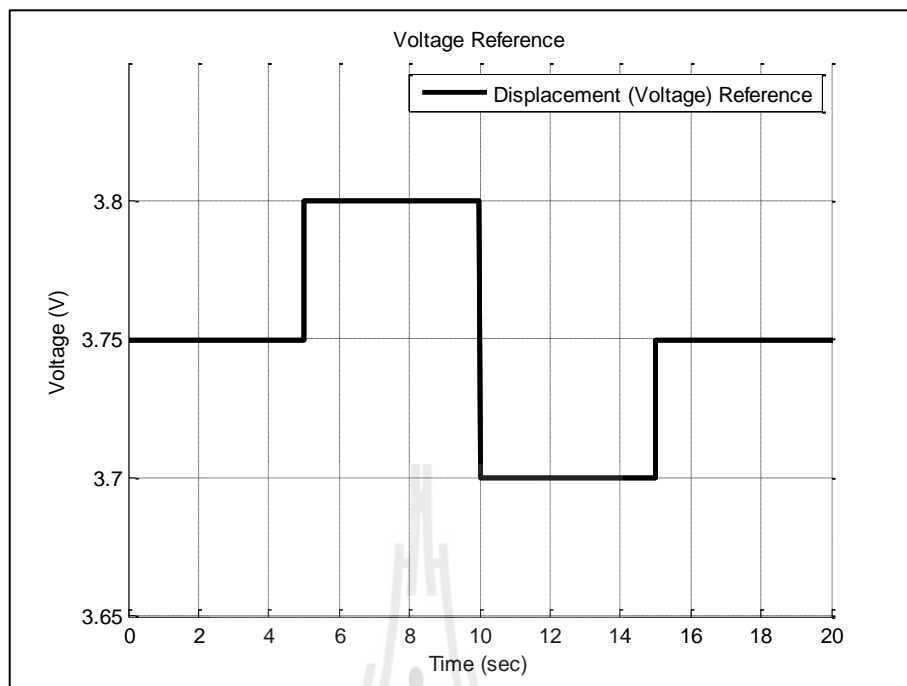
c_1 และ c_2 เป็นค่าคงที่ของอุปกรณ์ตรวจวัดระยะการจัด ซึ่งสามารถดูค่าพารามิเตอร์ได้จากคู่มือ แต่เนื่องจากเมื่อระยะเวลาผ่านไป ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งาน เราสามารถกำหนดขอบเขตของการค้นหาได้จากคู่มือของอุปกรณ์ตรวจวัด

เมื่อทราบขอบเขตของตัวแปรบางตัวที่สามารถระบุค่าขอบเขตแล้วเรานำขอบเขตเหล่านั้นที่ทราบค่าไปใส่ในโปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อให้โปรแกรมทำการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม ซึ่งได้กำหนดขอบเขตต่าง ๆ แสดงตารางที่ 3.3

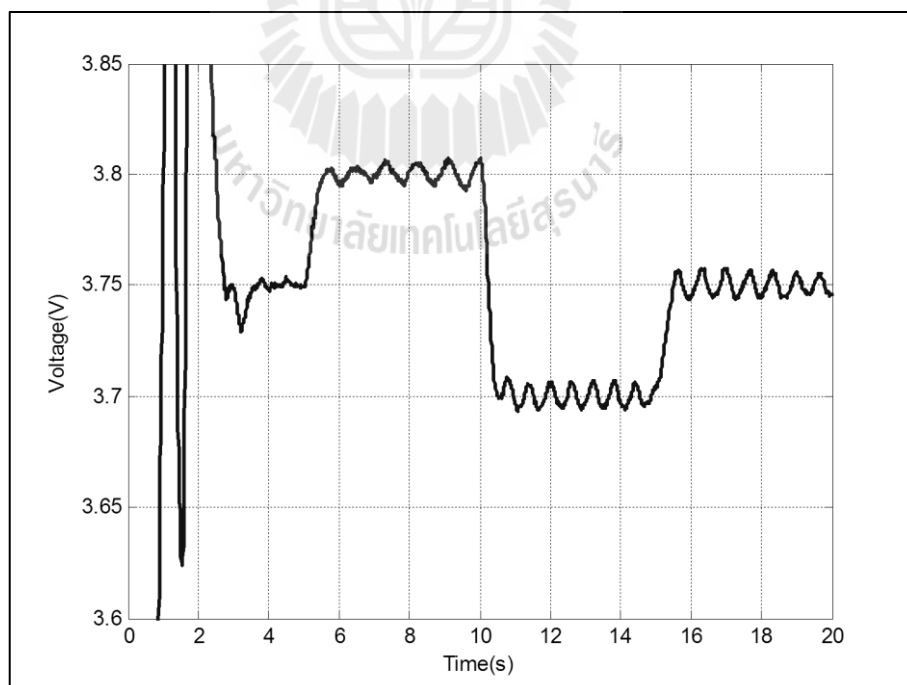
ตารางที่ 3.3 ขอบเขตของค่าตัวแปรในโปรแกรมเงินเนติกอัลกอริทึม

พารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
R	$X(1)$	1	2
k	$X(2)$	0.000001	0.000005
L	$X(3)$	0.01	0.03
c_1	$X(4)$	0.0001	0.0005
c_2	$X(5)$	0	0.5
u_e	$X(6)$	1	2
v_e	$X(7)$	2	4

ในการทดลองจะให้อินพุตของระบบเป็นค่าระยะกระจัดอ้างอิงของลูกบอลแม่เหล็กถึงอุปกรณ์กำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะของข้อมูลเป็นแบบขั้นบันได เพื่อที่จะให้ได้ผลการตอบสนองของระบบที่มีความหลากหลายในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างลูกบอลแม่เหล็กจนถึงอุปกรณ์กำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ลักษณะสัญญาณที่ได้ทำการเก็บข้อมูลแสดงรูปที่ 3.4 และเอาท์พุตของระบบเป็นค่าของระยะห่างของลูกบอลแม่เหล็กจนถึงอุปกรณ์กำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองจริง จะมีลักษณะสัญญาณเช่นเดียวกับสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นระยะอ้างอิง เนื่องจากลักษณะของระบบจะเป็นการติดตามสัญญาณตามสัญญาณอ้างอิงซึ่งเป็นการควบคุมระยะห่างระหว่างลูกบอลแม่เหล็กจนถึงอุปกรณ์กำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีผลการตอบสนองตามที่ต้องการ แต่เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ลักษณะของข้อมูลมีการแกว่งตัวเนื่องจากสัญญาณรบกวน และลักษณะการลอยตัวของลูกบอลแม่เหล็กที่มีลักษณะการแกว่งของลูกบอลเป็นแบบฮาร์โมนิก จึงส่งผลให้ข้อมูลที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อน โดยลักษณะของสัญญาณที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 แสดงการกระจัดของลูกบอลแม่เหล็กในรูปของแรงดันไฟฟ้า

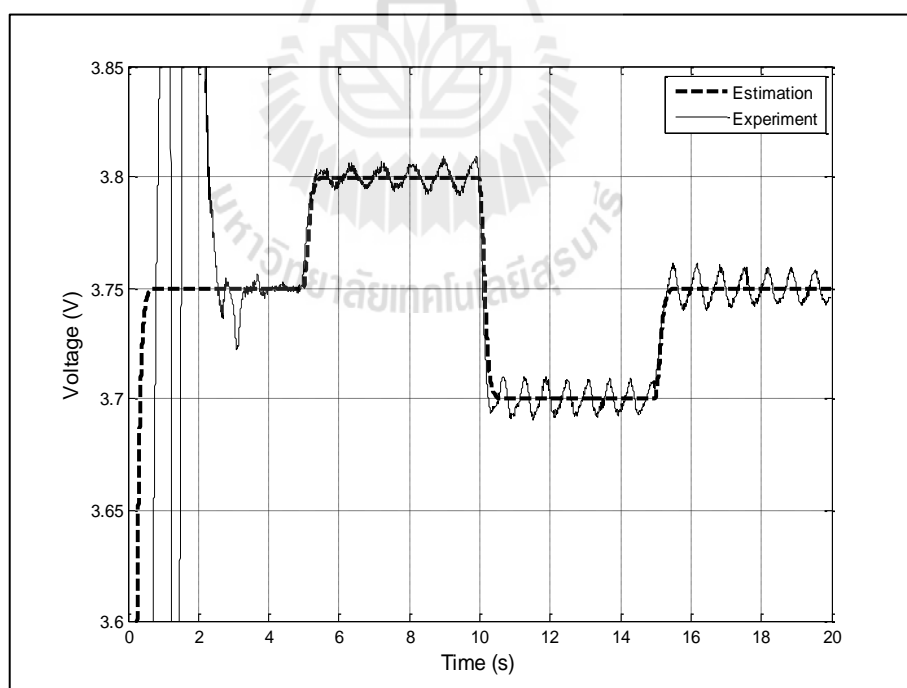


รูปที่ 3.5 แสดงการกระจัดของลูกบอลแม่เหล็กที่ได้จากการทดลองในรูปของแรงดันไฟฟ้า

ผลการทดลองหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของระบบโดยใช้จิ้นเนติกอัลกอริทึม ได้ค่าตัวแปรแสดงดังตารางที่ 3.4 และผลการกระจัดระหว่างลูกบอลแม่เหล็กกับอุปกรณ์กำเนิดสนามแม่เหล็กของระบบจำลองที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์หาค่าตัวแปรแสดงดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ของระบบโดยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม

พารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่าตัวแปร
R	$X(1)$	1.4908
k	$X(2)$	3.94×10^{-6}
L	$X(3)$	0.01533
c_1	$X(4)$	3.86×10^{-4}
c_2	$X(5)$	0.3472
u_e	$X(6)$	1.4428
v_e	$X(7)$	2.7564



รูปที่ 3.6 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าเฉลี่ยที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์

เมื่อทำการแทนค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ดังตารางที่ 4.4 จะได้เมทริกซ์ A, B, C และ D ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1.394 \times 10^3 & 0 & -10.1364 \\ 0 & 0 & -97.2472 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 65.232 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = [1 \ 0 \ 0]$$

$$C_2 = [-82.026 \ 0 \ 0.3472]$$

จากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธี ปัญญาประดิษฐ์ ทำให้สามารถประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบได้ โดยก่อนที่จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ได้มาไปใช้งานนั้นควรที่จะมีการศึกษาคุณสมบัติของระบบที่สนใจเสียก่อน เพื่อนำผลการศึกษาค้นคว้าเป็นแนวทางในการเลือกใช้งานตัวควบคุมของระบบต่อไป

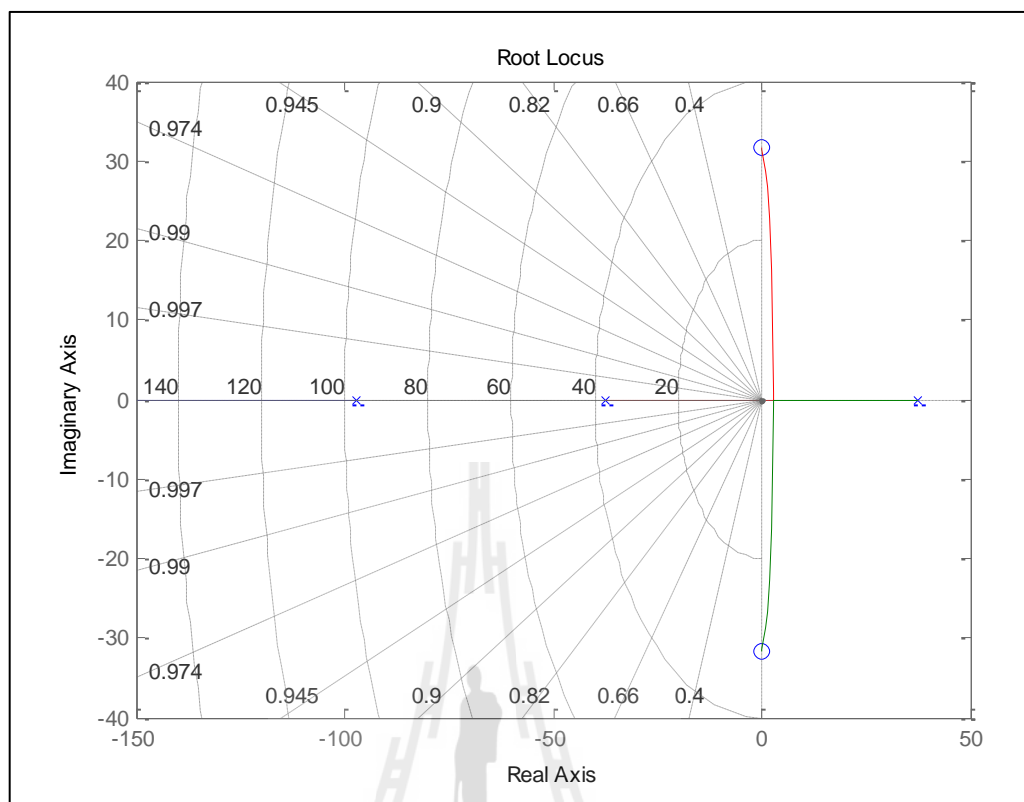
เมื่อพิจารณาฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบเปิด

$$G_{openloop}(s) = \frac{22.6486s^2 + 2.2667 \times 10^4}{s^3 + 97.2472s^2 - 1.3939 \times 10^3 s - 1.3555 \times 10^5} \quad (3.25)$$

เมื่อทำการตรวจสอบพบว่า เมื่อพิจารณาสมการลักษณะเฉพาะ (Characteristic Equation) ของระบบวงเปิด

$$s^3 + 97.2472s^2 - 1.3939 \times 10^3 s - 1.3555 \times 10^5 = 0 \quad (3.26)$$

พบว่าโพล (Pole) ของระบบมีค่าเท่ากับ -97.2476 , -37.3343 และ 37.3343 จะเห็นได้ว่าระบบมีโพลหนึ่งตัวอยู่ทางขวามือของแกนจินตภาพ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพตำแหน่งโพลและซีโรของระบบวงเปิด

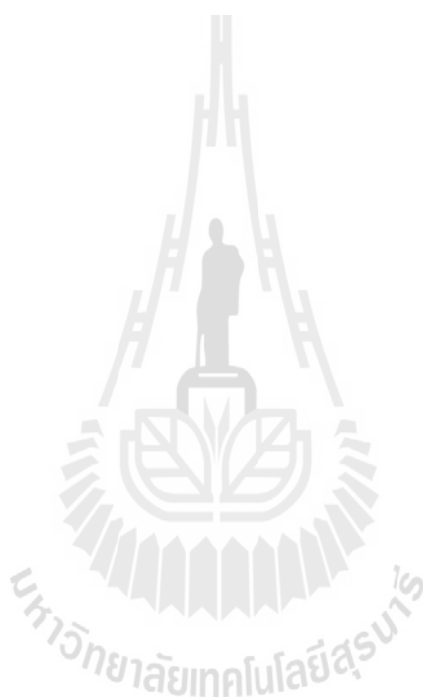
จากรูปที่ 3.7 เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อมีโพลอยู่ทางขวามือของแกนจินตภาพ หรือมีค่าเป็นบวกนั้น จะส่งผลทำให้ระบบนั้นขาดเสถียรภาพ (Unstable) ดังนั้น ระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมซึ่งมีลักษณะเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อควบคุมการทำงานของระบบมีเสถียรภาพในการทำงาน

จากฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบ พบว่าระบบมีลักษณะเป็นระบบ Type - 0 ซึ่งมีลักษณะของผลการตอบสนองของระบบที่มีลักษณะของอินพุตแบบขั้นบันได คือ ผลการตอบสนองจะมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะสมดุล ดังนั้นการเลือกใช้ตัวควบคุมที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ

3.6 สรุป

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎี หรือด้วยแบบจำลองที่เคยมีการศึกษามาแล้ว เพื่อให้ได้แบบจำลองพื้นฐานของระบบ ซึ่งโครงสร้างของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กนั้นเป็นลักษณะระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และไม่มี

เสถียรภาพ จึงต้องมีการปรับปรุงระบบด้วยการทำให้เป็นเชิงเส้นเพื่อสามารถทำการออกแบบตัวควบคุมและใช้งานในช่วงขอบเขตการทำงาน พบว่าไม่สามารถวัดพารามิเตอร์บางค่าได้ ดังนั้นเพื่อนำไปสู่การสร้างแบบจำลองของระบบ จึงใช้วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ (Genetic Algorithm) ด้วยการวัดอินพุตและเอาต์พุตของระบบ และทำการจัดรูปในรูปแบบบัญญัติของการควบคุม (Controllable Canonical Form) เพื่อนำไปใช้การออกแบบระบบควบคุมและตัวสังเกตต่อไป



บทที่ 4

การออกแบบระบบควบคุม และตัวสังเกตสถานะ

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การจัดรูปของสมการปริภูมิสถานะของระบบ รวมถึงการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 3 เนื้อหาในบทนี้แสดงการจัดรูปแบบสมการปริภูมิสถานะของระบบให้อยู่ในรูปแบบบัญญัติของตัวควบคุมเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มอินทิเกรต 1 ตัวเพื่อใช้ในการควบคุมระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

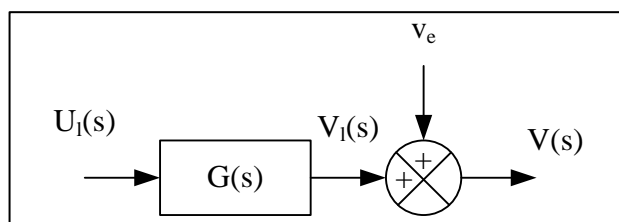
4.1 การจัดรูปแบบสมการปริภูมิสถานะในรูปแบบบัญญัติของตัวควบคุม

ในการนำสมการปริภูมิสถานะของระบบเพื่อไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมหรือตัวสังเกตนั้น เราสามารถทำการจัดรูปสมการปริภูมิสถานะของระบบขึ้นมาใหม่ได้ เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้ โดยเทคนิคที่ใช้ในการจัดรูปสมการปริภูมิสถานะใหม่มีหลายวิธี โดยการจัดรูปแบบสมการปริภูมิสถานะสำหรับการนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุม คือรูปแบบบัญญัติของตัวควบคุม เพื่อนำมาใช้พิจารณาระบบใหม่

แต่เนื่องจากทฤษฎีการจัดรูปสมการปริภูมิสถานะให้อยู่ในรูปแบบบัญญัติของตัวควบคุมนั้น จะต้องทำการหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบเปิดก่อน โดยฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบเปิดนั้นสามารถหาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ทำให้เป็นเชิงเส้นแล้วซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการปริภูมิสถานะ โดยสามารถหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบเปิดได้ดังนี้

$$G_{openloop}(s) = \frac{22.6486s^2 + 2.2667 \times 10^4}{s^3 + 97.2472s^2 - 1.3939 \times 10^3 s - 1.3555 \times 10^5} \quad (4.1)$$

เนื่องจากระบบหลังทำให้เป็นเชิงเส้นแล้ว มีเอาท์พุตเป็น v_l ซึ่ง $v_l = v - v_e$ เราต้องการ v ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม Hall Effect Sensor เพื่อนำมาใช้เป็นระยะกระจัดของลูกบอลแม่เหล็กเพื่อใช้ในการป้อนกลับให้กับระบบ ดังนั้น $v = v_l + v_e$ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดง Block Diagram ของเอาต์พุตที่ต้องการ

ดังนั้น สมการถ่ายโอนของระบบที่เราต้องการจะเป็น

$$\frac{V(s)}{U_1(s)} = G(s) + \frac{v_e}{U_1(s)} \quad (4.2)$$

แทนค่า $G_{openloop}(s) = \frac{22.6486s^2 + 2.2667 \times 10^4}{s^3 + 97.2472s^2 - 1.3939 \times 10^3 s - 1.3555 \times 10^5}$ ลงในสมการที่ (4.2)

$$\begin{aligned} \frac{V(s)}{U_1(s)} &= \frac{22.6486s^2 + 2.2667 \times 10^4}{s^3 + 97.2472s^2 - 1.3939 \times 10^3 s - 1.3555 \times 10^5} + \frac{v_e}{U_1(s)} \\ \frac{V(s)}{U_1(s)} &= \frac{(22.6486s^2 + 2.2667 \times 10^4)U_1(s) + v_e(s^3 + 97.2472s^2 - (1.3939 \times 10^3)s - 1.3555 \times 10^5)}{(s^3 + 97.2472s^2 - 1.3939 \times 10^3 s - 1.3555 \times 10^5)U_1(s)} \\ \frac{V(s)}{U_1(s)} &= \frac{22.6486s^2 U_1(s) + 2.2667 \times 10^4 U_1(s) + v_e s^3 + 97.2472 v_e s^2 - (1.3939 \times 10^3) v_e s - 1.3555 \times 10^5 v_e}{(s^3 + 97.2472s^2 - 1.3939 \times 10^3 s - 1.3555 \times 10^5)U_1(s)} \\ \frac{V(s)}{U_1(s)} &= \frac{\left(\frac{v_e}{U_1(s)}\right) s^3 + \left(22.6486 + \frac{97.2472 v_e}{U_1(s)}\right) s^2 - (1.3939 \times 10^3) \left(\frac{v_e}{U_1(s)}\right) s + (2.2667 \times 10^4 - 1.3555 \times 10^5) \left(\frac{v_e}{U_1(s)}\right)}{(s^3 + 97.2472s^2 - 1.3939 \times 10^3 s - 1.3555 \times 10^5)} \end{aligned}$$

เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการที่ (2.17) ในบทที่ 2 จะได้

$$b_0 = \frac{v_e}{U_1(s)} \quad (4.3)$$

$$b_1 = 22.6486 + 97.2472 \left(\frac{v_e}{U_1(s)} \right) \quad (4.4)$$

$$b_2 = -1.3939 \times 10^3 \left(\frac{v_e}{U_l(s)} \right) \quad (4.5)$$

$$b_3 = 2.2667 \times 10^4 - 1.3555 \times 10^5 \left(\frac{v_e}{U_l(s)} \right) \quad (4.6)$$

$$a_1 = 97.2472 \quad (4.7)$$

$$a_2 = -1.3939 \times 10^3 \quad (4.8)$$

$$a_3 = -1.3555 \times 10^5 \quad (4.9)$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการปริภูมิสแตตให้อยู่ในรูปแบบบัญญัติของตัวควบคุม โดยการแทนค่าที่หามาได้ลงไปนสมการที่ (2.18) และ (2.19) ที่อยู่ในรูปแบบบัญญัติของตัวควบคุม จะได้

$$\dot{x}_l = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1.3555 \times 10^5 & 1.3939 \times 10^3 & -97.2472 \end{bmatrix} x_l + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_l \quad (4.10)$$

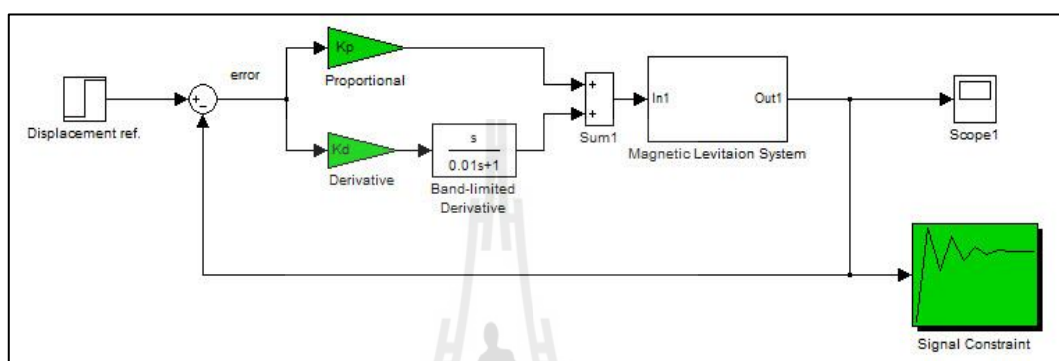
$$v = [2.2667 \times 10^4 \quad 0 \quad 22.6486] x_l + 2.7564 \quad (4.11)$$

