

การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างระบบควบคุมพีไอดี  
กับระบบควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ

The comparison between the performance of conventional  
PID control and Iterative Learning Control

นายชนรินทร์                      อินคำ                      รหัส 48380342  
นางสาววารภรณ์                      นาปรัง                      รหัส 48380362

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 1 / ส.ย. 2553
เลขทะเบียน..... 15008554
เลขเรียกหนังสือ..... 25.1550
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2551



## ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

**หัวข้อโครงการ** การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างระบบควบคุมพีไอดีกับระบบควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ

**ผู้ดำเนินโครงการ** นายชนเรรินทร์ อินคำ รหัส 48380342  
นางสาววราภรณ์ นานปรัง รหัส 48380362

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ดร.มูทิตา สงฆ์จันทร์

**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์  
ดร.ศุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

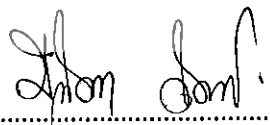
**ภาควิชา** วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

**ปีการศึกษา** 2551

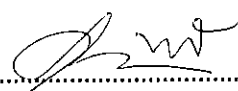
.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบรจรัม อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการการสอบโครงการวิศวกรรม

  
.....ที่ปรึกษา  
(ดร.มูทิตา สงฆ์จันทร์)

  
.....กรรมการ  
(ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์)

  
.....กรรมการ  
(ดร.ศุภวรรณ พลพิทักษ์ชัย)

<b>หัวข้อโครงการ</b>	การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างระบบควบคุมพีไอดีกับระบบควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ	
<b>ผู้ดำเนินโครงการ</b>	นายชเนรินทร์	อินคำ รหัส 48380342
	นางสาววราภรณ์	นาปรัง รหัส 48380362
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ดร.มุกิตา	สงฆ์จันทร์
<b>อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม</b>	ดร.นิพัทธ์	จันทร์มินทร์
	ดร.ศุภวรรณ	พลพิทักษ์ชัย
<b>สาขาวิชา</b>	วิศวกรรมไฟฟ้า	
<b>ภาควิชา</b>	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์	
<b>ปีการศึกษา</b>	2551	

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างระบบควบคุมพีไอดีและขั้นตอนวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ โดยพิจารณาเปรียบเทียบจากค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากแต่ละวิธีเมื่อระบบที่นำมาเป็นกรณีศึกษาเป็นระบบที่มีคุณลักษณะเหมือนกัน ทั้งสองกระบวนการนี้ประมวลผลและแสดงผลผ่านโปรแกรมแมทแล็บ จากผลที่ได้รับจะเห็นว่าค่าความผิดพลาดที่ได้จากการใช้วิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำมีค่าน้อยกว่าค่าความผิดพลาดที่ได้จากการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้วิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำนั้นจะใช้วิธีการนำข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลรอบที่ผ่านมา นำมาใช้เป็นข้อมูลในการประมวลผลในรอบถัดไปเสมือนเป็นการปรับแก้ และค่าความผิดพลาดที่ได้จะค่อยๆลดลงจนกระทั่งค่าความผิดพลาดลดลงจนถึงค่าน้อยที่สุด ซึ่งต่างจากการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดีที่จะทำการประมวลผลเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าจำนวนรอบในการประมวลผลในวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำยิ่งมากขึ้น ค่าความผิดพลาดที่ได้ก็จะยิ่งลดลง