โดยจะนำสมการปริภูมิสแตตที่ถูกจัดอยู่ในรูปแบบบัญญัติของตัวควบคุมนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีดี ตัวควบคุมเซอร์โวและตัวสังเกตต่อไป

4.2 ตัวควบคุมพีดี

สืบเนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมในยุคนัยแบบดั้งเดิม ตัวควบคุมที่นิยมใช้สำหรับการออกแบบระบบควบคุมระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กคือตัวควบคุมพีดี หรือตัวชดเชยชนิดเฟสนำหน้า เนื่องจากตัวควบคุมพีดีมีคุณสมบัติในการทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบตัวควบคุมพีดีด้วยวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมพีดีโดยใช้

วิธี Response Optimization ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมพีดีที่เหมาะสม โดยกำหนดลักษณะของการตอบสนองที่เหมาะสม คือ กำหนดสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าการพุ่งเกินของสัญญาณไม่เกิน 10%, Rise Time น้อยกว่า 4 วินาที และ Settling Time น้อยกว่า 5 วินาที ซึ่งข้อกำหนดเหล่านี้จะใช้กำหนด Signal Constraint ในโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.2 สำหรับวิธีการใช้งาน Response Optimization ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก จ



รูปที่ 4.2 แผนภาพแบบจำลองการใช้โปรแกรมหาค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีดีของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

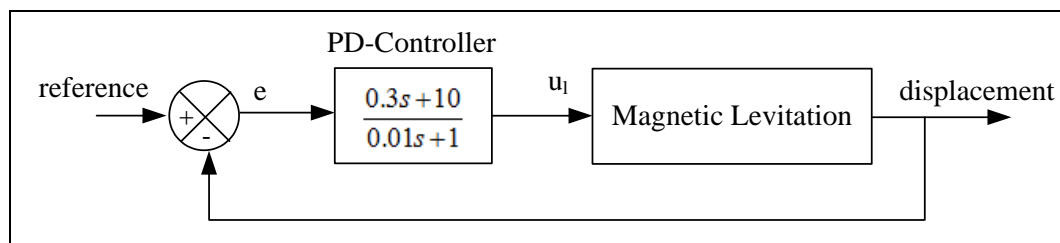
ค่าสัมประสิทธิ์ตัวควบคุมพีดีที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองอ้างอิงดังกล่าว คือ

$$K_p = 10 \text{ และ } K_d = 0.2$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันการถ่ายโอนได้ดังสมการที่ (4.12)

$$G_c(s) = \frac{0.3s + 10}{0.01s + 1} \quad (4.12)$$

โดยมีลักษณะแผนภาพของการทำงานของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยตัวควบคุมพีดีดังรูปที่ 4.3



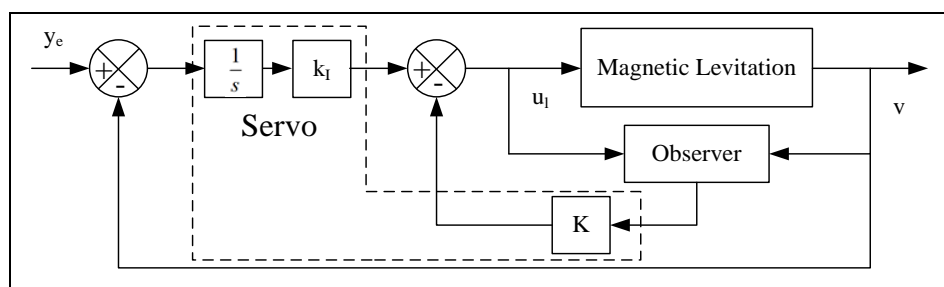
รูปที่ 4.3 แผนภาพการทำงานของตัวควบคุมพีดี

4.3 ระบบควบคุมเซอร์โวด้วยการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ

(Servo System Using Pole-Placement with State Observer)

การออกแบบตัวควบคุมโดยใช้วิธีการป้อนกลับตัวแปรสแตต การสร้างหรือการทดสอบการทำงานของตัวควบคุมที่ทำการออกแบบมานั้นจะต้องประกอบด้วยข้อมูลจากสัญญาณของสเตตเวกเตอร์ ของระบบทุกค่าซึ่งส่วนมากแล้วการวัดข้อมูลจากตัวแปรสแตตหรือสัญญาณสเตตเวกเตอร์ทุกค่าเป็นไปได้ยาก ถึงแม้ในบางระบบจะสามารถวัดค่าตัวแปรสแตตได้แต่ก็อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการวัด การควบคุมจึงมีการนำเอาตัวประมาณค่าตัวแปรสแตต หรือตัวสังเกต มาใช้งานเพื่อประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบที่จะทำการควบคุม วิธีการที่ใช้ในการออกแบบตัวสังเกตเพื่อให้สามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบได้อย่างถูกต้อง และรวดเร็วจึงมีความสำคัญต่อการควบคุมระบบอย่างมาก

เมื่อพิจารณาระบบเชิงเส้นที่ค่าตัวแปรของระบบไม่ขึ้นกับเวลา ที่ต้องการจะใช้ตัวสังเกตสถานะในการประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบและทำการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพโดยใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยระบบเซอร์โวชนิดหนึ่งที่มีตัวอินทิกรัลซึ่งเหมาะสมสำหรับระบบที่เป็นชนิดศูนย์ และทำการออกแบบบนตัวสังเกต ซึ่งจะมีอัลกอริทึมดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพการทำงานของระบบเซอร์โวบนตัวสังเกตระบบ

โดยหลักการออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ ซึ่งเป็นลักษณะของตัวควบคุมแบบป้อนกลับของตัวแปรสแตต มีหลักการออกแบบดังนี้

1. การออกแบบตัวสังเกตสถานะ ในการประมาณค่าตัวแปรสแตตเพื่อใช้สำหรับการป้อนกลับของตัวควบคุม
2. การออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพล

4.3.1 การออกแบบระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพล

ในลำดับแรกเป็นการออกแบบระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพล ซึ่งผู้ทำการวิจัยจะทำการสมมติว่าเราสามารถวัดค่าตัวแปรสแตตของระบบได้ทุกตัวแล้วทำการออกแบบระบบควบคุมโดยอาศัยข้อมูลของตัวแปรสแตตทุกตัวเพื่อใช้ในการป้อนกลับให้กับระบบ

การออกแบบระบบควบคุม จากสมการของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งทำการจัดรูปแบบบัญญัติของตัวควบคุมดังสมการที่ (4.10) และ (4.11) คือ

$$\dot{x}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1.3555 \times 10^5 & 1.3939 \times 10^3 & -97.2472 \end{bmatrix} x_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_1$$

$$v = [2.2667 \times 10^4 \quad 0 \quad 22.6486] x_1 + 2.7564$$

จากสมการที่ (2.30) ในบทที่ 2 ซึ่งเป็นสมการตั้งต้นของระบบควบคุมเซอร์โว และนำมาประยุกต์ใช้กับระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= Ax_1 + Bu_1 \\ v &= Cx_1 + v_e \\ u_1 &= -Kx + k_1 \xi \\ \dot{\xi} &= r - v \end{aligned} \tag{4.13}$$

เมื่อ x_1 คือ สเตตเวกเตอร์ของระบบเทียบกับจุดสมมูล
 u_1 คือ สัญญาณควบคุม
 v คือ สัญญาณเอาต์พุตของระบบ

ξ คือ ข้อมูลที่ส่งออกมาจากอินทิกรัล
 r คือ สัญญาณอินพุตอ้างอิง

จากนั้น เมื่อทำการเขียนสมการระบบพลศาสตร์ตามวิธีการออกแบบระบบควบคุมเซอร์โวตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 จะได้สมการสแตตของระบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u_1(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r - \begin{bmatrix} 0 \\ 2.7564 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

เมื่อ $u_1(t) = -Kx_1(t) + k_1\xi(t)$

จากสมการที่ (2.36) ในบทที่ 2 เราทราบว่า

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

และมีเมทริกซ์อัตราขยายของระบบควบคุมเป็น $\hat{K} = [K \quad -k_1]$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ (4.14) จะได้เมทริกซ์ \hat{A} และ \hat{B} เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมดังนี้

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1.3555 \times 10^5 & 1393.9 & -97.2472 & 0 \\ -2.2667 \times 10^4 & 0 & -22.6486 & 0 \end{bmatrix} \text{ และ } \hat{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

การออกแบบระบบควบคุมใด ๆ ต้องพิจารณาคูณสมบัติความเป็นไปได้ในการออกแบบตัวควบคุม หรือที่เรียกว่า “ความควบคุมได้” (Controllability) จากเมทริกซ์ความควบคุมได้ดังนี้

$$\text{Controllability matrix} = \beta = [\hat{B} \quad \hat{A}\hat{B} \quad \hat{A}^2\hat{B} \quad \hat{A}^3\hat{B}]$$

$$\text{rank}(\beta) = 4$$

จากเมทริกซ์ความควบคุม (β) ได้ เมื่อทำการตรวจสอบค่าลำดับชั้น (Rank) พบว่าค่าลำดับชั้นของระบบที่ต้องการควบคุมมีค่าเท่ากับ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับอันดับของระบบ ดังนั้น ระบบนี้สามารถออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการออกแบบระบบควบคุมด้วยสมการปริภูมิสแตตได้

สามารถออกแบบระบบควบคุมได้โดยออกแบบจากค่าความถี่ธรรมชาติ และค่าอัตราส่วนความหน่วง ดังนี้

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_d i \quad \text{เมื่อ} \quad \omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$$

ระบบมีความถี่ธรรมชาติอยู่ที่ 55.02 rad/s หาได้โดยการเปรียบเทียบกับตารางมาตรฐานเทียบสัมประสิทธิ์ ITAE จึงกำหนดให้ความถี่ธรรมชาติสำหรับการออกแบบมีค่าที่ 60 rad/s และค่าอัตราส่วนความหน่วงสำหรับการออกแบบระบบควบคุม ตามมาตรฐานสากลเราจะเลือกออกแบบที่ค่าอัตราส่วนความหน่วงอยู่ที่ประมาณ 0.7 ดังนั้นจะได้โพลของระบบควบคุม

$$s_{1,2} = -42 \pm 42.8486i$$

เนื่องจากระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นระบบที่มีอันดับ 3 และเมื่อทำการใช้ระบบควบคุมเซอร์โว ส่งผลให้อันดับของระบบเพิ่มเป็น 4 จึงต้องมีโพลสำหรับการออกแบบระบบควบคุม 4 ค่า จึงกำหนดให้โพลที่เหลือมีค่า เท่ากับ

$$s_{3,4} = -15$$

สามารถเขียนสมการคุณลักษณะเฉพาะ (Characteristic Equation) ได้ดังนี้

$$s^4 + 114s^3 + (6.345 \times 10^3)s^2 + (1.269 \times 10^3)s + 8.1 \times 10^5 = 0 \quad (4.16)$$

สามารถหาเมทริกซ์อัตราขยายของระบบควบคุมเซอร์โว (\hat{K}) ได้จากหลักการของแอกเคอร์มันด์ (Ackermann's Formula) เมทริกซ์อัตราขยายของระบบควบคุมมีค่าดังนี้

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} 2.6245 \times 10^5 & 6.9296 \times 10^3 & 16.7528 & -35.7348 \end{bmatrix}$$

โดย

$$K_1 = 2.6245 \times 10^5$$

$$K_2 = 6.9296 \times 10^3$$

$$K_3 = 16.7528$$

$$K_l = 35.7348$$

จากสมการที่ (4.5) จะได้สมการของระบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_l(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -K_1 & -K_2 & -K_3 & k_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r - \begin{bmatrix} 0 \\ 2.7564 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

เมื่อทำการแทนค่าลงไปในสมการสเตตของระบบจะได้

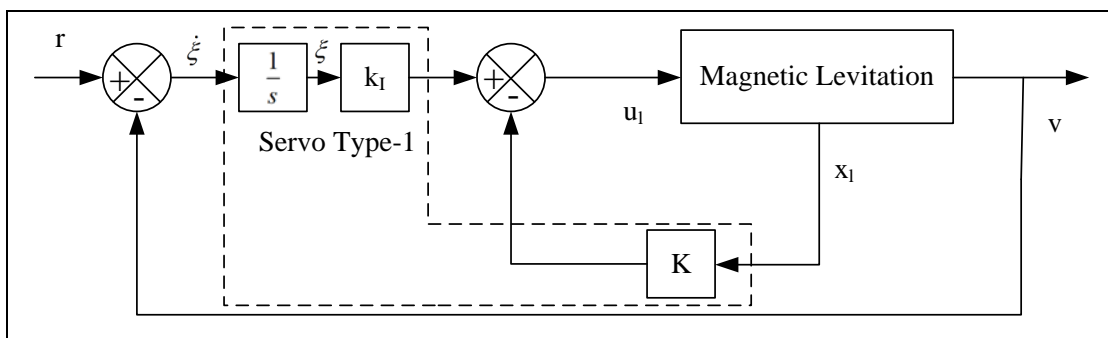
$$\dot{x}_{l,1} = x_{l,2}$$

$$\dot{x}_{l,2} = x_{l,3}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{l,3} = & (1.355 \times 10^5)x_{l,1} + (1,393.9)x_{l,2} - 97.2472x_{l,3} \\ & - (2.6245 \times 10^5)x_{l,1} - (6.9296 \times 10^3)x_{l,2} - 16.7528x_{l,3} + 35.7348\xi \end{aligned}$$

$$\dot{\xi} = r - (2.2667 \times 10^4)x_{l,1} - 22.6486x_{l,3} - 2.7564$$

ระบบควบคุมเซอร์โวที่ทำการออกแบบจะมีลักษณะของแผนภาพบล็อกรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพการทำงานของระบบเซอร์โวขณะไม่มีตัวสังเกตรระบบ

จากรูปที่ 4.5 สมมติการทำงานของระบบควบคุมทำงานโดยการนำค่าตัวแปรป้อนกลับมาจากพลานต์ (Plant) หรือระบบลูกบอลแม่เหล็กลอยด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งลักษณะของระบบนี้เป็นลักษณะของการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบควบคุม จากที่กล่าวในข้างต้นว่าสัญญาณของสเตตเวกเตอร์ (State Vector) ของระบบโดยส่วนมากแล้วการวัดข้อมูลจากตัวแปรสเตตหรือสัญญาณสเตตเวกเตอร์ทุกค่าเป็นไปได้ยาก ดังนั้นเพื่อทำการออกแบบระบบควบคุมชนิดป้อนกลับด้วยตัวแปรสเตตจึงต้องมีการออกแบบตัวประมาณค่าสเตตหรือตัวสังเกตสถานะเพื่อใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบ ดังนั้นในหัวข้อถัดไปจะเป็นการออกแบบตัวสังเกตสถานะสำหรับการประมาณค่าตัวแปรสเตตสำหรับตัวควบคุมเซอร์โว

4.3.2 การออกแบบตัวสังเกตสถานะสำหรับระบบควบคุมเซอร์โว

ระบบเซอร์โวซึ่งเป็นลักษณะของระบบควบคุมชนิดป้อนกลับด้วยตัวแปรสเตต ในทางปฏิบัติพบว่าตัวแปรสเตตของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กที่ทำการศึกษา นั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้นถ้าหากจำเป็นจะต้องประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบโดยใช้ตัวสังเกตสถานะ ระบบต้องมีคุณสมบัติในการสังเกตได้ ระบบที่สามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตได้นั้นต้องทราบค่าอินพุต และเอาต์พุตของระบบอย่างน้อยหนึ่งค่า โดยหลักการการทำงานของตัวสังเกตจะนำค่าความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของระบบที่ต้องการประมาณค่าตัวแปรสเตต และเอาต์พุตจากตัวสังเกตมาประมวลผลผ่านค่าอัตราขยายของตัวสังเกตเพื่อทำการลดค่าความผิดพลาดระหว่างระบบทั้งสอง ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ตัวสังเกตแบบอันดับเต็ม โดยระบบที่ทำการศึกษา มีอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าจากระบบควบคุม และมีเอาต์พุตคือการกระจัดของลูกบอลแม่เหล็กซึ่งสามารถวัดได้จากเซนเซอร์วัดการกระจัด โดยตัวแปรสเตตที่พิจารณามีทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ การ

การจัด ความเร็ว และกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวด โดยเนื้อหาในส่วนนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัว
สังเกตรบบแบบอันดับเต็มสำหรับระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพล

จากสมการที่ (2.37) และ (2.38) ที่กล่าวในบทที่ 2 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่
ต้องการออกแบบ ตัวสังเกตของระบบที่ต้องการจะมีรูปแบบดังสมการที่ (4.18) และ (4.19)

$$\dot{\hat{x}}_1 = A\hat{x}_1 + Bu_1 + K_e(v - \hat{v}) \quad (4.18)$$

$$\hat{v} = C\hat{x} + v_e \quad (4.19)$$

เมื่อ $K_e^{n \times 1}$ คือ อัตราขยายของตัวสังเกต
 $\hat{x}_1^{n \times 1}$ คือ ตัวแปรสถานะของตัวสังเกต
 \hat{v} คือ เอาท์พุทของตัวสังเกต

โดยที่อัตราขยายจะอยู่ในรูป

$$K_e = \begin{bmatrix} K_{e,1} \\ K_{e,2} \\ K_{e,3} \end{bmatrix}$$

สมการของตัวสังเกตในรูปแบบของปริภูมิสถานะดังนี้

$$\dot{\hat{x}}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1.3555 \times 10^5 & 1.3939 \times 10^3 & -97.2472 \end{bmatrix} \hat{x}_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} K_{e,1} \\ K_{e,2} \\ K_{e,3} \end{bmatrix} \{e\} \quad (4.20)$$

$$\hat{v} = [2.2667 \times 10^4 \quad 0 \quad 22.6486] \hat{x}_1 + 2.7564 \quad (4.21)$$

เมื่อ $e = v - \hat{v}$

เมื่อกำหนดให้ค่าที่มีสัญลักษณ์ ‘^’ คือ ค่าตัวแปรของตัวสังเกตที่ได้มาจากการประมาณค่าจากระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และ e คือ ค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม Hall Effect Sensor ของระบบจริงและตัวสังเกต โดยการจำลองการทำงานของตัวสังเกตในกรณีที่ไม่มีสิ่งรบกวนจากภายนอกเข้ามารบกวนระบบการทำงานของระบบการจำลอง เพื่อตัวสังเกตจะสามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบตัวสังเกตสถานะสำหรับประมาณค่าตัวแปรสแตตของระบบใด ๆ ต้องพิจารณาคุณสมบัติในการสังเกตได้ของระบบ โดยพิจารณาจากเมทริกซ์ความสังเกตได้

$$\text{Observability matrix} = \mathcal{O} = \begin{bmatrix} C^T & A^T C^T & (A^T)^2 C^T \end{bmatrix}$$

$$\text{rank}(\mathcal{O}) = 3$$

พบว่าค่าลำดับชั้น (Rank) มีค่าเท่ากับ 3 และมีค่าเท่ากับอันดับของระบบหรือเมทริกซ์ A ของระบบที่ต้องการสังเกตระบบจะมีคุณสมบัติความสังเกตได้ จากนั้นทำการหาค่าอัตราขยายของตัวสังเกต โดยกำหนดให้มีค่าโพลมากกว่าการออกแบบสำหรับระบบควบคุม 5 - 10 เท่า โดยจะมีโพลของตัวสังเกตอยู่ที่

$$s_{1,2} = -210 \pm 42.8486i$$

เมื่อระบบที่ต้องการสังเกตมีอันดับของเมทริกซ์ A เท่ากับ 3 ดังนั้น โพลของตัวสังเกตมีทั้งหมด 3 ค่า กำหนดให้โพลตัวที่สามของตัวสังเกตมีค่าดังนี้

$$s_3 = -200$$

สามารถเขียนสมการคุณลักษณะเฉพาะ (Characteristic Equation) ได้ดังสมการที่ (4.22)

$$s^3 + 620s^2 + (1.2994 \times 10^5)s + 9.1872 \times 10^7 = 0 \quad (4.22)$$

สามารถหาเมทริกซ์อัตราขยายของตัวสังเกต (K_e) ได้จากหลักการของแอกเคอร์มันด์ โดยเมทริกซ์อัตราขยายตัวสังเกตมีค่าดังนี้

$$K_e = [0.007 \quad 1.7404 \quad 16.0728]^T$$

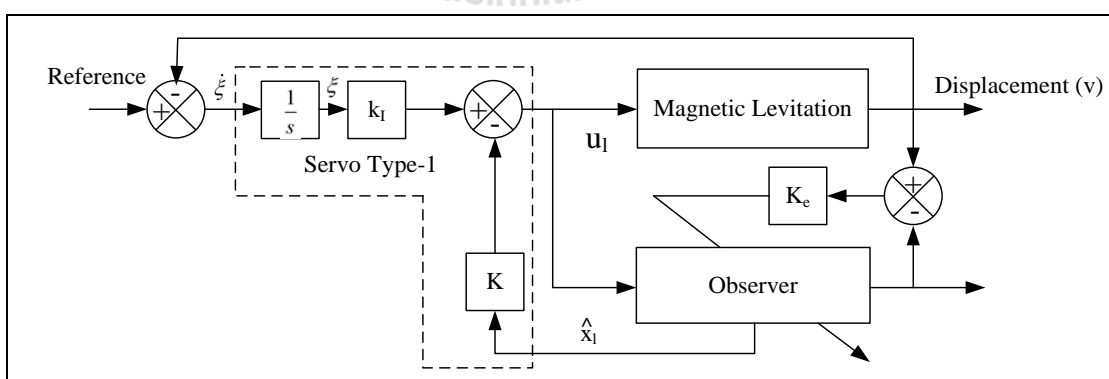
จะได้สมการของตัวสังเกต คือ

$$\dot{\hat{x}}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1.3555 \times 10^5 & 1.3939 \times 10^3 & -97.2472 \end{bmatrix} \hat{x}_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0.007 \\ 1.7404 \\ 16.0728 \end{bmatrix} \{e\} \quad (4.23)$$

$$\hat{v} = [2.2667 \times 10^4 \quad 0 \quad 22.6486] \hat{x}_1 + 2.7564 \quad (4.24)$$

4.3.3 ระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ

จากการออกแบบระบบควบคุมเซอร์โวในหัวข้อที่ 4.3.1 และการออกแบบตัวสังเกตสถานะในหัวข้อที่ 4.3.2 ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการนำตัวควบคุมกับตัวสังเกตระบบมาใช้งานร่วมกันเพื่อใช้ในการควบคุมระบบที่ไม่สามารถประมาณค่าตัวแปรสแตตในแต่ละสแตตได้ มีลักษณะอัลกอริทึมการทำงานของระบบดังแสดงรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ

เมื่อทำการใช้งานตัวควบคุมร่วมกับตัวสังเกตแบบอันดับเต็มส่งผลให้ระบบควบคุมลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{x}_{l,1} &= x_{l,2} \\ \dot{x}_{l,2} &= x_{l,3} \\ \dot{x}_{l,3} &= (1.355 \times 10^5)x_{l,1} + (1,393.9)x_{l,2} - 97.2472x_{l,3} \\ &\quad - (2.6245 \times 10^5)\hat{x}_{l,1} - (6.9296 \times 10^3)\hat{x}_{l,2} - 16.7528\hat{x}_{l,3} + 35.7348\xi \\ \dot{\xi} &= r - v\end{aligned}\quad (4.25)$$

โดย $v = (2.2667 \times 10^4)x_{l,1} + 22.6486x_{l,3} + 2.7564$

และสมการของตัวสังเกต

$$\begin{aligned}\hat{x}_{l,1} &= \hat{x}_{l,2} + 0.007e \\ \hat{x}_{l,2} &= \hat{x}_{l,3} + 1.7404e \\ \hat{x}_{l,3} &= (1.355 \times 10^5)\hat{x}_{l,1} + (1,393.9)\hat{x}_{l,2} - 97.2472\hat{x}_{l,3} + u_l + 16.0728e \\ \hat{v} &= (2.2667 \times 10^4)\hat{x}_{l,1} + 22.6486\hat{x}_{l,3} + 2.7564\end{aligned}\quad (4.26)$$

เมื่อ

$$u_l(t) = -K\hat{x}_l(t) + k_l\xi(t)\quad (4.27)$$

จากนั้นจะเป็นการนำตัวควบคุมพีดี และตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะไปใช้ในการควบคุมผลการจำลองสถานการณ์และทดลองการควบคุมระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป

4.4 สรุป

จากระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กที่มีความซับซ้อนของระบบ เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งจำเป็นต้องมีการออกแบบตัวควบคุมเพื่อใช้ควบคุมระบบให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของระบบแล้วพบว่าระบบเป็น

ระบบ Type - 0 ดังนั้นสิ่งที่สำคัญคือการเลือกตัวควบคุมที่เหมาะสม โดยตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบคือตัวควบคุมที่ส่งผลให้ชนิดของระบบเพิ่มขึ้นเป็น Type - 1 เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่สถานะสมดุล งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มอินทิเกรต 1 ตัว ซึ่งตัวควบคุมมีลักษณะเป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยตัวแปรสแตต แต่เนื่องจากระบบไม่สามารถวัดค่าตัวแปรสแตตทั้งหมดได้โดยตรง ดังนั้นจำเป็นต้องมีการใช้ตัวสังเกตสถานะเพื่อประมาณค่าตัวแปรสแตตทั้งหมดของระบบเพื่อใช้ในการป้อนกลับ และตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ เป็นตัวควบคุมที่มีลักษณะการทำงานด้วยการติดตามสัญญาณ (Tracking) อินพุตอ้างอิงที่มีประสิทธิภาพ จึงเป็นตัวควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเพื่อใช้ควบคุมแม่เหล็กกลอยให้มีผลการตอบสนองตามต้องการ เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานกับตัวควบคุมชนิดดั้งเดิมที่นิยมใช้สำหรับระบบลูกบอลลอยตัวคือตัวควบคุมพีดี ซึ่งหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมจากวิธีการ Response Optimization



บทที่ 5

การจำลองสถานการณ์ และผลการทดลองการทำงาน ของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การควบคุมการทำงานของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กนั้น มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำหนดเงื่อนไขในการควบคุม เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากสนามแม่เหล็กเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดแรงดึงหรือผลลบลูกบอล ส่งผลให้การควบคุมลูกบอลนั้นมีช่วงที่แคบ อีกทั้งขาดเสถียรภาพในการควบคุมได้ง่าย ดังนั้น เนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายถึงกระบวนการและวิธีการกำหนดขอบเขตการทำงานเพื่อใช้ในการควบคุมลูกบอลจากตำแหน่งสมดุลให้เป็นไปตามต้องการ โดยแสดงการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง รวมถึงการเขียนอัลกอริทึมเพื่อใช้ในการควบคุม และอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับชุดทดลอง รวมถึงแสดงผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองของตัวควบคุมที่ดีกับตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 เครื่องมือทดลองและการติดตั้ง

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยทำการทดลองด้วยการเขียนอัลกอริทึมของตัวควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink บนคอมพิวเตอร์ จากนั้นทำการเชื่อมต่อสัญญาณการควบคุมระหว่างคอมพิวเตอร์กับส่วนที่เป็นขดลวดเหนี่ยวนำ และรับสัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดการกระจัดจากความเข้มสนามแม่เหล็กด้วย RAPCON Board ซึ่งเป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เป็นอุปกรณ์เชื่อมโยงระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ทดลองผ่านสาย Serial Crossover Cable ไปยัง PCI Serial Card ของคอมพิวเตอร์ ซึ่ง RAPCON Board จะเชื่อมต่อกับ โปรแกรม MATLAB/Simulink ในส่วนเสริม Real - Time Windows Target เป็นบอร์ดที่สามารถควบคุมแบบ Real Time ซึ่งมีความสามารถในการรับ - ส่งสัญญาณที่มีลักษณะทั้ง Digital Signal และ Analog Signal โดยในการทดลองนั้น จะมี Power Amplifier เพื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่ RAPCON Board และตัวบอร์ดจะทำการจ่ายกระแสไปยังขดลวดเหนี่ยวนำตามคำสั่งในอัลกอริทึมที่ทำการเขียนไว้ในโปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นเมื่อลูกบอลลอยอยู่บนอากาศ เซนเซอร์วัดการ

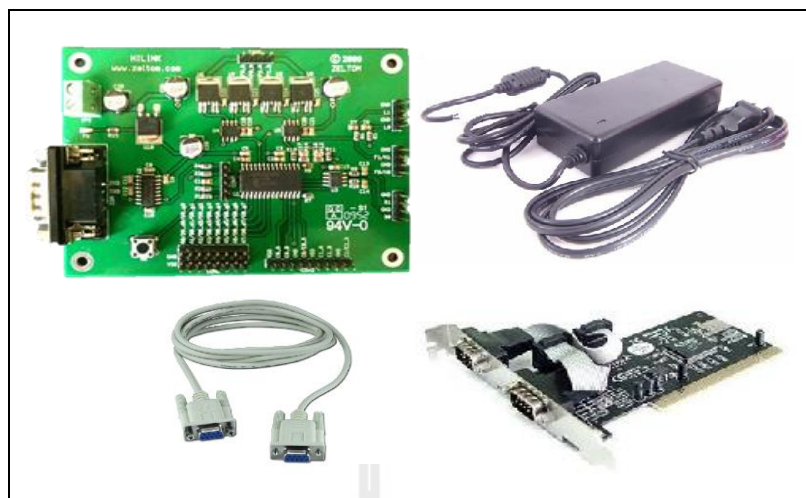
การจัดซึ่งอยู่ในรูปของค่าความต่างศักย์ ซึ่งเป็นสัญญาณแบบ Analog จะถูกส่งต่อไปยัง RAPCON Board เพื่อส่งต่อไปประมวลผลยังโปรแกรมควบคุมการทำงานต่อไป

การทดลองนี้ได้ใช้เครื่องต้นแบบที่ทำการจัดซื้อจากทางบริษัท Zeltom Education and Industrial Control Systems ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทำสำเร็จเพื่อความสะดวกรวดเร็วในการจัดทำเครื่องมือสำหรับการทดลอง โดยประกอบไปด้วย

1. อุปกรณ์สร้างสนามแม่เหล็กพร้อมแท่นวาง และลูกบอลแม่เหล็กถาวรทรงกลมตัน น้ำหนัก 41.3 กรัม แสดงดังรูปที่ 5.1
2. บอร์ดควบคุมการทำงาน (RAPCON Board) อแดปเตอร์สำหรับจ่ายไฟเข้าสู่บอร์ด และ PCI Serial Card แสดงดังรูปที่ 5.2 ขั้นตอนการติดตั้งดังแสดงในภาคผนวก ง.
3. เซนเซอร์วัดการกระจัด (Hall Effect Sensor)
4. คอมพิวเตอร์พร้อมระบบปฏิบัติการ Windows 7 32 Bit และ โปรแกรม MATLAB v2009a โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Platform ดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 อุปกรณ์สร้างสนามแม่เหล็กพร้อมแท่นวาง และลูกบอลแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 5.2 บอร์ด RAPCON, อแดปเตอร์สำหรับไฟเลี้ยงบอร์ด เชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover เข้าสู่ PCI Serial Card ของคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 5.1 แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของ RAPCON Board (RAPCON Real - Time Rapid Control Prototyping Platform for MATLAB/Simulink)

Meaning	Magnitude	Unit
Power Supply (Minimum Current)	6 - 15 (0.15)	VDC (A)
Analog Input A0 - A7 Analog 12 Bit	0 - 5	V
Capture Input C0 - C1 Digital 16 Bit		
Digital Input D0_d0 - D0_d0 Digital		
Encoder Input E0 - E1 Digital 16 Bit		
Frequency Output F0 - F1 Digital 16 Bit		
Analog Output B0 - B1 Analog 12 Bit		
Digital Output G0_g0 - G0_d7 Digital		
Pulse Output H0 - H1 Digital 16 Bit		
Filtered Pulse Output L0 - L1 Analog		
H - Bridge Output P0 - P1 Digital		
Voltage Regulator Output	5 (0.25)	V (A)
Ground GND	0	V
Sampling Range	Up to 15.2	kHz

ข้อควรแนะนำในการใช้ RAPCON Board ศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก ภาคผนวก ง.

1. Expansion Slot for Serial Card
2. Serial Crossover Cable
3. Matlab R2007a หรือเวอร์ชันสูงกว่าที่มี Simulink
4. RAPCON Software เวอร์ชัน 1.4 เป็นต้นไป

5.2 การควบคุมและรับสัญญาณผ่าน RAPCON Board

ในการควบคุมซึ่งหลักการข้างต้นจะใช้ H - Bridges Output Block ซึ่งเป็น Block ที่เชื่อมต่อ RAPCON Board กับ Real - Time Windows Target ในรูปของสัญญาณ Digital แบบ 16 Bit/Channel โดยมี Channel P0 ถึง P1 แต่ละ Channel จ่าย Voltage ได้ ตั้งแต่ 0 ถึง Supply Voltage, 5 A สัญญาณ Digital ที่จ่ายอยู่ในรูป PWM (Pulse Width Modulated) แต่ละ H - Bridges มีส่วนประกอบ MOSFET Bridge สามารถขับได้ถึง 5 A ถ้าโหลดของ H - Bridges มีการกรองโดยใช้ Lowpass Filter ดังนั้น Output สามารถเลือกประยุกต์ใช้ Amplifiers แบบ Linear โดยเปลี่ยนสัญญาณ Digital เป็น Analog และ Voltage ต่อกับ H - Bridges ขึ้นกับ โหลดสัมพันธ์กับ Duty - Cycle ของ Input คือ

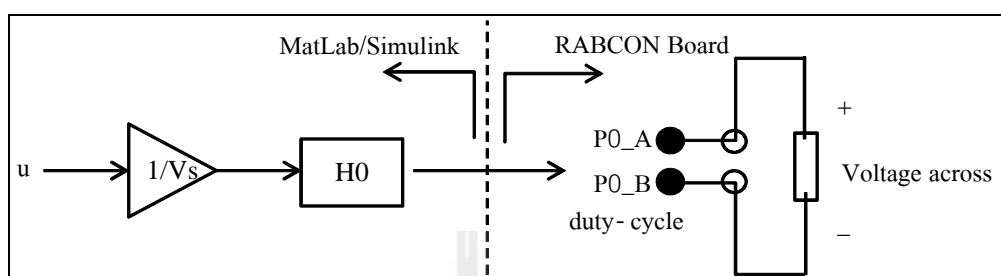
$$V_{con} \approx (2\delta - 1)V_s \quad (5.1)$$

โดยที่ $\omega = \delta/f = \delta\tau$ เมื่อ f คือ Fundamental Frequency ของ PWM อยู่ระหว่าง 449.8291 Hz ถึง 115,156.25 Hz และ τ คือ คาบ ซึ่งแบ่ง H - Bridges ออกเป็น 2 โหมด โดยมีเงื่อนไขการส่งสัญญาณดังนี้

$$V_{con} \approx \begin{cases} +V_s, & u \geq V_s, \\ 2u - V_s, & 0 < u < V_s, \\ -V_s, & u \leq 0 \end{cases} \quad \text{Normal} \quad (5.2)$$

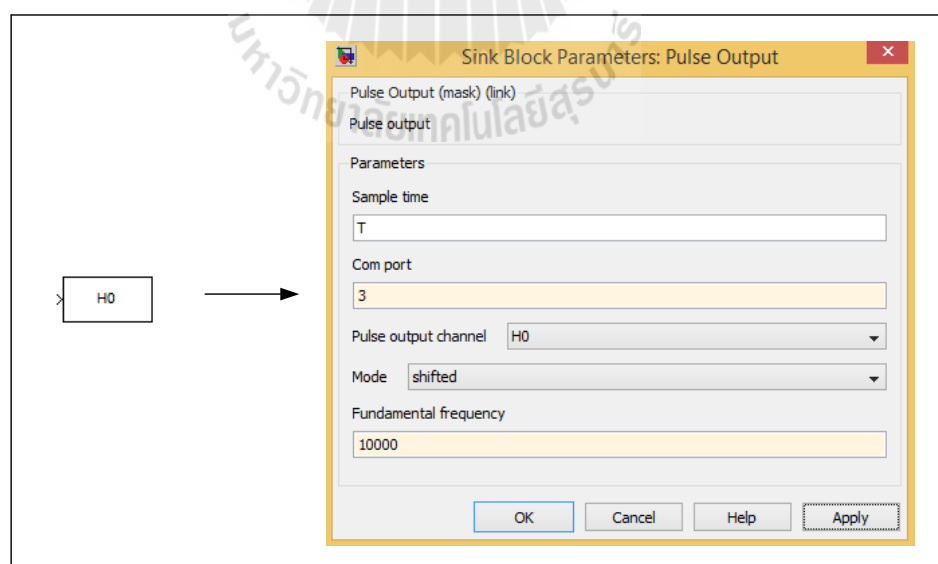
$$V_{con} \approx \begin{cases} +V_s, & u \geq +V_s, \\ u, & -V_s < u < +V_s, \\ -V_s, & u \leq -V_s \end{cases} \quad \text{Shifted} \quad (5.3)$$

ที่ Fundamental Frequency = 20,000 Hz, Supply Voltage, $V_s = \pm 12V$ และ มี ค่า α Value คือ α/V_s แสดง ไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ MATLAB/Simulink กับ RABCON Board ในการป้อนค่าสัญญาณให้กับ Power Amplifier ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดง ไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ MATLAB/Simulink กับ RABCON Board ในการป้อนค่าสัญญาณให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ

ลักษณะของตัวส่งสัญญาณควบคุมผ่านบล็อก Pulse Output ของ Software RAPCON Board แสดงดังรูปที่ 5.4 โดยการปรับตั้งค่าต่าง ๆ เช่น Sample Time, Com Port และ Pulse Output Channel ขึ้นอยู่กับผู้ใช้งาน



รูปที่ 5.4 แสดงบล็อก Pulse Output ที่ใช้ในการส่งสัญญาณควบคุมไปสู่อุปกรณ์ทดลอง

ส่วนเซนเซอร์ที่ใช้วัดระยะเป็น Hall Effect Sensor ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดความเข้มสนามแม่เหล็กในรูปแบบแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเป็นสัญญาณเข้าบอร์ดควบคุม ซึ่งมีค่า Gain ของเครื่องมือจากคู่มือการใช้งานและจากการระบุเอกลักษณ์เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมให้เป็นระยะทางเพื่อใช้ในการป้อนกลับในการออกแบบระบบควบคุม

ซึ่งใช้ Analog Input Block ซึ่งเป็น Block ที่เชื่อมต่อ RABCON Board กับ Real - Time Windows Target ในรูปของสัญญาณ Analog แบบ 12 Bit/Channel โดยมี Channel A0 – A7 ซึ่งมี 2 โหมด โดยมีเงื่อนไขการรับสัญญาณดังนี้

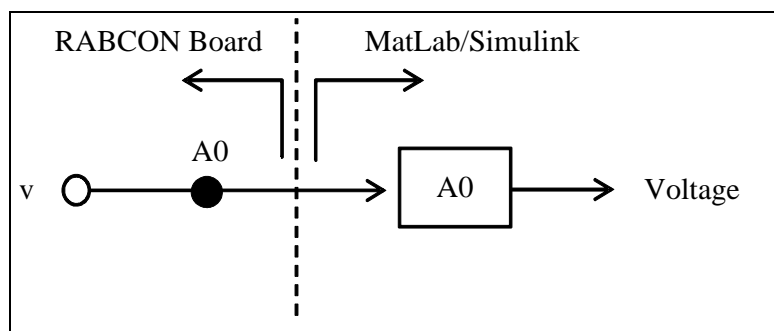
$$V_{sen} \approx \begin{cases} 5, & u \geq 5, \\ u, & 0 < u < 5, \\ 0, & u \leq 0 \end{cases} \quad \text{Unipolar} \quad (5.4)$$

$$V_{sen} \approx \begin{cases} +5, & u \geq 5, \\ 2u - 5, & 0 < u < 5, \\ -5, & u \leq 0 \end{cases} \quad \text{Bipolar} \quad (5.5)$$

โดยมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมดังสมการที่ (5.6)

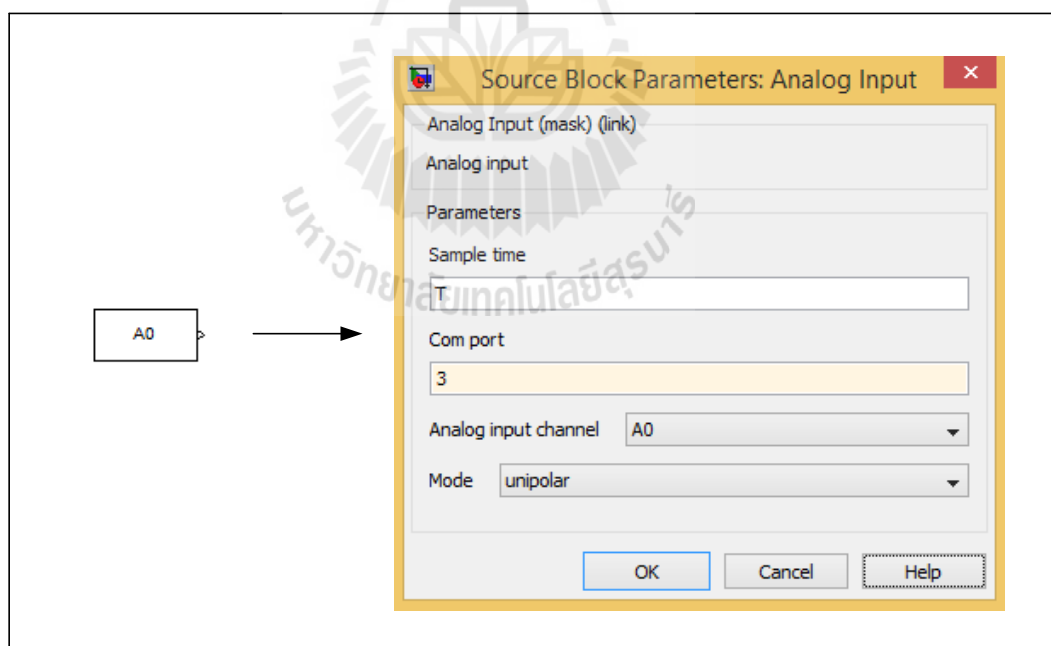
$$v = c_0 + c_1 \frac{1}{y^2} + c_2 i \quad (5.6)$$

โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซนเซอร์ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และมีไดอะแกรมการเชื่อมต่อของสัญญาณระหว่าง MATLAB/Simulink กับ RABCON Board ในการรับค่าสัญญาณจากเซนเซอร์ ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงไดอะแกรมการเชื่อมต่อของ MATLAB/Simulink กับ RABCON Board ในการรับค่าสัญญาณ Hall Effect Sensor

ลักษณะของการรับสัญญาณป้อนกลับผ่านบล็อก Analog Input ของ Software RAPCON Board แสดงดังรูปที่ 5.6 โดยการปรับตั้งค่าต่าง ๆ เช่นค่า Sample Time, Com Port และ Analog Input Channel ขึ้นอยู่กับผู้ใช้งาน



รูปที่ 5.6 แสดงบล็อก Analog Input ที่ใช้ในการรับสัญญาณป้อนกลับ

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซนเซอร์

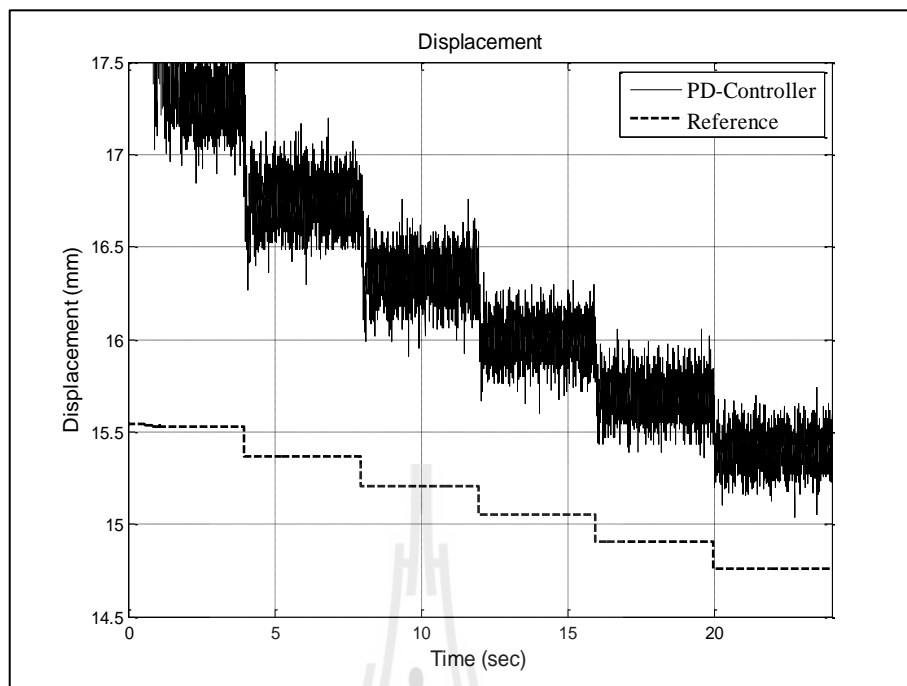
Linear Hall Effect Sensor (Inductive Proximity Switches Analog Output)			
Meaning	Symbol	Magnitude	Unit
V_{cc}		5	VDC
Output voltage	v	0-5	VDC
Sensor Gain	c_0	2.48	V
Sensor Gain	c_1	3.86×10^{-4}	Vm^2
Sensor Gain	c_2	0.3472	V/A

5.3 การจำลองสถานการณ์และผลการทดลองการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี

ก่อนการดำเนินการจำลองสถานการณ์ หรือทำการทดลอง ต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการทำงานของตัวควบคุมแต่ละชนิด ทดลองด้วยการกำหนดอินพุตซึ่งมีลักษณะอินพุตแบบขั้นบันไดให้แก่วระบบเป็นระยะอ้างอิงจากระยะสูงสุดถึงระยะต่ำสุด โดยระยะที่กำหนดนั้นเป็นระยะห่างที่ตัวควบคุมทั้งสองชนิดสามารถทำการควบคุมการทำงานได้

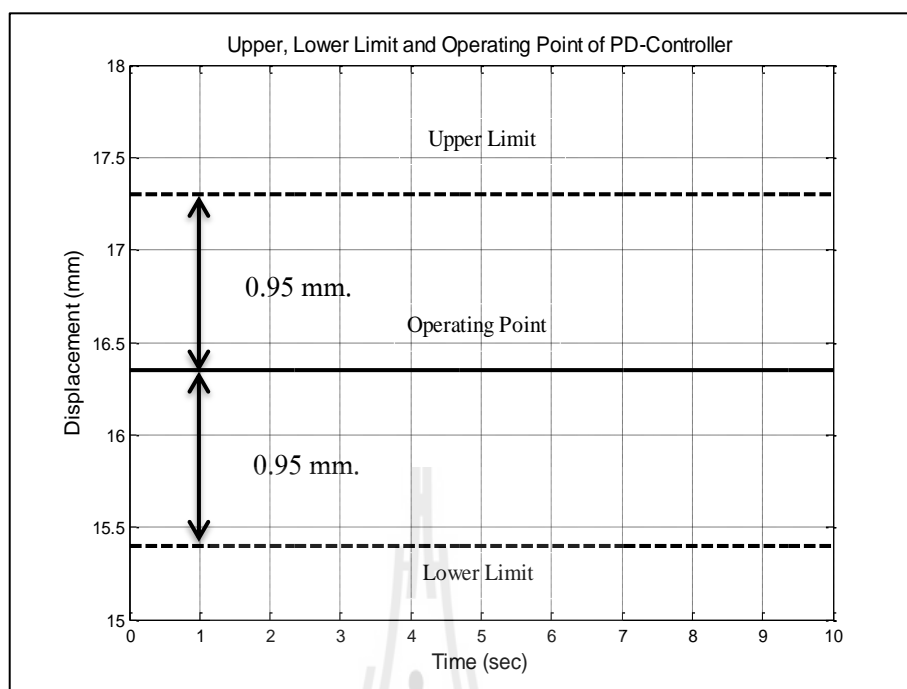
5.3.1 เงื่อนไขขอบเขตการทำงานของตัวควบคุมพีดี

การกำหนดขอบเขตการทำงานและจุดปฏิบัติงานของตัวควบคุมพีดีสำหรับการควบคุมระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กนั้น โดยให้อินพุตมีลักษณะขั้นบันได มีการเปลี่ยนแปลงระยะกระจัดให้มีขนาดลดลง 0.16 มิลลิเมตร ทุก ๆ 4 วินาที ซึ่งได้ผลการทดสอบตัวควบคุมพีดีแสดงดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แสดงผลการทำงานของตัวควบคุมพีดีเพื่อกำหนดขอบเขตการทำงาน

จากเงื่อนไขการทำงานของตัวควบคุมพีดีที่แสดงดังรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่า พฤติกรรมการตอบสนองของตัวควบคุมพีดีไม่สามารถปรับตัวให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงได้ ซึ่งผลการทำงานของตัวควบคุม ซึ่งมีลักษณะของการตอบสนองทางพลวัตต่ออินพุตแบบขั้นบันได จากผลการตอบสนองที่ได้ เราสามารถกำหนดขอบเขตการทำงานของตัวควบคุมพีดีว่ามีช่วงการทำงานสูงสุด - ต่ำสุด และมีจุดปฏิบัติงาน ดังรูปที่ 5.8 พบว่าช่วงการทำงานสูงสุด - ต่ำสุดที่ระบบสามารถประมาณให้เป็นเชิงเส้น และตัวควบคุมพีดีสามารถทำงานได้อยู่ที่ 17.3 และ 15.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีจุดปฏิบัติงานอยู่ที่ 16.35 มิลลิเมตร ดังนั้นสรุปได้ว่าตัวควบคุมพีดีนั้นมีประสิทธิภาพการทำงานรอบจุดสมดุลอยู่ที่ 16.35 ± 0.95 มิลลิเมตร



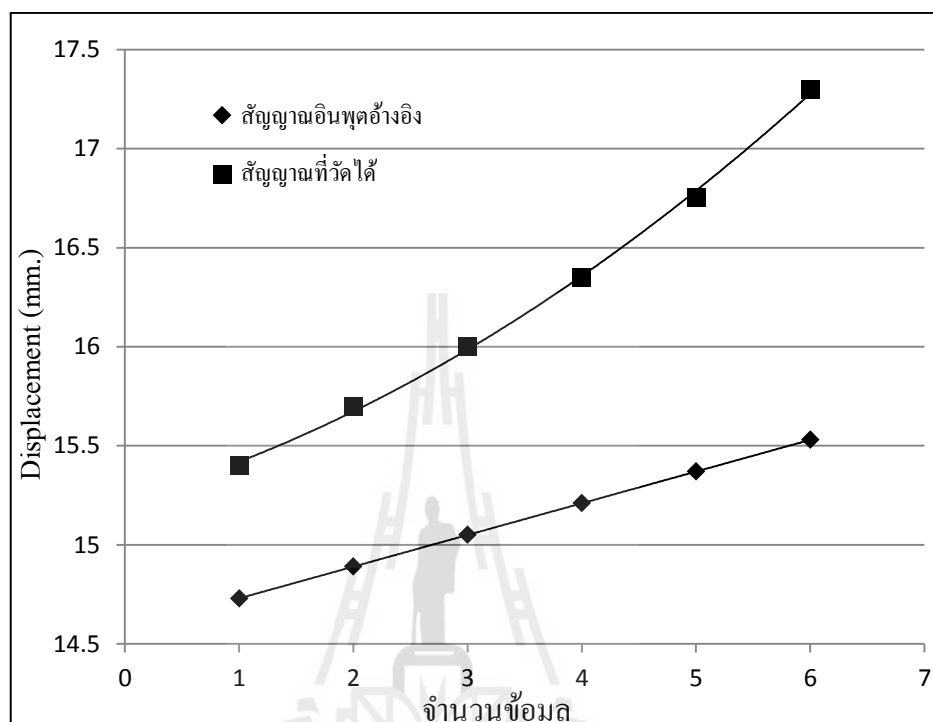
รูปที่ 5.8 แสดงขอบเขตการทำงาน และจุดปฏิบัติงานของตัวควบคุมพีดี

จากผลการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขการทำงานของตัวควบคุม ซึ่งมีผลการตอบสนองที่ไม่ปรับตัวตามสัญญาณอ้างอิง โดยสัญญาณอินพุตที่ต้องการกับสัญญาณจริงที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.3 เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดสัญญาณอินพุตอ้างอิงในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับสัญญาณที่วัดได้จริง

ตำแหน่งที่	สัญญาณอินพุตอ้างอิง (mm.)	สัญญาณที่วัดได้จริง (mm.)	ความผิดพลาด
1	14.73	15.40	4.55%
2	14.89	15.70	5.44%
3	15.05	16.00	6.31%
4	15.21	16.35	7.49%
5	15.37	16.75	8.98%
6	15.53	17.30	11.40%

จากตารางที่ 5.3 สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิงที่ต้องการและสัญญาณที่วัดได้จริงแสดงดังรูปที่ 5.9



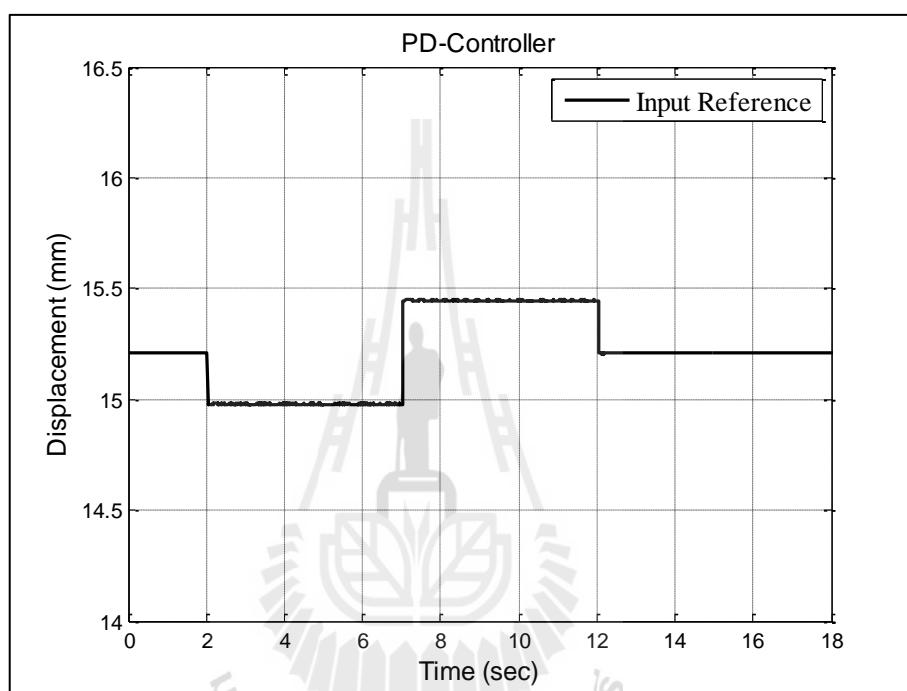
รูปที่ 5.9 แสดงเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับสัญญาณที่วัดได้

พิจารณารูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิงกับสัญญาณที่วัดได้ พบว่าสัญญาณที่วัดได้ไม่ปรับตัวตามสัญญาณอินพุตอ้างอิง มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น พิจารณาความผิดพลาดของการทำงาน พบว่าค่าความผิดพลาดจะลดลงเมื่อระยะกระจัดลดลง และสังเกตได้ว่าสัญญาณอินพุตอ้างอิงมีระยะนอกเหนือขอบเขตการทำงานของตัวควบคุมพีดี ดังนั้นใช้กราฟดังกล่าวในการกำหนดค่าสัญญาณอินพุตเพื่อใช้จำลองสถานการณ์และการทดลองระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กด้วยตัวควบคุมพีดี

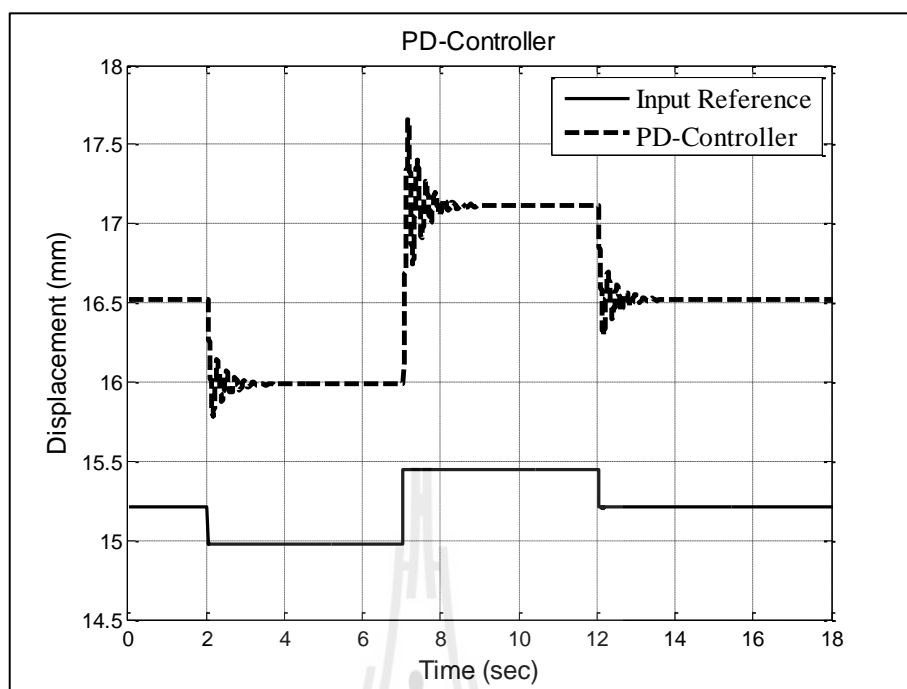
5.3.2 การจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี

พิจารณาการทำงานของแบบจำลองระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ตัวควบคุมพีดี ด้วยการกำหนดสัญญาณอินพุตอ้างอิงให้แก่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพื่อทำการจำลองผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบต่อสัญญาณอินพุตอ้างอิง โดยวิธีการ

ดำเนินการจำลองสถานการณ์ด้วยการกำหนดให้อินพุตของระบบเป็นระยะกระจัดของลูกบอลที่ต้องการ โดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิงและสัญญาณที่วัดได้จาก รูปที่ 5.9 กำหนดลักษณะของสัญญาณเป็นแบบขั้นบันไดและมีระยะห่างตั้งแต่ 15.0 มิลลิเมตร ถึงประมาณ 15.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5.10 ได้ผลการจำลองการควบคุมระยะกระจัดของลูกบอลของ ตัวควบคุมพีดีแสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณอินพุตอ้างอิงสำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี

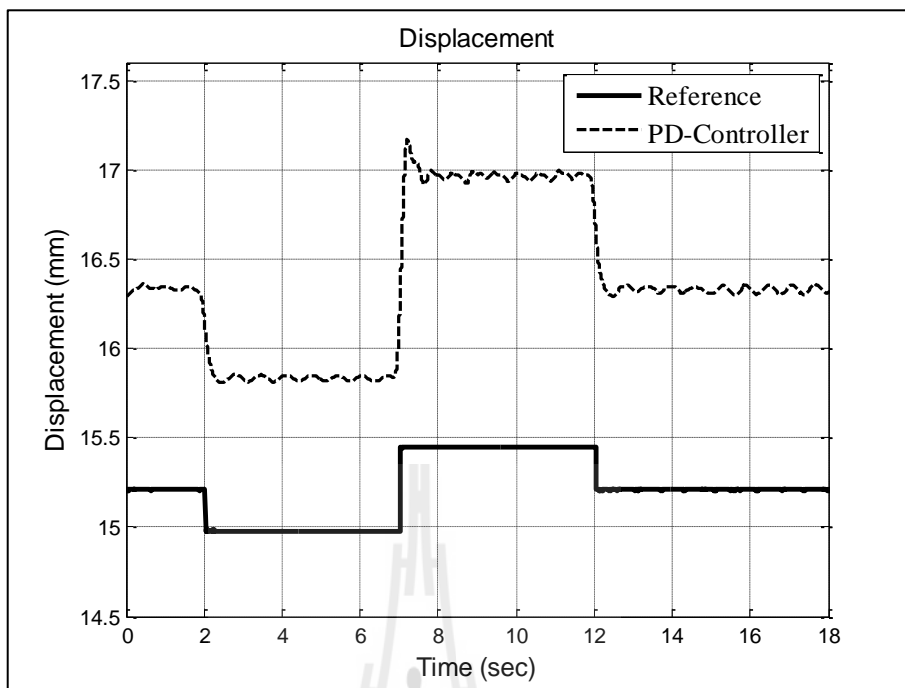


รูปที่ 5.11 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี

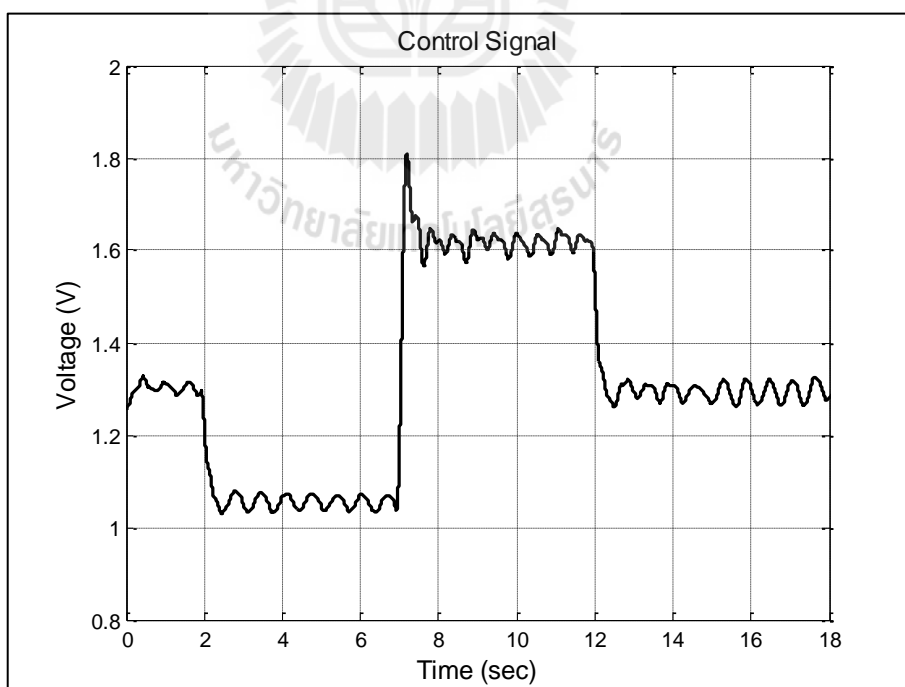
จากรูปที่ 5.11 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี พบว่าระบบมีผลการตอบสนองไม่สอดคล้องกับการสัญญาณอินพุตอ้างอิงในส่วนองระยะกระจัดที่สภาวะสมดุล ผลการตอบสนองมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะสมดุลสูงสุดถึง 11% มีค่าการพุ่งเกินสัญญาณสูงสุดถึง 18% และมีระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุล 2.5 วินาที โดยค่าการพุ่งเกินของสัญญาณและระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลนั้นเป็นไปตามความคาดหวังในการออกแบบตัวควบคุมพีดีซึ่งสามารถยอมรับได้

5.3.3 การทดลองการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี

ในการทดลองนี้เพื่อทำการศึกษาผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดดังรูปที่ 5.10 โดยไม่มีแรงรบกวนจากภายนอกเมื่อระบบรับค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิงดังกล่าวส่งผลให้ระบบควบคุมทำงานโดยปล่อยสัญญาณควบคุมในลักษณะของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กดึงดูดลูกบอลให้ลอยตัว และมีผลการตอบสนองเป็นไปตามสัญญาณอินพุต ซึ่งผลการตอบสนองของระบบที่มีตัวควบคุมพีดี เป็นตัวควบคุมการทำงาน มีลักษณะผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบที่มีต่อสัญญาณอินพุตอ้างอิง ดังรูปที่ 5.12 และมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าควบคุมดังรูปที่ 5.13



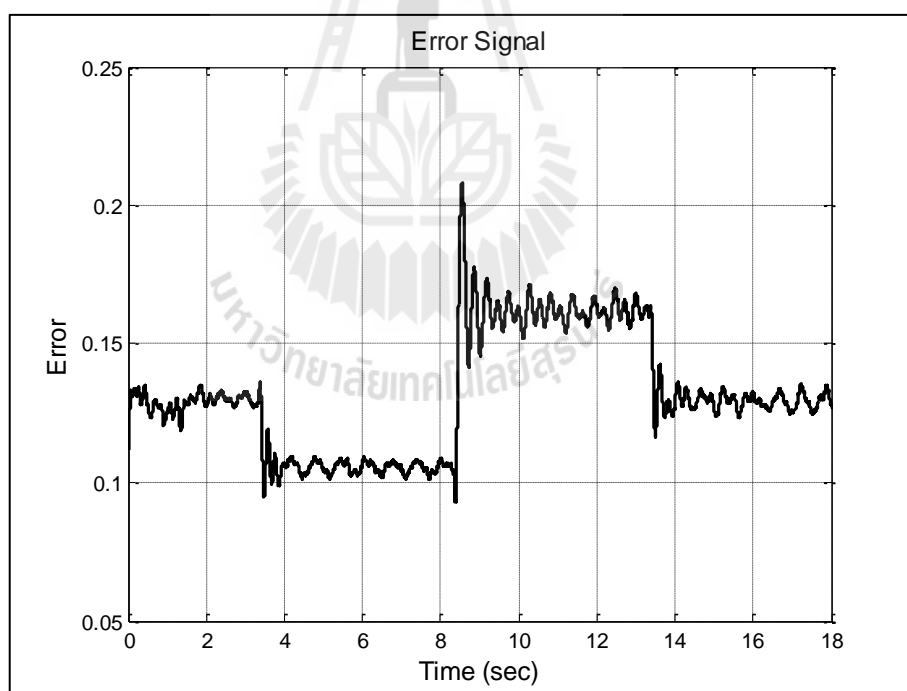
รูปที่ 5.12 แสดงผลการทดลองการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี



รูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าควบคุมการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี

จากรูปที่ 5.12 แสดงผลการทดลองการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี โดยเปรียบเทียบการกระทำที่ได้จากการทำงานของตัวควบคุมพีดีที่วัดได้จากเซนเซอร์ และสัญญาณอินพุตอ้างอิง สังเกตได้ว่าการตอบสนองทางพลวัตของระบบมีความไม่สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตอ้างอิงของระบบเช่นเดียวกับการจำลองสถานการณ์ เมื่อพิจารณาผลการตอบสนอง พบว่าระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยใช้เวลา 1.5 วินาที มีค่าความผิดพลาดที่สภาวะสมดุลสูงสุด 10.06% มีค่าการพุ่งเกินของสัญญาณถึง 11.69% และพิจารณารูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าควบคุมการทำงานพบว่าเมื่อระยะกระจัดของลูกบอลมีค่ามาก ตัวควบคุมจะทำการปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้มีขนาดของแรงทางแม่เหล็กที่เพียงพอต่อการดึงดูดลูกบอล ในทางกลับกัน ถ้าระยะกระจัดมีค่าน้อยก็จะมีปรับแรงดันไฟฟ้าให้ลดลงด้วย

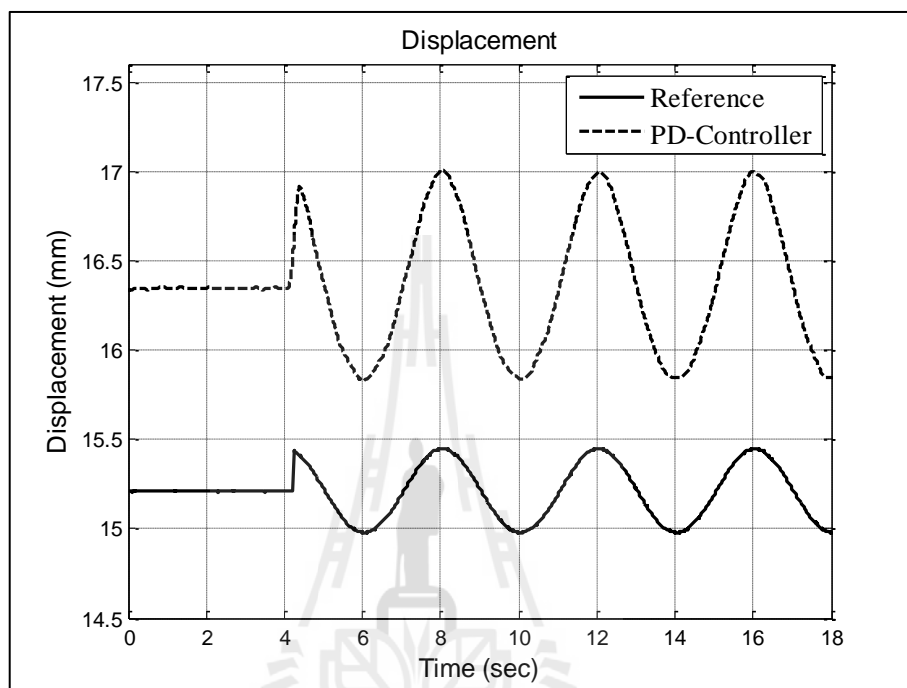
จากผลการทำงานของระบบพบว่าผลการตอบสนองของระบบมีความผิดพลาดที่สภาวะสมดุล โดยลักษณะสัญญาณความผิดพลาดของผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 แสดงสัญญาณความผิดพลาดของการทดลองระบบด้วยตัวควบคุมพีดี

จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองการทำงานของตัวควบคุมพีดีเพื่อใช้ในการควบคุมระบบเพื่อศึกษาผลการตอบสนองทางพลวัตที่มีต่อสัญญาณอินพุตอ้างอิงที่มีลักษณะเป็น

แบบขั้นบันไดพบว่าระบบสามารถทำงานได้ ผู้วิจัยทำการทดสอบเพิ่มเติมด้วยอินพุตที่มีลักษณะเป็นแบบฮาร์โมนิกโดยใช้สัญญาณอินพุตแบบ Sine Wave มีแอมพลิจูดขนาด 0.65 มิลลิเมตร และมีความถี่ 1.6 rad/s (0.25 Hz.) ได้ผลการทดลองเปรียบเทียบกับอินพุตอ้างอิง ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 แสดงผลการตอบสนองทางพลวัตต่อสัญญาณอินพุตแบบฮาร์โมนิกด้วยตัวควบคุมพีดี

ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 5.15 ระบบสามารถทำงานได้มีแนวโน้มตามสัญญาณอินพุต แต่ระบบผลการตอบสนองที่สภาวะสมดุลมีความผิดพลาดเช่นเดียวกับอินพุตแบบขั้นบันได จากผลการทดสอบการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการทำงานของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมพีดีในการควบคุมระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก พบว่าระบบสามารถทำงานได้ที่ระยะการทำงานตั้งแต่ 15.4 - 17.3 มิลลิเมตร และมีจุดปฏิบัติงานอยู่ที่ 16.35 มิลลิเมตร ผลการทดลองของระบบให้ผลการตอบสนองที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการจำลองสถานการณ์ กล่าวคือ ผลการตอบสนองของระบบมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะสมดุล แต่การทดลองจริงมีค่าการฟุ้งเกินของสัญญาณและใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลน้อยกว่า โดยสาเหตุที่ทำให้ผลการตอบสนองมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะสมดุล เนื่องจากระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กมีลักษณะของระบบเป็น Type - 0 ตัวควบคุมที่เหมาะสมนั้นจึงควรเป็นตัวควบคุมที่ทำให้ชนิดของระบบเปลี่ยนเป็น Type - 1 ตัวควบคุมพีดีนั้นไม่มีความสามารถในการเพิ่มชนิดให้กับระบบให้เป็น Type - 1 ได้

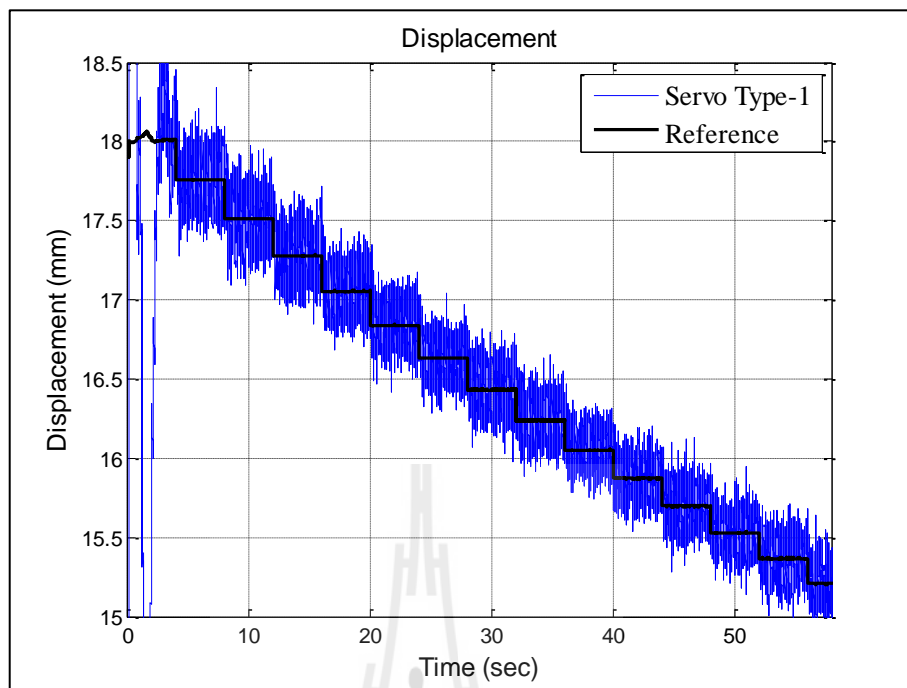
ธรรมชาติของระบบที่มี Type - 0 ระบบจะมีลักษณะของผลการตอบสนองที่มีค่าความผิดพลาดที่สถานะสมดุล ดังนั้นการเลือกใช้งานตัวควบคุมที่เหมาะสมให้กับระบบ จึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบใช้งานตัวควบคุม ดังนั้นตัวควบคุมพีดีจึงเหมาะสำหรับการควบคุมระบบที่เป็น Type - 1 หรือนำมาใช้เพื่อชดเชยระบบที่ขาดเสถียรภาพเพียงอย่างเดียวโดยที่ไม่คำนึงถึงผลการตอบสนองเทียบกับอินพุตอ้างอิง

5.4 การจำลองสถานการณ์ และผลการทดลองการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุม เซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว

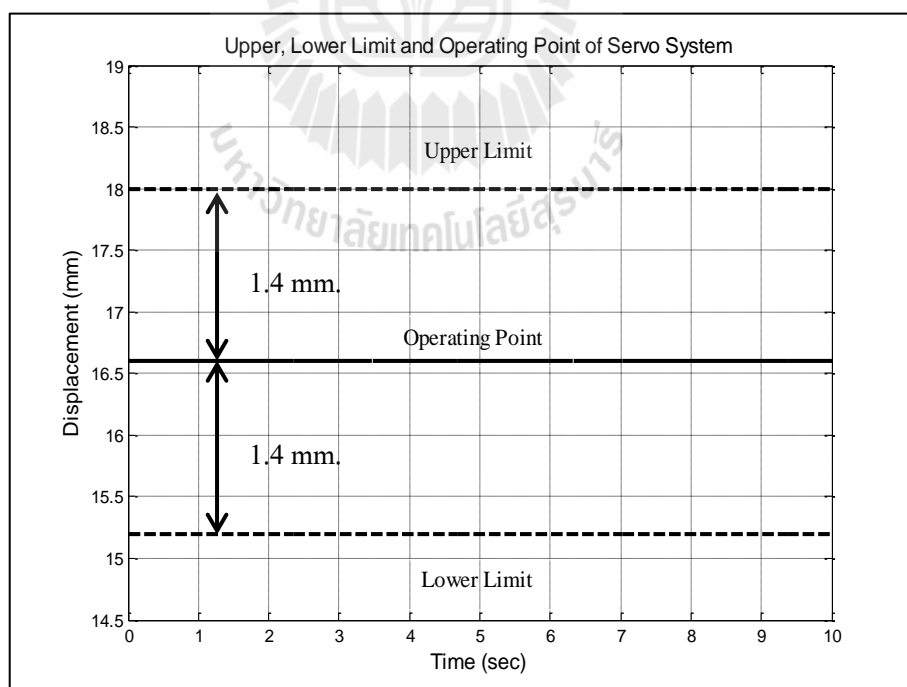
จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมพีดี ซึ่งเป็นลักษณะของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ในส่วนนี้นำเสนอการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุม และแสดงให้เห็นถึงข้อดีของตัวควบคุมสมัยใหม่ และเช่นเดียวกันกับตัวควบคุมพีดี ก่อนทำการจำลองสถานการณ์ หรือทำการทดลองการทำงานของระบบ จำเป็นจะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการทำงาน และจุดปฏิบัติงานของตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตเสียก่อน

5.4.1 เงื่อนไขขอบเขตการทำงานของตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว

การกำหนดขอบเขตการทำงานและจุดปฏิบัติงานของตัวควบคุมเซอร์โวสำหรับการควบคุมระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กนั้น โดยให้อินพุตมีลักษณะขั้นบันได ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงระยะกระจัดให้มีขนาดลดลง 0.24 มิลลิเมตร ทุก ๆ 4 วินาที และผลการตอบสนองของตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว แสดงดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 แสดงผลการทำงานของตัวควบคุมเซอร์โวเพื่อใช้กำหนดขอบเขตการทำงาน

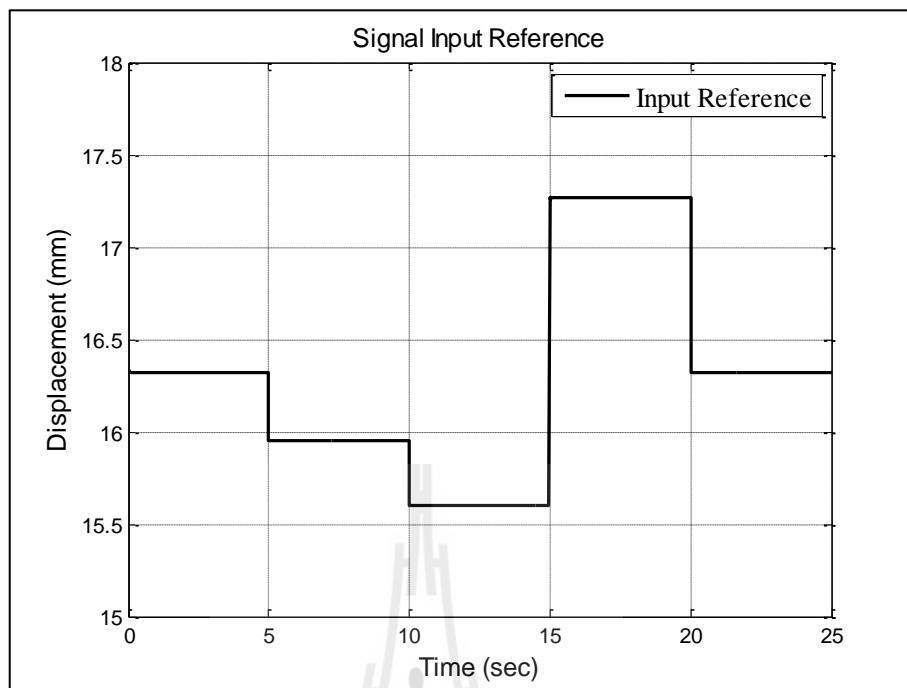


รูปที่ 5.17 แสดงขอบเขตการทำงาน และจุดปฏิบัติงานของตัวควบคุมเซอร์โว

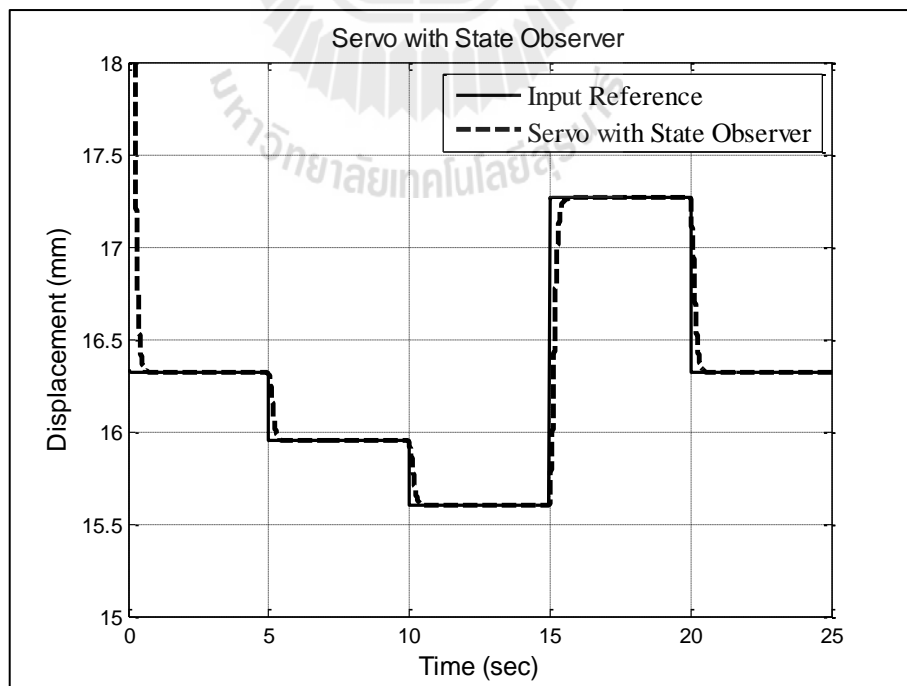
จากรูปที่ 5.16 แสดงผลการทำงานของตัวควบคุมเซอร์โว ซึ่งมีลักษณะของการตอบสนองทางพลวัตต่ออินพุตแบบขั้นบันได จากผลการตอบสนองที่ได้ เราสามารถกำหนดขอบเขตการทำงานของตัวควบคุมที่ดีว่ามีช่วงการทำงานสูงสุด - ต่ำสุด และมีจุดปฏิบัติงาน แสดงดังรูปที่ 5.17 พบว่าช่วงการทำงานสูงสุด - ต่ำสุดที่ระบบสามารถประมาณให้เป็นเชิงเส้น และตัวควบคุมเซอร์โวสามารถทำงานได้อยู่ที่ 18 มิลลิเมตร และ 15.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีจุดปฏิบัติงานอยู่ที่ 16.6 มิลลิเมตร ดังนั้นสรุปได้ว่าตัวควบคุมเซอร์โวนั้นจะมีประสิทธิภาพการทำงานรอบจุดสมดุลอยู่ที่ 16.6 ± 1.4 มิลลิเมตร

5.4.2 การจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว

พิจารณาการทำงานของแบบจำลองระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว ด้วยการกำหนดสัญญาณอินพุตอ้างอิงให้แก่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพื่อทำการจำลองผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบต่อสัญญาณอินพุตอ้างอิง มีวิธีการดำเนินการจำลองสถานการณ์ของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะด้วยการกำหนดสัญญาณอินพุตอ้างอิงที่มีลักษณะสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุม โดยระยะกระจัดของสัญญาณอินพุตอ้างอิงมีขนาดตั้งแต่ 15.5 มิลลิเมตร ถึง 17.3 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 5.18 และมีผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะได้ผลการตอบสนองของระบบแสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.18 แสดงสัญญาณอินพุตอ้างอิงสำหรับการจำลองสถานการณ์และการทดลองระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โว

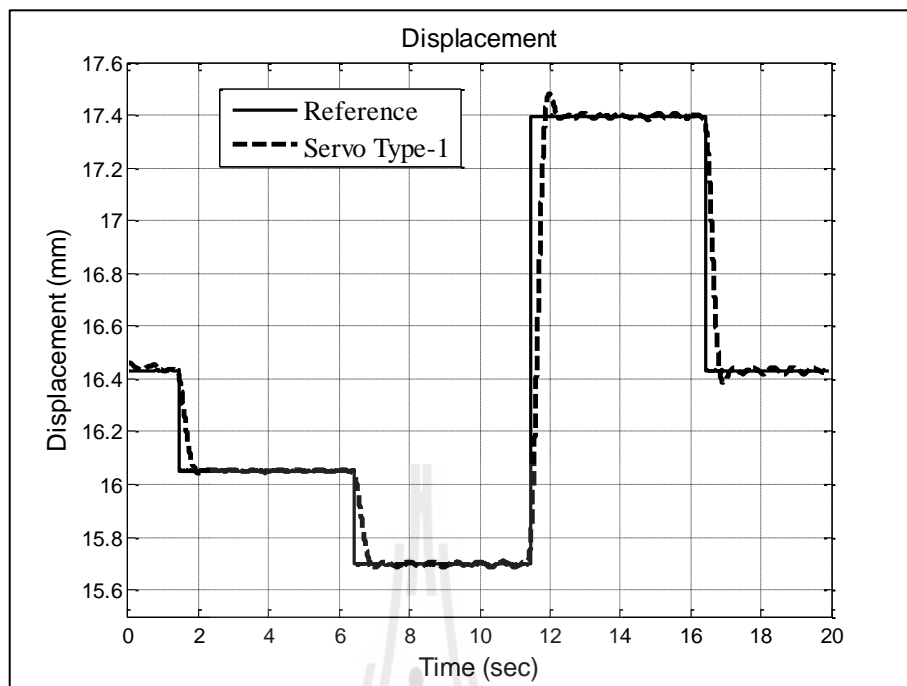


รูปที่ 5.19 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โว

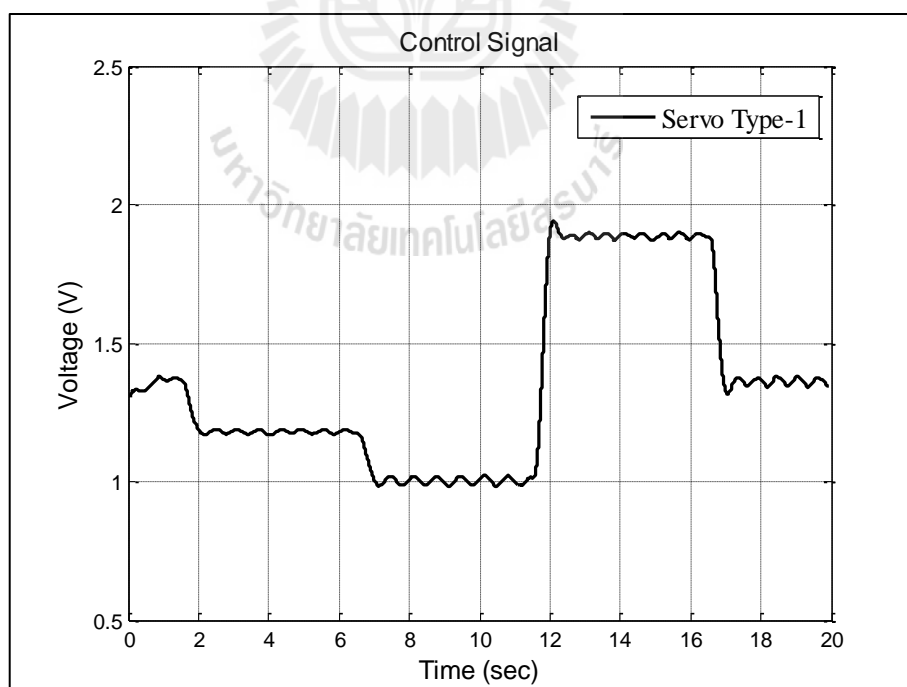
จากรูปที่ 5.19 แสดงผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของระบบด้วยตัวควบคุม เซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว พบว่าระบบมีผลการตอบสนองที่สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตอ้างอิง ระบบไม่มีค่าความผิดพลาดที่สถานะสมดุล ไม่มีค่าการพุ่งเกินสัญญาณ และมีระยะเวลาในการเข้าสู่สถานะสมดุล 1 วินาที โดยผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้นั้นเป็นที่น่าพอใจในด้านความสามารถในการควบคุมระบบให้มีผลการตอบสนองทางพลวัตต่อสัญญาณอินพุตอ้างอิง

5.4.3 การทดลองการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเพิ่มตัวอินทิเกรต 1 ตัว

ในการทดลองนี้เพื่อทำการศึกษาผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดเช่นเดียวกันกับการจำลองสถานการณ์ โดยไม่มีแรงรบกวนจากภายนอก เมื่อระบบรับค่าสัญญาณอินพุตอ้างอิงดังกล่าว อัลกอริทึมของตัวควบคุมซึ่งถูกโปรแกรมไว้ในคอมพิวเตอร์ปล่อยสัญญาณควบคุมในลักษณะของแรงดันไฟฟ้าผ่านทาง RAPCON Board ป้อนเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กดึงดูดลูกบอลแม่เหล็กให้ลอยตัวได้ระยะ กระจัดตามสัญญาณอินพุต และมีเซนเซอร์วัดการกระจัด ในรูปแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณป้อนกลับผ่าน RAPCON Board เข้าสู่อัลกอริทึมในคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลในการควบคุมต่อไป ซึ่งผลการตอบสนองของระบบที่มีตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะเป็นตัวควบคุมการทำงานมีลักษณะผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบที่มีต่อสัญญาณอินพุตอ้างอิง แสดงดังรูปที่ 5.20 และมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.21



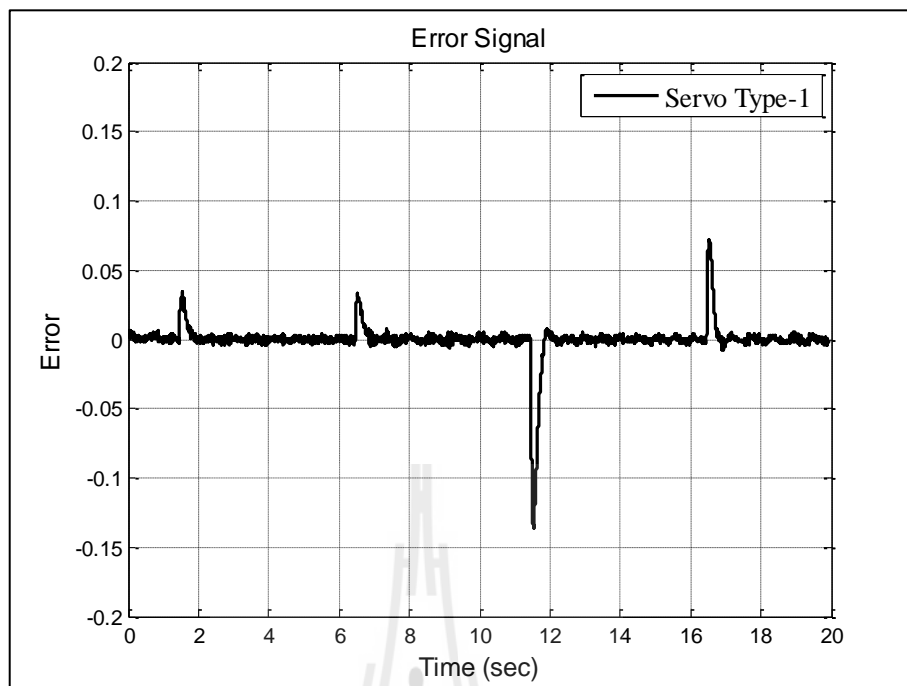
รูปที่ 5.20 แสดงผลการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โว



รูปที่ 5.21 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าควบคุมการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โว

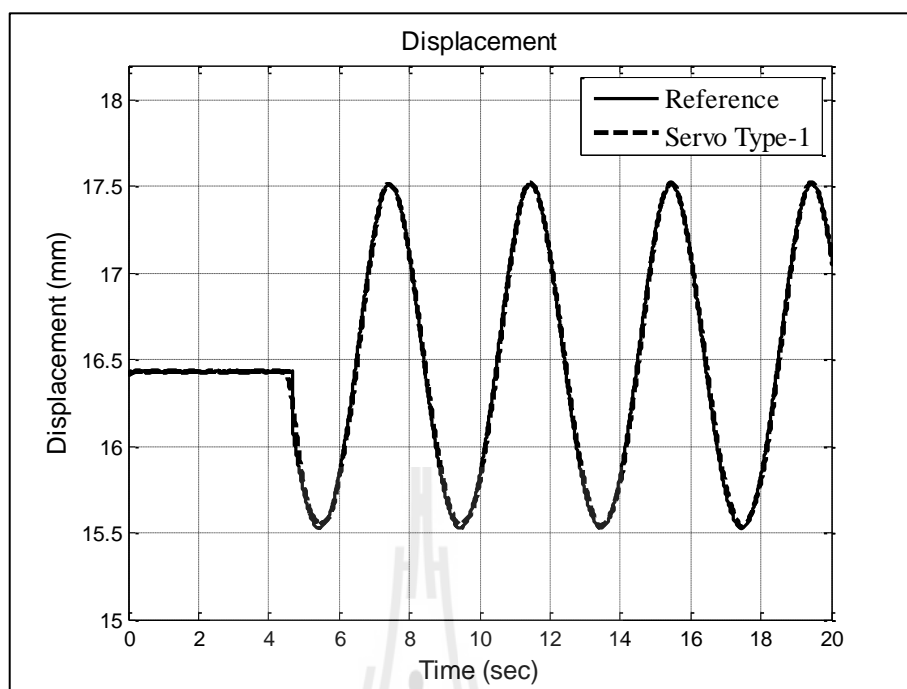
จากรูปที่ 5.20 แสดงผลการตอบสนองซึ่งเกิดจากการทำงานของตัวควบคุมเซอร์โว ด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกต ที่วัดได้จากเซนเซอร์ และสัญญาณอินพุตอ้างอิง สังเกตได้ว่าการตอบสนองทางพลวัตของระบบซึ่งมีความสอดคล้องกับสัญญาณอินพุตอ้างอิงของระบบ เมื่อตัวสังเกตสามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตของระบบเพื่อใช้ในการป้อนกลับให้กับตัวควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้ผลการทำงานของตัวสังเกตมีความสอดคล้องกับผลการทำงานของระบบจริง เช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงผลการตอบสนองส่งผลให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการควบคุมเมื่อระบบสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 0.6 วินาที มีค่าความผิดพลาดที่สภาวะสมดุลเป็นศูนย์ และมีค่าการพุ่งเกินของสัญญาณสูงสุดเพียง 0.49% ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระยะกระจัดที่มีขนาดค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาถึงการลอยตัวของลูกบอลแม่เหล็กพบว่าลูกบอลมีการแกว่งตัวซึ่งมีลักษณะเป็นฮาร์โมนิกเนื่องจากธรรมชาติของระบบที่ต้องมีลักษณะของสัญญาณควบคุมในลักษณะของการให้แรงแม่เหล็กที่เป็นฮาร์โมนิกสำหรับการรักษาระยะกระจัดของการลอยตัวของแม่เหล็กลอย ซึ่งมีแอมพลิจูดของการแกว่งตัวประมาณ 0.1 มิลลิเมตร และพิจารณารูปที่ 5.21 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าควบคุมการทำงานของระบบ เมื่อตำแหน่งของลูกบอลอยู่ต่ำ หรือมีระยะกระจัดมาก ส่งผลให้ตัวควบคุมทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการยกให้ลูกบอลลอยตัวได้ และในทางกลับกันหากตำแหน่งของลูกบอลอยู่ในระยะกระจัดต่ำกว่า ตัวควบคุมจะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าลดลง

จากผลการทำงานของระบบพบว่าผลการตอบสนองของระบบมีความผิดพลาดที่สภาวะสมดุลเป็นศูนย์ โดยลักษณะสัญญาณความผิดพลาดของผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 5.22 จะสังเกตได้ว่า ระบบมีสัญญาณความผิดพลาดในช่วงผลการตอบสนองชั่วคราว (Transient Response) เท่านั้น



รูปที่ 5.22 แสดงสัญญาณความผิดพลาดของการทำงานของระบบด้วยตัวควบคุมเซอร์โว

จากผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองการทำงานของตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะเพื่อใช้ในการควบคุมระบบเพื่อศึกษาผลการตอบสนองทางพลวัตที่มีต่อสัญญาณอินพุตอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นแบบขั้นบันไดพบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยทำการทดสอบเพิ่มเติมด้วยอินพุตที่มีลักษณะเป็นแบบฮาร์โมนิกโดยใช้สัญญาณอินพุตแบบ Sine Wave เช่นเดียวกันกับที่ใช้ทดสอบด้วยตัวควบคุมพีดี แต่มีแอมพลิจูดขนาด 1 มิลลิเมตร และมีความถี่ 1.6 rad/s เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุมที่มีต่ออินพุตชนิดอื่น ๆ นอกเหนือจากการทดลองกับอินพุตในลักษณะแบบขั้นบันได ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 แสดงผลการตอบสนองทางพลวัตต่อสัญญาณอินพุตแบบฮาร์โมนิก
ด้วยตัวควบคุมเซอร์โว

จากผลการทดสอบเพิ่มเติมดังรูปที่ 5.23 ซึ่งใช้สัญญาณอินพุตมีลักษณะเป็นแบบฮาร์โมนิก ผลการทดลองพบว่า ตัวควบคุมสามารถสั่งการให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับการทดสอบในลักษณะสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได

จากผลการทดสอบหาขอบเขตการทำงานของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ ในการควบคุมระบบ พบว่าระบบสามารถทำงานได้ที่ระยะการทำงานตั้งแต่ 15.2 - 18.0 มิลลิเมตร และมีจุดปฏิบัติงานอยู่ที่ 16.6 มิลลิเมตร ผลการทดลองของระบบให้ผลการตอบสนองที่มีแนวโน้มลักษณะเดียวกันกับการจำลองสถานการณ์ กล่าวคือ ผลการตอบสนองของระบบมีค่าความผิดพลาดที่สถานะสมดุลเป็นศูนย์ โดยสาเหตุที่ทำให้ผลการตอบสนองมีค่าความผิดพลาดที่สถานะสมดุล เป็นศูนย์ได้ เนื่องจากระบบถูกบดลดยตัวด้วยสนามแม่เหล็กมีลักษณะของระบบเป็น Type - 0 ตัวควบคุมที่เหมาะสมนั้นจึงควรเป็นตัวควบคุมที่ทำให้ Type ของระบบเปลี่ยนเป็น Type - 1 ตัวควบคุมเซอร์โวนั้นมีความสามารถในการเพิ่มชนิดให้กับระบบให้เป็น Type - 1 ได้ เนื่องจากตัวควบคุมเซอร์โวมี่ลักษณะของตัวอินทิกรัลซึ่งจะช่วยในการลดค่าความผิดพลาดที่สถานะสมดุล และทำให้ระบบเปลี่ยนเป็น Type - 1 อีกทั้งตัวควบคุมเซอร์โวมี่มีการใช้การป้อนกลับของตัวแปรสแตตเป็นการป้อนกลับในการควบคุมภายในก่อนที่จะมีการวัดระยะกระจัด

จากเซนเซอร์เพื่อใช้ในการป้องกันภัยนอก จึงส่งผลให้ตัวควบคุมเซอร์โวสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำ รวดเร็ว และมีการฟุ้งเกินของสัญญาณต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้ควบคุมระบบที่ต้องการผลการตอบสนองทางพลวัตของระบบที่มีต่อสัญญาณควบคุม

5.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุมพีดี และตัวควบคุมเซอร์โว ด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ

จากผลการทดลองการทำงานของตัวควบคุมทั้งสองที่มีลักษณะรูปแบบของตัวควบคุมแบบดั้งเดิม (ตัวควบคุมพีดี) และตัวควบคุมแบบสมัยใหม่ (ตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ) ซึ่งมีลักษณะของการออกแบบแตกต่างกัน โดยตัวควบคุมพีดีมีลักษณะของการออกแบบและวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ ส่วนตัวควบคุมเซอร์โวดำเนินการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะเป็นการออกแบบบนโดเมนเวลาซึ่งอาศัยการออกแบบโดยวิธีการปริภูมิสเตรตซึ่งมีข้อดีคือวิธีการออกแบบโดยปริภูมิสเตรตนี้เหมาะสำหรับระบบที่มีความยุ่งยาก เช่น สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสูง หรือต้องการประมาณค่าตัวแปรสเตรตต่าง ๆ แทนเครื่องมือวัด เมื่อทำการจำลองสถานการณ์การทำงาน และทดลองระบบจริงโดยกำหนดให้มีการตอบสนองทางพลวัตของระบบต่อสัญญาณอินพุตอ้างอิงแบบขั้นบันได รวมถึงการทดสอบเพิ่มเติมด้วยสัญญาณอินพุตแบบฮาร์โมนิก ได้ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองของตัวควบคุมพีดีแสดงดังรูปที่ 5.14, 5.12 และ 5.15 ตัวควบคุมเซอร์โวดำเนินการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตมีผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.19, 5.20 และ 5.23 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการควบคุมของตัวควบคุมที่ทำการออกแบบ ความสามารถในการติดตามสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมทั้งสองชนิด แสดงให้เห็นถึงความผิดพลาดในการควบคุมที่เกิดขึ้นของตัวควบคุมพีดี ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นอาจมีสาเหตุมาจากการเลือกใช้ตัวควบคุมที่ไม่เหมาะสมกับระบบ เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และไม่มีเสถียรภาพ และมี Type ของระบบเป็น Type - 0 ซึ่งทำให้มีผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตมีค่าความผิดพลาดที่สภาวะสมดุล ดังนั้นการเลือกใช้ใช้งานตัวควบคุมจึงมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการตอบสนองของระบบ และเนื่องจากตัวควบคุมเซอร์โวมียกข้อดีในเรื่องของความสามารถในการติดตามสัญญาณอินพุตอ้างอิง สืบเนื่องจากตัวควบคุมชนิดนี้มีส่วนประกอบของตัวอินทิเกรตที่ส่งผลทำให้ชนิดของระบบเพิ่มขึ้นและช่วยลดค่าความผิดพลาดที่สภาวะสมดุล ทำให้ระบบที่ใช้ตัวควบคุมชนิดนี้มีค่าความผิดพลาดที่สภาวะสมดุลเข้าสู่ศูนย์นั่นเอง ส่วนตัวควบคุมพีดีนั้นหากนำไปใช้กับระบบที่เหมาะสม เช่น ระบบที่มีชนิดของระบบเป็น Type - 1 จะทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น รวมถึงลักษณะของตัวควบคุมเซอร์โว นั้นมีสัญญาณ

ป้อนกลับของข้อมูลที่แตกต่างกันจากตัวควบคุมพีดี โดยตัวควบคุมเซอร์โวมีการป้อนกลับของสัญญาณตัวแปรสเตรตภายในระบบเพิ่มขึ้นมาด้วย ส่งผลทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น

5.6 สรุป

จากผลการจำลองสถานการณ์และผลทดลองการทำงานของระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก ผลการตอบสนองทางพลวัตต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดและฮาร์โมนิก ด้วยการดำเนินงานของตัวควบคุมสองแบบ คือ ตัวควบคุมพีดี และตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ เพื่อใช้ในการควบคุมระยะกระจัดของลูกบอลให้อยู่ในตำแหน่งอ้างอิงตามต้องการ ด้วยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าจ่ายเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้ได้แรงทางแม่เหล็กเพื่อดึงดูดหรือผลักลูกบอลให้ลอยตัว เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุมพีดี ที่นิยมใช้ควบคุมระบบแม่เหล็กลอย กับตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ จะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมทั้งสองแบบมีความสามารถในการควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพในการทำงาน แต่ตัวควบคุมทั้งสองแบบมีความแตกต่างในด้านประสิทธิภาพการทำงาน ดังนี้

- ตัวควบคุมพีดี
 - ตัวควบคุมพีดี มีขอบเขตการทำงานอยู่ที่ระยะ 16.35 ± 0.95 มิลลิเมตร
 - ผลการตอบสนองมีการพุ่งเกินของสัญญาณสูงสุด 11.69%
 - ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุล 1.5 วินาที
 - ผลการตอบสนองที่สภาวะสมดุลมีความผิดพลาดสูงสุด 10.06%
 - ไม่สามารถวัดค่าตัวแปรสเตรตของระบบได้
- ตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ
 - ตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ มีขอบเขตการทำงานอยู่ที่ระยะ 16.60 ± 1.40 มิลลิเมตร
 - ผลการตอบสนองมีการพุ่งเกินของสัญญาณสูงสุด 0.49%
 - ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุล 0.6 วินาที
 - ผลการตอบสนองที่สภาวะสมดุลมีความผิดพลาดเข้าสู่ศูนย์
 - ตัวสังเกตสถานะสามารถทำงานทดแทนเครื่องมือวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้งสอง สามารถสรุปได้ว่าตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของ

ระบบดีขึ้นกว่าการใช้ตัวควบคุมพีดี ซึ่งขอบเขตการทำงานที่เพิ่มขึ้นถึง 47.37% ผลการตอบสนองที่สถานะชั่วคราวและสถานะสมดุลที่ดีขึ้น อีกทั้งสามารถนำแนวคิดการออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพล์ร่วมกับตัวสังเกตสถานะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ควบคุมระบบชนิดอื่น ที่ต้องการผลการตอบสนองของระบบที่มีความแม่นยำ และมีประสิทธิภาพ



บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ สำหรับระบบควบคุมลูกบอลลอยตัว ซึ่งสามารถสรุปผลงานวิจัยและขั้นตอนการศึกษาได้ดังนี้

1. ได้ประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นของสนามแม่เหล็ก ผ่านการ Linearization ณ จุดสมดุลหรือจุดปฏิบัติงาน

2. การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม และเงื่อนไขตัวควบคุมแบบวงปิด เพื่อใช้ควบคุมการตอบสนองทางพลวัต จากความไม่มีเสถียรภาพในการควบคุมลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กได้

3. นำเสนอการจํารูปแบบสมการปริภูมิสถานะในการออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะและเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีดี โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ผ่าน RAPCON Board ในการควบคุมกระแสไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า) ให้แก่ขดลวดเพื่อสร้างแรงดึงดูดลูกบอลแม่เหล็กให้มีการตอบสนองได้ตามต้องการ

ผลการจำลองสถานการณ์และผลการทดลอง แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองของระบบที่ใช้งานตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะที่มีประสิทธิภาพการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีดี ผลการทดลองเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางพลวัตของตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลองของตัวควบคุมทั้ง 2 แบบ

การตอบสนองทางพลวัต	ตัวควบคุมพีดี	ตัวควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ
ขอบเขตการทำงาน (มิลลิเมตร)	15.40 – 17.30	15.20 – 18.00
การฟุ้งเกินของสัญญาณ (%)	11.69	0.49
ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล (วินาที)	1.5	0.6
ความผิดพลาดที่สภาวะสมดุล (%)	10.06	≈ 0

จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้งสอง จะเห็นว่าตัวควบคุม เซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบดีกว่า การใช้ตัวควบคุมพีดี ซึ่งขอบเขตการทำงานที่เพิ่มขึ้นถึง 47.37% ผลการตอบสนองที่สภาวะชั่วคราวและสภาวะสมดุลที่ดีขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. พฤติกรรมทางพลวัตของสนามแม่เหล็กโดยธรรมชาติ จะมีผลการตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้น จึงจำเป็นต้องทำ Linearization หรือประมาณให้เป็นเชิงเส้นช่วงทำงาน ช่วงหนึ่งรอบจุดปฏิบัติงานเท่านั้น เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุม อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมอีกด้วย

2. การควบคุมทั้งแบบพีดีและแบบเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ นั้น สามารถควบคุมลูกบอลให้ลอยตัวอยู่ในช่วงเชิงเส้นที่กำหนดเพียงเท่านั้น แต่หากต้องการควบคุมให้ช่วงการทำงานที่กว้างมากยิ่งขึ้น หรือมีความแม่นยำไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมที่ปรับตัวได้ (Adaptive control) หรือตัวควบคุมที่มีความคงทน (Robust control) เพื่อให้การตอบสนองมีความรวดเร็ว และคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังยืนยันความมีเสถียรภาพในการควบคุมอีกด้วย

3. การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีการปริภูมิสเตรตเหมาะสำหรับระบบที่มีสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสูง อีกทั้งยังสามารถพิจารณาพฤติกรรมของตัวแปรสเตรตที่กำหนดได้ รวมถึงการออกแบบตัวสังเกตในแต่ละสเตรตที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง แต่ถ้าหากระบบมีลักษณะสมการเชิงอนุพันธ์อันดับไม่สูง การออกแบบโดยวิธีใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอน หรือโดยวิธีการตอบสนองเชิงความถี่ก็จะสามารถทำได้โดยง่าย และไม่มี ความยุ่งยาก

4. การระบุเอกลักษณ์ของระบบหากไม่กำหนดขอบเขตให้กับตัวแปรที่ทำการประมาณค่าให้อยู่ในขอบเขตกับความเป็นไปได้ของตัวแปรนั้น ๆ จะทำให้โปรแกรมประมาณค่าตัวแปรได้ช้า และมีค่าความผิดพลาดของตัวแปรที่ได้ค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้ค่าที่ได้จะผิดไปความเป็นจริง แต่ถ้ากำหนดขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการประมาณค่าให้มีความใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงหรือความเป็นไปได้ของตัวแปรนั้น ๆ โปรแกรมจะคำนวณได้อย่างรวดเร็ว และค่าที่ได้จะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

5. การเลือกรูปแบบสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได มาใช้ในการทดลองเนื่องจาก การทดสอบด้วยสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เป็นสัญญาณขั้นพื้นฐานที่การทดลองทั่วไปนิยมใช้เพื่อทดสอบความสามารถในการติดตามสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุม หากมีการนำสัญญาณประเภท

อื่น เช่น สัญญาณแบบพื้นเลื้อย สัญญาณพัลส์ สัญญาณแบบสุ่ม หรือสัญญาณประเภทอื่น ๆ เพิ่มเติม สำหรับการทดลอง ก็จะเป็นการช่วยยืนยันถึงประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุมได้เป็นอย่างดี

6. การทดลองระบบลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการลอยตัว เป็นแม่เหล็กถาวรที่มีลักษณะทรงกลม หากพิจารณาถึงความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก หรือการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กหรือความแรงของสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า แรงที่กระทำเป็นผลมาจากกระแสที่ไหลผ่านสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากตามกฎของลอเรนซ์ที่ได้กล่าวไว้ ดังนั้นหากต้องการหาข้อสรุปว่าการควบคุมลูกบอลลอยตัวที่ได้นำเสนอ นั้น มีประสิทธิภาพในการควบคุม อาจจำเป็นต้องเปรียบเทียบกับแผ่นแม่เหล็กถาวรรูปทรงอื่น ๆ ร่วมด้วย

7. อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองเป็นอย่างมาก ซึ่งมีผลต่อแรงทางแม่เหล็กและสภาพความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น สภาพความเป็นแม่เหล็กและแรงแม่เหล็กจะลดลง ดังนั้นเงื่อนไขทางด้านอุณหภูมิจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทดลอง การทดลองทั้งหมด จึงควรทำการทดลองที่อุณหภูมิเดียวกัน



รายการอ้างอิง

- จิระพล ศรีเสริฐผล (2554). **Mechanical Vibrations**. เอกสารประกอบการเรียน
รายวิชา 425304 และ 525307, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 450 หน้า.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2548). **การควบคุมระบบพลศาสตร์**. (พิมพ์ครั้งที่ 2). จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย. 848 หน้า.
- สรวิชาติ สุจิตจร (2546). **การควบคุมอัตโนมัติ**. (พิมพ์ครั้งที่ 1). เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า.
456 หน้า.
- สัญญา แวนนิล (2550). **การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็ก**.
วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 61 หน้า.
- Barie, W., and Chiasson, J. (1996). Linear and Nonlinear State-Space Controllers for Magnetic
Levitation. **International Journal of Systems Science**, April 18; vol.27(11): pp.1153-1163.
- Cho, D., Kato, Y., and Spilman, D. (1993). Sliding Mode and Classical Controllers in Magnetic
Levitation Systems. **IEEE Conference**, February; vol.13: pp.42-48.
- EMLS Electromagnetic Levitation System. (2013). **Zeltom Educational and Industrial Control
Systems**, January 30; 9 pp.
- Hurley, W. G., and Wölfle, W. H. (1997). Electromagnetic Design of a Magnetic Suspension
System. **IEEE Transactions on Education**, May; vol.40(2): pp.124-130.
- Jayawant, B. V., and Rea, D. P. (1967). New Electromagnetic Suspension and Its Stabilisation.
Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, April; vol.115(4): 549-554.
- Lee, T. E., Su, J. P., and Yu, K. W. (2007). Implementation of the State Feedback Control Scheme
for a Magnetic Levitation System. **The 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics
and Applications**, May 23-25; pp.548-553
- Mohamed, A., Vestgaard, B., and Busch-Vishniac, I. (1995). Real-Time Implementation of a
Robust H_∞ Controller for a 2-DOF Magnetic Micro-Levitation Positioner. **Journal of
Dynamic Systems, Measurement and Control**, December 9; vol.117(4): pp.637-640.

- Munaro, C. J., Filho, M.R., Borges, R.M., de Silva Munareto, S., and da Costa, W. T. (2002). Modeling and Observer-Based Nonlinear Control of a Magnetic Levitation System. **Proceedings of the International Conference on Control Applications**, September; vol.1: pp.162-167.
- Ogata, K. (2002). **Modern Control Engineering. (4th Edition)**, USA, Prentice Hall PTR. 964 pp.
- Shu'aibu, D. S., Syed-Yusof, S. K., Faisal, N., and Adamu, S. S. (2010). Low Complex System For Levitating Ferromagnetic Materials. The 2010 **International Journal of Engineering Science and Technology**, vol.2(6): pp.1844-1859.
- Suster, P., and Jadlovská, A. (2012). Modeling and Control Design of Magnetic Levitation System. **The 10th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII)**, January; pp.295-299.
- Wong, T. H. (1986). Design of a Magnetic Levitation Control System. **IEEE Transactions on Education**, December; vol.E-29(4).
- Yang, J. H., Lee, Y. S., and Kwon, O. K. (2010). Development of Magnetic Force Modeling Equipment for Magnetic Levitation System. **The 2010 International Conference on Control, Automation and Systems**, October 27-30; pp.29-33.
- Yasser, M., Tanaka, H., and Mizumoto, M. (2010). A Method of Simple Adaptive Control Using Neural Networks with Offset Error Reduction for An SISO Magnetic Levitation System. **The 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)**, July 17-19; pp.191-196.



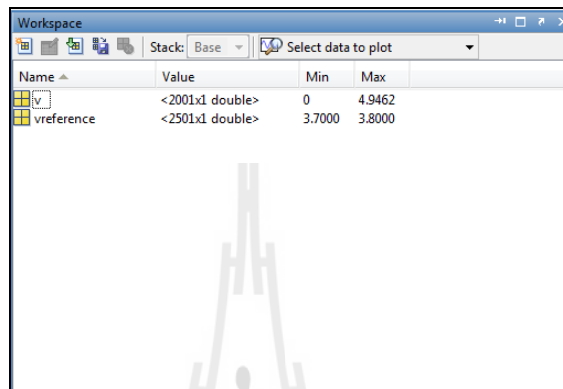
ภาคผนวก ก

การใช้โปรแกรมจินเนติกอัลกอริทึม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

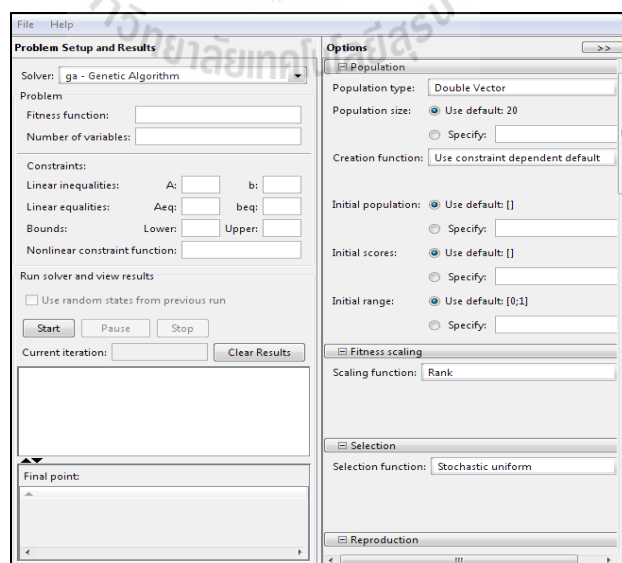
ก. การใช้โปรแกรมจิ้นเนติกอัลกอริทึม (GATOO) ใน MATLAB 2009a

1. นำเข้าข้อมูลการทดลองไว้ใน Work Space ของโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ ก.1 ซึ่งเป็นข้อมูลสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของชุดอุปกรณ์ลูกบอลลอยตัวด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า กำหนดค่า Sampling เท่ากับ 0.01 sec



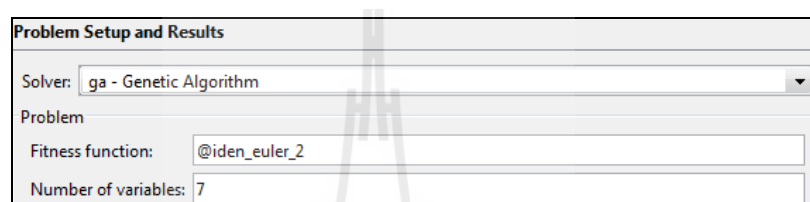
รูปที่ ก.1 ข้อมูลการทดลองใน Work Space

2. พิมพ์คำสั่ง “GATOO” ลงในหน้าต่าง “Command line” ของโปรแกรม MATLAB จะปรากฏหน้าต่างของ GATOO ดังแสดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 หน้าต่าง GATOO

3. เขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยให้อินพุตเป็นอาร์เรย์ของฟังก์ชัน เช่น $x(1), x(2), \dots, x(n)$ เป็นต้น โดยฟังก์ชันจะวิเทิร์นค่าความผิดพลาดกลับมาตรวจสอบเพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด โดยในที่นี้ใช้ค่าความผิดพลาดรากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error)
4. เพิ่มข้อมูล v และ $vreference$ ซึ่งเป็นข้อมูลอ้างอิง เก็บไว้ที่เดียวกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์
5. ใส่ค่าฟังก์ชันโดยใช้อักษร @ นำหน้าชื่อของฟังก์ชัน และใส่จำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการหา ดังแสดงในรูปที่ ก.3



Problem Setup and Results

Solver: ga - Genetic Algorithm

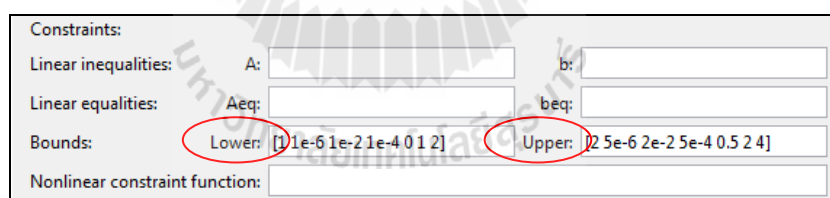
Problem

Fitness function: @iden_euler_2

Number of variables: 7

รูปที่ ก.3 การตั้งค่าวัตถุประสงค์และจำนวนตัวแปร

6. กำหนดค่าขอบเขตของตัวแปร ดังแสดงในรูปที่ ก.4



Constraints:

Linear inequalities: A: b:

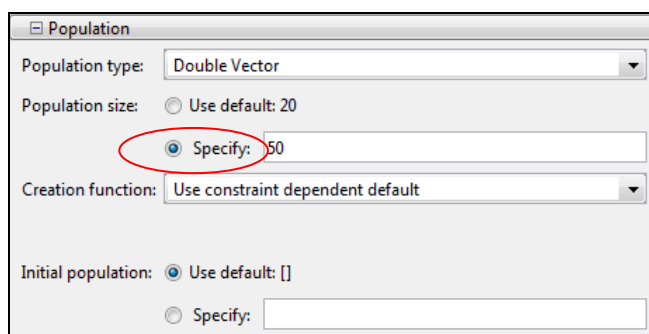
Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: [1 1e-6 1e-21e-4 0 1 2] Upper: [2 5e-6 2e-2 5e-4 0.5 2 4]

Nonlinear constraint function:

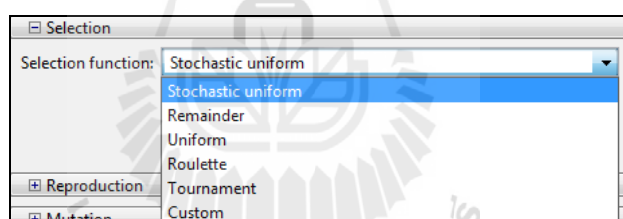
รูปที่ ก.4 การกำหนดค่าขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการค้นหา

7. การใส่จำนวนประชากร (Population Size) โดยไปที่ Option => Population โปรแกรมจะกำหนดค่าพื้นฐานจำนวนการสุ่มหาให้เท่ากับ 20 ถ้าต้องการปรับค่าทำได้โดยเลือก Population Size => Specify แล้วระบุจำนวน แสดงดังรูป ก.5



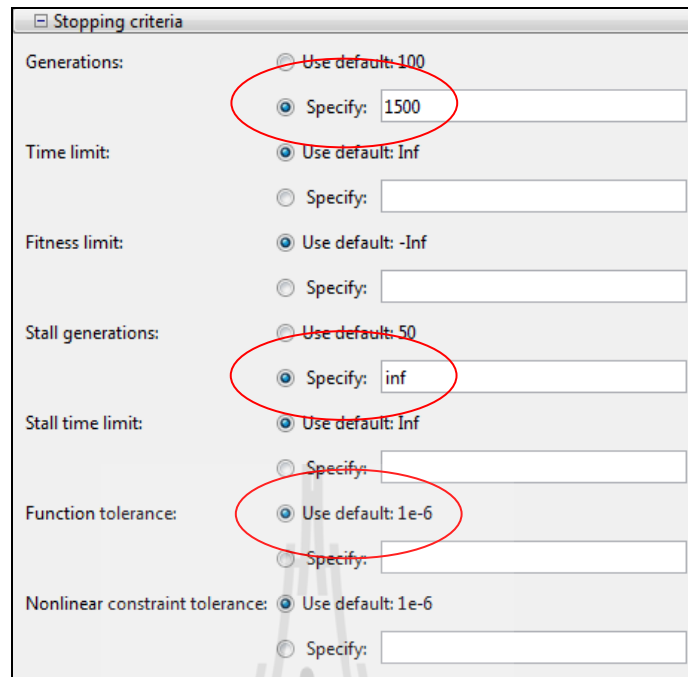
รูปที่ ก.5 การกำหนดชนิดและขนาดของจำนวนประชากร

8. การกำหนดวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection) โดยไปที่ Option => Selection มีวิธีการเลือกประชากรลูกหลานมีหลายวิธีเช่น วิธีการจัดอันดับ (Rank) วิธีเป็นรูปแบบ (Uniform) วิธีจัดการแข่งขัน (Tournament) วิธีของวงล้อรูเล็ต (Roulette) และวิธีการสุ่มเป็นครอบครัว (Stochastic universal) แสดงดังรูปที่ ก.6



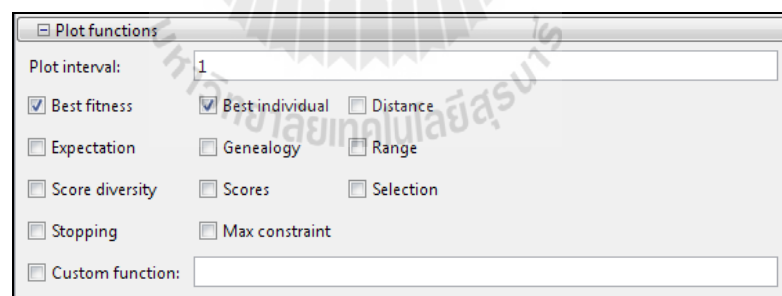
รูปที่ ก.6 แผนภาพแสดงการเลือก Selection

9. การกำหนดจำนวนรอบของการค้นหาและกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทำได้โดยไปที่ Option => Stopping criteria => Generations เพื่อกำหนดจำนวนรอบ กำหนดช่วงเวลาในการรัน โดย Option => Stopping criteria => Time limit กำหนดจำนวนรอบที่มีคำตอบเท่าเดิมแล้วหยุดทำงาน โดย Option => Stopping criteria => Stall Generations กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของคำตอบ โดย Option => Stopping criteria => Function tolerance แสดงดังรูปที่ ก.7



รูปที่ ก.7 การกำหนดเงื่อนไขการตัดสินใจในการหยุดการค้นหา

10. กำหนดหน้าต่างแสดงผลระหว่างการค้นหา ดังแสดงในรูปที่ ก.8



รูปที่ ก.8 การกำหนดหน้าต่างแสดงผลระหว่างการค้นหา

9. เริ่มทำการค้นหาโดยกดปุ่ม “Start”



ภาคผนวก ข

โปรแกรมการระบุเอกลักษณ์ของอุปกรณ์ลูกบอลแม่เหล็กลอยตัว
ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ข. โปรแกรมการระบุเอกลักษณ์ของอุปกรณ์ลูกบอลแม่เหล็กลอยตัว
ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

```
function f=idem_euler_2(X)

clc

%%%%%%%%%%%%%% Step Size %%%%%%%%%%%%%%%

h=0.01;

%%%%%%%%%%%%%%

%Control Feedback Gain

K1=-500.0005;

K2=-12.4652;

K3=0.0664;

Ki=24.7202;

%กำหนดค่าให้

%m คือ m (มวล)

%X(1) คือ R (resistance)

%X(2) คือ k (electromagnetic constant)

%X(3) คือ L (ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด)

%X(4) คือ c1 (ค่าคงที่Hall effect sensor)

%X(5) คือ c2 (ค่าคงที่Hall effect sensor)

%X(6) คือ ue (ค่าVoltage ที่ทำให้ลูกบอลลอย ณ สภาวะคงตัว)

%X(7) คือ ve (ค่าVoltage ตกคร่อม hall effect sensor ณ สภาวะคงตัว)

m=41.3*10^-3;

g=9.81;

x1(1)=0;

x2(1)=0;

x3(1)=0;

x4(1)=0;
```

```

sum_error=0;

%input
load vreference
%output
load v

for i=1:1:2001
    x1(i+1)=x1(i)+h*x2(i);

    x2(i+1)=x2(i)+h*((3*g*(g*m*X(1))^(1/3))/(X(2)*X(6))^(1/3))*x1(i)-
    (g*X(1)/X(6))*x3(i));

    x3(i+1)=x3(i)+h*((-X(1)/X(3))*x3(i)+(1/X(3))*(Ki*x4(i)-
    K1*x1(i)-K2*x2(i)-K3*x3(i)));

    y(i)=((-2*X(4)*g*m*X(1))/(X(2)*X(6))*x1(i)+X(5)*x3(i)+X(7));

    x4(i+1)=x4(i)+h*(vreference(i)-y(i));

sum_error=sum_error+(y(i)-v(i))^2;
end

f=sqrt(sum_error/2001);

return

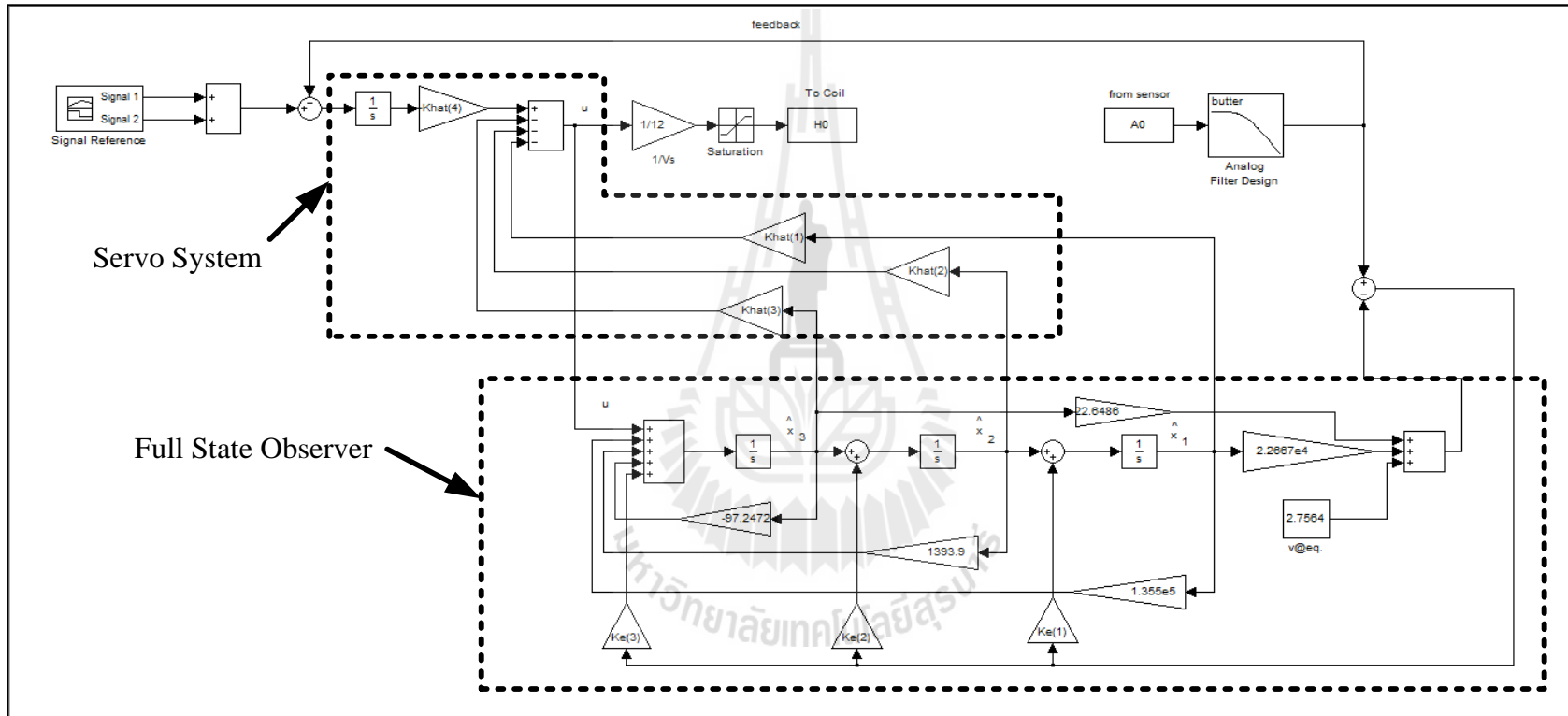
```

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, light gray watermark centered on the page. It features a stylized figure of a person standing within a large, upward-pointing triangle. Below the triangle is a circular emblem containing a gear and a book. The text "มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี" (Mahavithayalai Techno Suranaree) is written in a circular path around the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ค

โปรแกรมตัวควบคุมเซอร์โวด้วยการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ

ค. โปรแกรมควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ



รูปที่ ค.1 โปรแกรมควบคุมเซอร์โวด้วยวิธีการวางโพลร่วมกับตัวสังเกตสถานะ

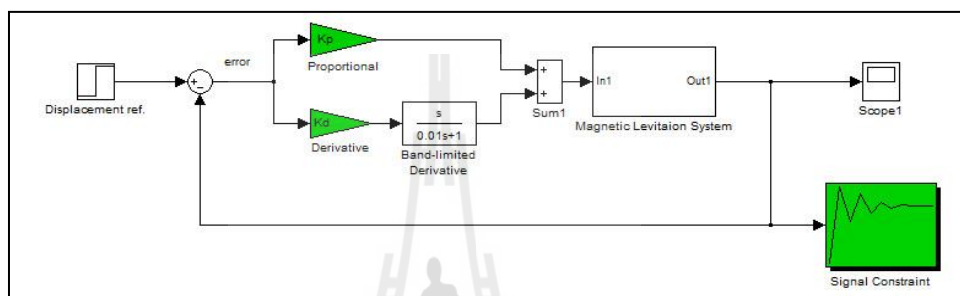


ภาคผนวก ง

การใช้งานโปรแกรม Simulink Response Optimization

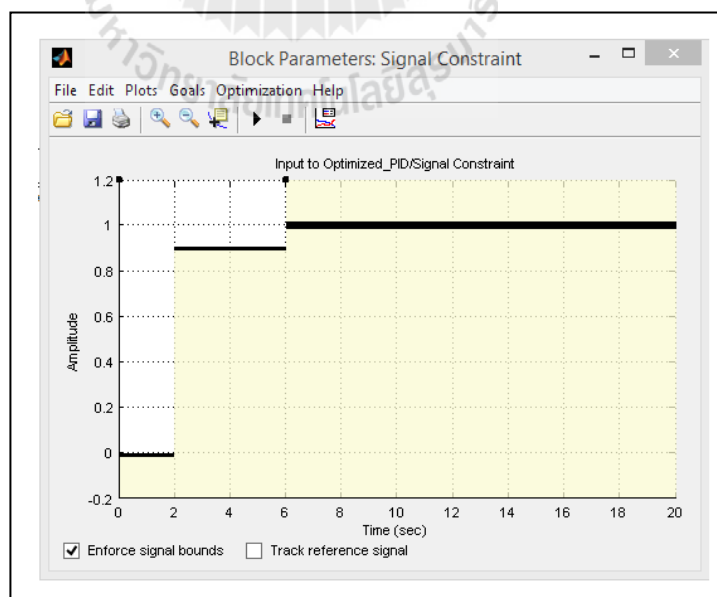
ง. การใช้โปรแกรม Simulation Response Optimization

1. สร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้ Simulink โดยกำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ต้องการให้โปรแกรมประมาณที่ทำให้ได้การตอบสนองที่ดีที่สุดตามขอบเขตที่กำหนด
2. ติดตั้งตัวบังคับสัญญาณ Signal Constraint ที่ตำแหน่งของสัญญาณที่ต้องการบังคับในแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยตัว Signal Constraint Block จะอยู่ใน Simulink Library ที่ชื่อว่า Simulink Response Optimization



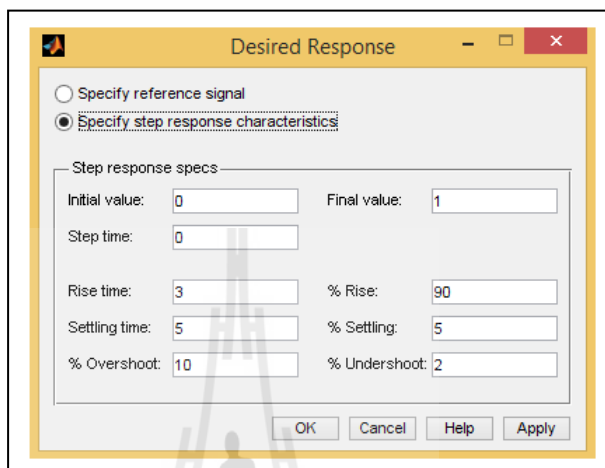
รูปที่ ง.1 แผนภาพแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink

3. Double - Click ที่ตัว Signal Constraint Block เพื่อแสดง Signal Constraint Window



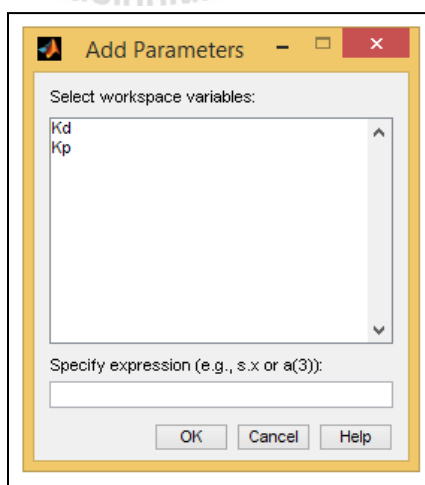
รูปที่ ง.2 แผนภาพแสดง Signal Constraint Window

4. กำหนดรูปแบบการตอบสนองของสัญญาณ Output ที่ต้องการ โดยสัญญาณจะถูกบังคับให้อยู่ในขอบเขต จากการเลือกที่เมนู Goals -> Desired Response... -> Specify Step Response Characteristics จากนั้นก็ใส่ค่าต่างๆได้ตามต้องการ



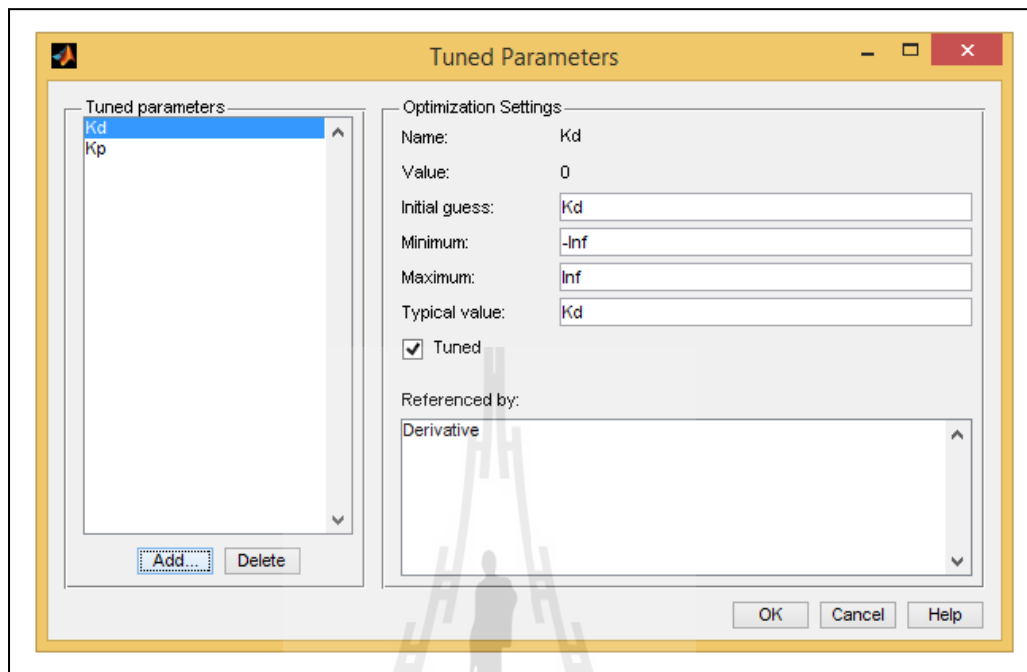
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดง Edit Desired Response

5. เปิดเมนู Tuned Parameters Dialog Box จากการเลือก Optimization -> Tuned Parameters ในหน้าจอของ Signal Constraint Window จากนั้น Click เลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการปรับแต่ง



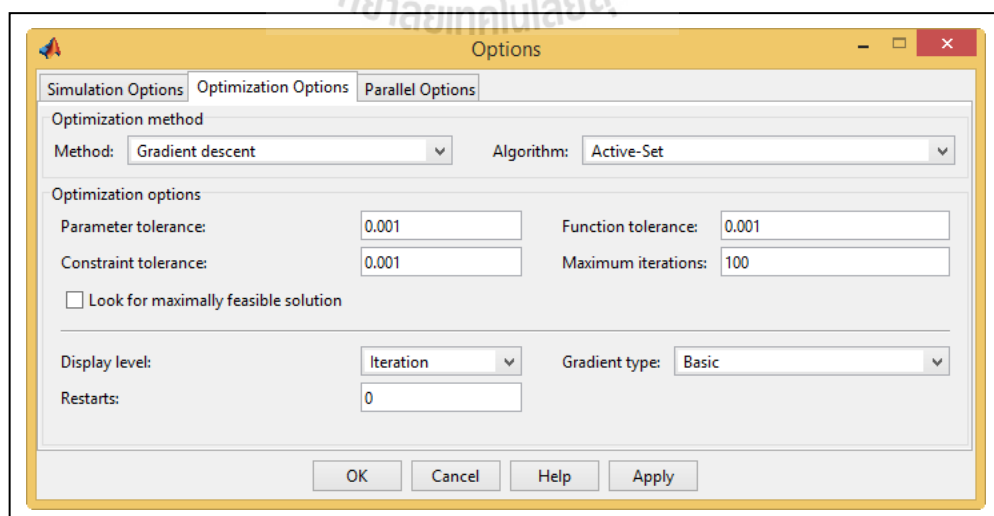
รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดง Add Parameters

6. กำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์แต่ละตัวด้วย รวมถึงขอบเขตที่ใช้ในการปรับค่า



รูปที่ ๓.5 แผนภาพแสดง Add Parameters

7. เลือก Optimization Option บน Signal Constraint เพื่อกำหนดวิธีการ Optimization



รูปที่ ๓.6 แผนภาพแสดง Option ของการ Optimization

8. Click ที่ Start Button ที่ Optimization Menu เพื่อเริ่มการปรับแต่งพารามิเตอร์ เพื่อให้ได้สัญญาณที่อยู่ในขอบเขตบังคับ จากนั้นระบบจะทำการค้นหาพารามิเตอร์ที่ต้องการ และแสดงความก้าวหน้าของการทำงานของโปรแกรม รวมถึงแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้ปรับแต่ง





ภาคผนวก จ

ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board การติดตั้ง Hardware และ Software

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จ.1 ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board

1. INTRODUCTION

The RAPCON platform offers a seamless interface between physical plants and Matlab/Simulink for implementation of hardware-in-the-loop real-time control systems. It is fully integrated into Matlab/Simulink and has a broad range of inputs and outputs. The platform is a complete and low-cost real-time control system development package for both educational and industrial applications.

The RAPCON platform consists of the real-time control board (hardware) and the associated Matlab interface (software). The hardware of the RAPCON platform has 8×12 bit analog inputs, 2×16 bit capture inputs, 2×16 bit encoder inputs, 1×8 bit digital input, 2×12 bit analog outputs, 2×16 bit frequency outputs, 2×16 bit pulse outputs and 1×8 bit digital output. The board also contains 2 H-bridges with 5 A capability to drive external heavy loads. Some inputs and outputs are multiplexed to simplify the hardware. The board is interfaced to the host computer that runs Matlab through a serial port. The software of the RAPCON platform is fully integrated into Matlab/Simulink/Real-Time Windows Target and comes with Simulink library blocks associated with each hardware input and output. The library contains Analog Input Block, Capture Input Block, Encoder Input Block, Digital Input Block, Analog Output Block, Frequency Output Block, Digital Output Block and Pulse Output Block. The platform achieves real-time operation with sampling rates up to 15.2 kHz.

The RAPCON platform has been developed to extend and optimize the real-time operation of Matlab, Simulink and Real-Time Windows Target. The developed platform is uniquely integrated into Matlab to achieve real-time operation in Matlab under Windows. The salient features of the RAPCON platform make it ideal for implementation of hardware-in-the-loop real-time control systems in both educational and industrial applications.

1.1. Specifications

- Power supply: 6 – 15 V, minimum 0.15 A, regulated
- Interface: 460800 baud, 8 bit data, no parity, 1 stop bit
- Analog inputs: A0–A7, 0 – 5 V analog, 12 bit resolution
- Capture inputs: C0–C1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Digital inputs: D0_d0–D0_d7, 0 – 5 V digital, 8 lines
- Encoder inputs: E0–E1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Frequency outputs: F0–F1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution

- Analog outputs: B0–B1, 0 – 5 V analog, 12 bit resolution
- Digital outputs: G0_g0–G0_g7, 0 – 5 V digital, 8 lines
- Pulse outputs: H0–H1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Filtered pulse outputs: L0–L1, 0 – 5 V analog
- H-bridge outputs: P0–P1, 0–(supply voltage) V digital, 5 A
- Voltage regulator output: VDD, 5 V, 0.25 A, regulated power supply
- Ground: GND, 0 V
- Sampling rate: up to 15.2 kHz

1.2. Requirements

- PC with Windows XP or later and an expansion slot for a serial card
- Serial crossover (null modem) cable
- Matlab R2007b or later with Simulink, Real-Time Workshop and Real-Time Windows Target
- RAPCON hardware (real-time control board) 1.5 or later
- RAPCON software 1.5 or later
- Power supply (regulated, 6 – 15 V and at least 0.15 A without any load)

1.3. Absolute Maximum Ratings

- Power supply voltage: minimum 3 V, maximum 16 V
- Each analog, digital, capture and encoder input: minimum –0.3 V, maximum +5.3 V
- Each analog, digital, frequency and pulse output: minimum –25 mA, maximum +25 mA
- Each filtered pulse output: minimum –25 mA, maximum +25 mA
- Each H-bridge output: minimum –5 A, maximum +5 A
- Total current from/into all inputs and outputs (except power supply, voltage regulator and H-bridges): minimum –200 mA, maximum +200 mA
- Voltage regulator output: maximum 0.5 A (total)
- Operating ambient temperature: minimum 10 °C, maximum 50 °C

2. HARDWARE

The real-time control board is based on a dsPIC30F2012 digital signal controller. It has a total number of 8×16 bit inputs and 8×16 bit outputs capability. The inputs and outputs can be selected among the inputs and outputs listed above. The board is interfaced to the main computer that runs Matlab through a serial port. Two pulse-width modulation driven H-bridges with 5 A drive capability are included on the board to drive external actuators or loads. The functional block diagram of the board is shown in Figure 1, where A0–A7 are the analog inputs, B0–B1 are the analog outputs, C0–C1 are the capture inputs, D0_d0–D0_d7 are the digital inputs, E0–E1 are the encoder inputs, F0–F1 are the frequency outputs, G0_g0–G0_g7 are the digital outputs and H0–H1 are the pulse outputs; ADC represents the analog-to-digital converter, DAC represents the digital-to-analog converter, ICM represents the input-capture module, OCM represents the output-compare module, DIP represents the digital-input port, DOP represents the digital-output port, QEM represents the quadrature-encoder module and PWM represents the pulse-width modulator; FLs are the lowpass filters with outputs L0–L1 and HBs are the H-bridges with outputs P0–P1; and μC is the central microcontroller, UART is the universal-asynchronous-receiver-transmitter unit and PC is the host computer.

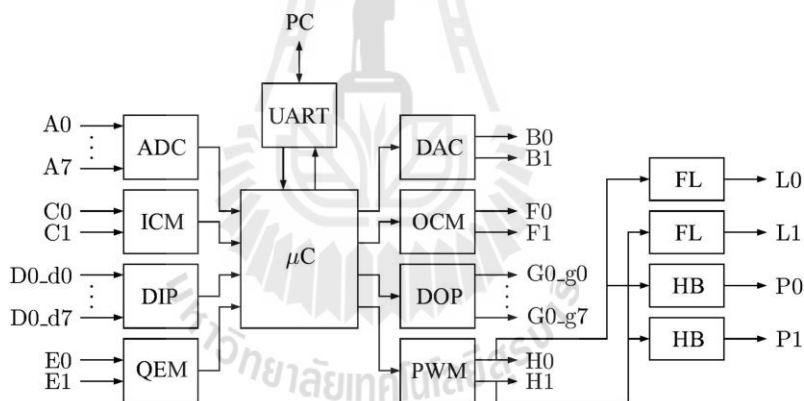


Figure 1. Functional block diagram of the board.

The layout of the board is shown in Figure 2. The inputs and outputs are connected to the board through standard pin header type connectors. The pins of all connectors are clearly indicated on the board for convenience. Access to the on-board 5 V, 0.25 A voltage regulator output is also provided for external light power supply requirements.

จ.2 การติดตั้ง Hardware กับโปรแกรม

1. ติดตั้งโปรแกรม MATLAB 2009a กับ Windows 7 32 Bit
2. ติดตั้ง Driver ของ PCI Serial Card ด้วยการเชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable
3. ติดตั้ง Real - Time Workshop และ Real - Time Windows Target
4. ติดตั้งโปรแกรมเพื่อใช้งานอุปกรณ์ RAPCON ด้วยไฟล์ rapcon2009a.exe ซึ่งในที่นี่

ใช้ MATLAB เวอร์ชัน 2009a สำหรับ Windows 7 32 Bit และจะมีไฟล์ rtwt_2009b_win7_fix.zip สำหรับการแก้ไข BUG สำหรับ Windows 7 มาด้วย ซึ่งการติดตั้ง ต้องทำทีละขั้นตอน ด้วยวิธีการดังนี้

5. เข้าไปหาไฟล์ที่ชื่อว่า rtwin_main.c ภายในคอมพิวเตอร์ เช่น

“C:\Program Files\MATLAB\R2009a\toolbox\rtw\targets\rtwin\src” แล้วเปลี่ยนชื่อไฟล์ rtwin_main.c เป็น rtwin_main.org และ copy ไฟล์ rtwin_main.c ในโฟลเดอร์ติดตั้งของ Rapcon มาใส่ไว้ใน Directory นี้

6. เข้าไปที่ Control Panel -> Device Manager เพื่อทำการเปลี่ยน Base Address และตรวจสอบ Comport Number ของ Serial Port หลังจากนั้นดูที่ Base Address ตัวแรกความี I/O Range เท่าไร เช่น I/O Range EC80 - EC87, Base Address คือ EC80 ในเลขฐาน 16 ซึ่งมีค่าเท่ากับเลขฐานสองคือ 60544 แล้วเข้าโปรแกรม MATLAB ไปในโฟลเดอร์ไฟล์ติดตั้งของ Rapcon เปิดไฟล์ชื่อ rtwinpi.tlc และ rtwinpo.tlc แล้วทำการแก้ไขใน m.file ดังนี้

```
if DrvAddress == 5
    assign ::com = 1016
endif
```

สำหรับ DrvAddress คือ Comport Number และ assign ::com คือเลขฐานสองของ I/O Range ที่อ่านมาจาก Device Manager ดังที่กล่าวมาในข้างต้น

7. สำหรับ Windows 7 Real-Time Windows Target จะถูกป้องกันไว้ดังนั้นจะต้อง copy ไฟล์ rtwtkml.sys ใน rtwt_2009b_win7_fix.zip ที่โหลดมา ไปไว้ที่

“C:\Program Files\MATLAB\R2009b\toolbox\rtw\targets\rtwin\kernel\win32”

8. พิมพ์ “rtwintgt -install” ใน Command Window ของโปรแกรม MATLAB เพื่อติดตั้ง RTWT Kernel เป็นอันเสร็จสมบูรณ์



ภาคผนวก ฉ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Servo System using Pole-Placement with State Observer for Magnetic Levitation System

Aunsiri T.¹, Numanoy N.², Hemsuwan W.³ and Srisertpol J.⁴

System & Control Engineering Laboratory,
School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000
E-mail: fool soul@live.com¹, nitisak@sut.ac.th²,
withun@sut.ac.th³, jiraphon@sut.ac.th⁴

Abstract. The electromagnetic levitation system is nonlinear system. The force applied by the electromagnet on the levitating magnet can be approximated as nonlinear model. The conventional controller with linearization of nonlinear systems design is presented not high control performance enough. This paper is demonstrated design of servo system using pole-placement with state observer for the magnetic levitation system from the equilibrium point. In additions, these closed-loop poles correspond to the desired closed-loop poles in the pole-placement approach and state observer estimate unmeasurable state variables. Finally, the simulation and experimental results can be shown effective control objective.

Keywords: Servo system, Observer, Magnetic levitation ball

1 Introduction

Magnetic levitation techniques have been widely used in various fields, such as high-speed trains, wind tunnel levitation for eliminating mechanical friction, magnetic bearings, decreasing maintainable cost and achieving high-precision positioning. However, it is difficult to build an accurate mathematical model for the magnetic levitation system. Because of the magnetic levitation systems are unstable and nonlinear dynamical systems.

In recent years, a lot of works have been reported in the literature for controlling magnetic levitation systems. The feedback linearization technique has been used to design controller for magnetic levitation system [3, 6]. The input-output, input state, and exact linearization techniques have been used to develop nonlinear controllers [1-2]. [7] Using Pole-Placement, Lead Compensator and PID Controller. The mathematical modeling and linearization, system design and control and observation using linear state feedback in the equilibrium point [4].

This paper is presented as follows. A mathematical model of the magnetic levitation system is shown in the part two. The third part demonstrates a design of servo system using pole-placement with state observer. The fourth part contains experi-

mental and simulation results. The magnetic levitation system with the proposed control algorithm is implemented.

2 Mathematical Discription

The motion of the permanent magnet ball in the magnetic field is expressed as

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -F(u, y) + mg \quad (1)$$

Where y is the vertical position of the levitating magnetic measured from the bottom of electromagnet, m is mass of the permanent magnet ball, g is the acceleration due to gravity, and $F(u, y) = k i / y^3$ is the force on the levitating magnet generated by the electromagnetic, k is a constant that depends on the geometry of the electromagnetic strength. Moreover, if follows from the Kirchhoff's voltage law and the voltage across the hall-effect sensor induced by the levitating magnet and the electromagnet, which are a function of constants that depend on the hall-effect sensor c_0 , c_1 and c_2 respectively, can be approximated as (2)

$$u = Ri + L \frac{di}{dt}, v = c_0 + c_1 \frac{1}{y^2} + c_2 i \quad (2)$$

Where R , L are the resistance and inductance of the coil, i is the current through the electromagnetic. Letting $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [y \ \dot{y} \ i]^T$ are the state of the system, z is the controller output, v is the measured output and u is the control input, can be written as

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = g - k \frac{i}{m x_1^3}, \dot{x}_3 = -\frac{R}{L} x_3 + \frac{1}{L} u \text{ and } z = x_1 \quad (3)$$

In modeling system, we see that nearly all systems are nonlinear, in that the differential equations governing the evolution of the system variable are nonlinear. However, most of theory we have developed has centered on linear systems. In this section we develop what is called a Jacobian linearization of a nonlinear system, about a specific operating point, called an equilibrium point.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= Ax_i + Bu_i \\ v &= Cx_i + v_e \end{aligned} \quad (4)$$

Where $x_i = [x_1 - x_{1e} \ x_2 - x_{2e} \ x_3 - x_{3e}]^T$ is linearization of state vector. $u_i = u - u_e$ is linearization of control input and $v_i = v - v_e$ is linearization of measured output. The matrices $A^{n \times n}$, $B^{n \times 1}$ and $C^{1 \times n}$ determine the relationships between the state, input and output variable, respectively. The equilibrium point of the system ($m\ddot{y} = 0$) is

$$x_{1e} = \left(\frac{ku_e}{gmR} \right)^{1/3}, x_{2e} = 0 \text{ and } x_{3e} = \frac{u_e}{R}$$

Where u_e is the required equilibrium electromagnet voltage, $x_{1e} = y_e$

3 Design of servo system using pole-placement with state observer

For brevity, we do not repeat the details of servo system and state observer theory in this paper. The magnetic levitation system is the type-0 plant, the basic principle of the design of a type-1 servo system is to insert an integrator in the feedforward path the error comparator and the plant, as show in Fig.1.

Using the observation [5], the observation of the system, can be represented as

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu_1 + K_{Ob}(v_1 - \hat{v}) \\ \hat{v} &= C\hat{x} \end{aligned} \quad (5)$$

$K_{Ob}^{n \times 1}$ is matrix gain of the observer, $\hat{x}^{n \times 1}$ is state of the observer variables. In order to design a feedback control servo type-1 with the following observation as

$$\begin{aligned} u_1 &= -K\hat{x} + k_I \xi \\ \dot{\xi} &= r - v_1 = r - Cx_1 \end{aligned} \quad (6)$$

ξ is signal at the output of integrals, r is input reference. Given order of new system $(n+1)$ vector error is $e(t) = [x_1(t) - x_1(\infty) \quad \xi(t) - \xi(\infty)]^T = (n+1)\text{vector}$

$$\dot{e} = \hat{A}e + \hat{B}u_e$$

Where, $\hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}$, $\hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$ with as $u_e = -\hat{K}e$, $\hat{K} = [K \quad -k_I]$

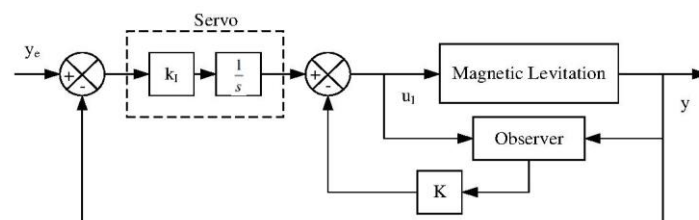


Fig. 1. Schematic of servo system using pole-placement with state observer

4 Experimental and simulation results

In this section, the comparison between simulations and experiments are provided to illustrate the effectiveness of the servo system for position control with PD controller [7]. Using the linearized model of the magnetic levitation system desired, design a controller to suspend the magnet 12.57 mm. ($v_e = 3.87$ Volt) away from the electromagnet and other parameter show that in Table I. Connect the electromagnet and hall-effect sensor to the RABCON Board [8].

Table 1. Parameter of the magnetic levitation system

Description	Parameters	Value (unit)
Mass of Ball	m	41.30×10^{-3} kg
Resistance	R	1.71 Ω
Inductive	L	15.10×10^{-3} H
Initial current	x_{3e}	1.05 A
Electromagnetic constant	k	3.10×10^{-6} kg m ⁵ /s ² /A

The eigenvalues of the A matrix are the values of s where $\det(sI - A) = 0$, It is found to have a pole of open loop at -113.245 , -31.3215 and 31.3215 which is positive resulting in system instability, When the parameters in Table I into (3). One of the poles in the right-half plane and matrix form dynamic linearization method in equilibrium point as

$$\dot{x}_l = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1.675 \times 10^5 & 1.4709 \times 10^3 & -113.245 \end{bmatrix} x_l + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_l$$

$$v = [3.5667 \times 10^4 \quad 0 \quad 20.5298] x_l + v_e$$

Considering the system $\text{Rank}(\varphi) = 3$ therefore, this system is observability. The design consists matrix gain of the observer $K_e = [K_{e1} \quad K_{e2} \quad K_{e3}]^T$ and finding that the gain of the observer. We will design a selection 10^{th} of natural frequency of the system, have pole of observer at $s_{1,2} = -219.1 \pm 44.7053i$ and $s_3 = -200$ solving matrix gain of the observation as, $|sI - A + K_e C| = 0$

$$K_e = [0.0068 \quad 1.3448 \quad 13.7985]$$

Next step to verify the ability control the system, It is a new system $\text{rank}(\beta) = 4$, so this system have the ability to control the design matrix gain of the controller $\hat{K} = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad -k_r]$. We will design a selection dominant poles are located at

$s_{1,2} = -43.82 \pm 44.7053i$. Place the third and fourth poles at $s_{3,4} = -15$ solving matrix gain of the controller is $|sI - \hat{A} + \hat{B}\hat{K}| = 0$

$$\hat{K} = [3.0385 \times 10^5 \quad 7.7363 \times 10^3 \quad 4.395 \quad 24.7209]$$

In the following, we will illustrate the Simulink and experimental results. Using the structures illustrated in Fig.1, we assume the measured signal is generated with a uniform reference signal with amplitude between 13.10 and 13.65 mm. at time range 0-14 sec. As assume the sampling time is 1/2000 sec. For comparison purpose, a display the response impulsive reference using servo controller based on observer, show in Fig. 2 and display of PD controller to control magnetic levitation ball system, show in Fig. 3(a), respectively. These results strongly suggest the servo controller is capable suppressing more the effect of the overshoot and reducing steady-state error. The command controller signal displayed in Fig. 3(b), the good output control response demonstrates its effectiveness of the servo system, show that in Table 2.

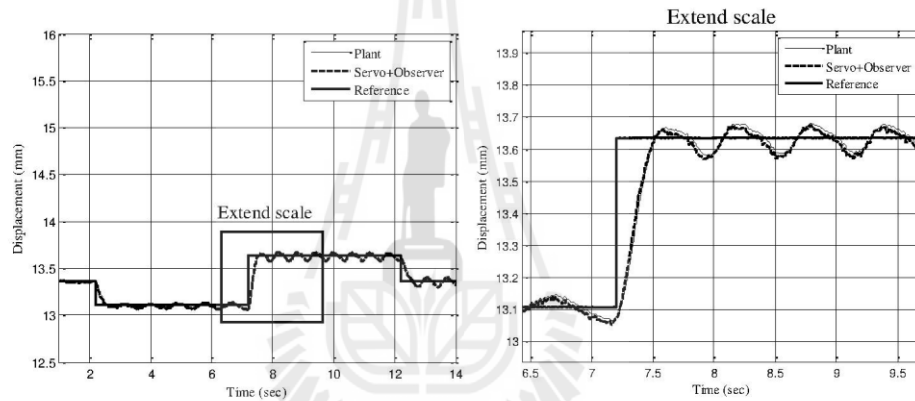


Fig. 2. Response of servo system with state observer

Table 2. Experimental result (%)

Description	PD Controller	Servo System with State Observer
Steady error	4.396	0.183
Over shoot	10.88	-
Allowable tolerance @steady state $\pm 1\%$	3.5	0.404

5 CONCLUSION

In this study, we have demonstrated that the proposed servo system with state observer is efficient when used in motion control in which the displacement, velocity and current control are usually needs as feedback signals from observer of the magnetic levitation ball system. By comparison with the conventional PD controller,

its simple structure means less effort to be made in the implementation of the controller. This is very interesting for a practical design of a feedback control system. Experimental result indicate the state feedback control scheme can results in a closed loop system with good tracking performance as well as good robust property against impulsive referent.

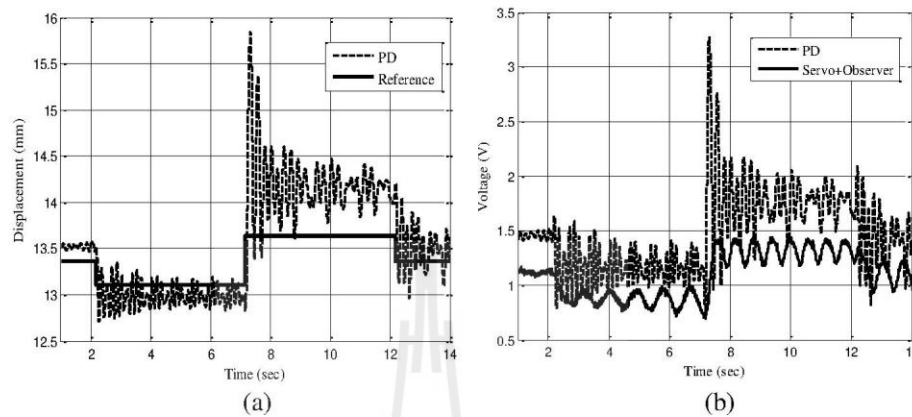


Fig. 3. Response of PD controller (a) and Output response (b)

Acknowledgment This research supported by Suranaree University of Technology (SUT), Thailand.

Reference

1. T. H. Wong, "Design of a Magnetic Levitation Control System," IEEE Transactions on Education, Vol. E-29, No. 4, November 1986.
2. A. Charara, J. De Miras, and B. Caron, "Nonlinear control of a magnetic levitation system without premagnetization," IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol. 4 No. 5, pp.513-523, 1996.
3. D.L. Trumper, M^o Olson, and P.K. Subrahmanyam, "Linearizing control of magnetic suspension system," IEEE Transactions on Control Systems Technoly, Vol. 5, No. 5, pp.427-438, 1997.
4. C. J. Munaro, M. R. Filho, R. M. Borges, S. Munareto and W. T. da Costa, "Modeling and Observer-Based Nonlinear Control of a Magnetic Levitation System," IEEE International Conference on Control Applications, Vol.1, pp.162-167, September 2002.
5. K. Ogata, "Modern Control Engineering," Fourth Edition, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, pp.826-951, 2002.
6. W. Baeie and J. Chiasson, "Linear and nonlinear state-space controllers for magnetic levitation," International Journal of System Systems Science, Vol. 27(6), No. 4, pp.1154-1163, 2010.
7. D.S. Shu'aibu, S. K. Syed-Yusof, N.Fisal and S. S. Adamu, "Low Complex System For Levitating Ferromagnetic Materials," International Journal Of Engineering Science And Technology. Vol. 2(6), pp.1844-1859, 2010.
8. User Manual, "EMLS: Electromagnetic Levitation System," 9pp, January 2013. [www.zeltom.com/documents/emls_um_14.pdf].

ประวัติผู้เขียน

นายธนรัชต์ อุ่นศิริ เกิดเมื่อวันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2532 ที่อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนรัตนศึกษา จังหวัดสุพรรณบุรี ระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนอู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (หลักสูตรวิศวกรรมอากาศยาน) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2553 จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา

ในขณะที่ศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิต ได้มีประสบการณ์เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 6 รายวิชาดังนี้

- (1) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3
- (2) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 3
- (3) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 4
- (4) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 3
- (5) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1
- (6) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 2 เป็นเวลา 3 ปี

ระหว่างศึกษาระดับมหาบัณฑิตได้นำเสนอผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 1 บทความ เรื่อง **“Servo System Using Pole - Placement with State Observer for Magnetic Levitation System”** ในการประชุม The 2014 International Conference on Advanced Mechanical and Industrial Engineering and Control System (MICS - 14) ซึ่งจัดขึ้นโดยหน่วยงาน Future Technology Research Association International and Korea Information Technology Convergence Society ในระหว่างวันที่ 28 - 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ณ จางเจียเจี๋ย (Zhangjiajie) มณฑลหูหนาน ประเทศจีน มีรายละเอียดดังแสดงภาคผนวก ฉ.

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Aunsiri, T., Numanoy, N., Hemsuwan, W., and Srisertpol, J. (2014) Servo System Using Pole-Placement with State Observer for Magnetic Levitation System. **The 2014 International Conference On Advanced Mechanical and Industrial Engineering and Control Systems (MICS-14)**, Future Information Technology, Lecture Notes in Electrical Engineering, Volume 309, 2014, pp. 921-926. May 28-31, 2014. Zhangjiajie, China.