**Project Title** The comparison between the performance of conventional PID control and Iterative Learning Control

**Name** Mr.Chanerin Inkham ID 48380342  
Ms.Waraporn Naprung ID 48380362

**Project Advisor** Mutita Songjun, Ph.D.

**Co-Project Advisor** Niphath Jantharamin, Ph.D.  
Supawan Polpitakchai, Ph.D.

**Major** Electrical Engineering

**Department** Electrical and Computer Engineering

**Academic Year** 2008

---

### ABSTRACT

A comparison between PID control system and Iterative Learning Control algorithm (ILC) is presented in this thesis. An error measured in norm from each method is particularly considered for the comparison if the system selected for the case study has the identical model. MATLAB is used for the calculation and the expression of all results. It is shown that the error in norm from the ILC algorithm is less than the error from the PID control system. It is because the ILC algorithm is the technique that uses the information from the previous iteration to improve the precision as the error will be gradually small when the number of iteration is increased. It is apparently different from the PID control system as its process operates only one trial and the error has never changed. Finally, it can be concluded that as the number of iteration increases, the error will be small.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่อง การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างระบบ ควบคุมพีไอดี (Proportional Integral Derivative, PID) กับขั้นตอนวิธีการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ (Iterative Learning Control, ILC) สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องด้วยความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาคือ ดร.มูทิดา สงฆ์จันทร์ ทางคณะผู้จัดทำใคร่ขอแสดงความขอบคุณ ที่ท่านอาจารย์ได้กรุณาให้คำปรึกษา ให้ความรู้และแนวทาง ในการทำโครงการ ซึ่งได้แนะแนวทางแก้ไขปัญหากับโครงการ ตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆที่เป็น ประโยชน์ต่อการทำงานครั้งนี้ให้ลุล่วงไปได้ และขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้สั่งสอนและให้ความรู้ จนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการ ทำโครงการครั้งนี้

นายชนรินทร์      อินคำ  
นางสาววราภรณ์    นาปรัง



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงานตลอด โครงการวิจัย.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งบประมาณของโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	4
2.1 ทฤษฎีระบบการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ (Iterative learning control, ILC).....	4
2.1.1 นิยามของวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ.....	6
2.1.2 วิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำแบบสองมิติ.....	7
2.1.3 คุณสมบัติการลู่เข้า.....	8
2.1.4 ค่ามาตรฐานของวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ.....	9
2.1.5 ตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ.....	9
2.2 ทฤษฎีระบบการควบคุมพีไอดี (Proportional Integral Derivative, PID).....	10
2.2.1 ระบบควบคุมแบบพี (P Controller).....	13
2.2.2 ระบบควบคุมแบบพีดี (PD Controller).....	14
2.2.3 ระบบควบคุมแบบพีไอ (PI Controller).....	14
2.2.4 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller).....	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.5 การปรับระดับการควบคุมของตัวควบคุมพีไอดี.....	15
บทที่ 3 วิเคราะห์รูปแบบการทดลอง.....	23
3.1 Parameter optimization iterative learning control.....	23
3.1.1 กรณีปัญหา.....	23
3.1.2 ขั้นตอนวิธีการ.....	25
3.2 การปรับระดับการควบคุมของตัวควบคุมพีไอดี.....	27
บทที่ 4 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างวิธีการของระบบการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบ ทำซ้ำ (Iterative learning control, ILC) และระบบการควบคุมพีไอดี (Proportional Integral Derivative, PID).....	31
4.1 ผลที่ได้จาก โปรแกรมเมทแลป โดยใช้วิธีการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ ...	32
4.1.1 การทดสอบ โดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง (first- order system).....	32
4.1.2 การทดสอบ โดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง (second – order system).....	37
4.1.3 การทดสอบ โดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง เมื่อค่า ถ่วงน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง.....	42
4.1.4 การทดสอบ โดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง เมื่อค่า ถ่วงน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง.....	43
4.2 ผลที่ได้จาก โปรแกรมเมทแลป โดยใช้ระบบควบคุมพีไอดี.....	45
4.3 สรุปผลการเปรียบเทียบที่ได้จาก โปรแกรมเมทแลป โดยใช้การควบคุมด้วยวิธีการ เรียนรู้แบบทำซ้ำ กับระบบควบคุมพีไอดี.....	51
บทที่ 5 สรุปผลและแนวทางในการพัฒนา.....	55
5.1 ผลการดำเนินงาน.....	55
5.1.1 ผลการเปรียบเทียบที่ได้จาก โปรแกรมเมทแลป โดยใช้การควบคุมด้วย วิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ กับระบบควบคุมพีไอดี.....	55

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ปัญหาที่พบขณะดำเนินโครงการ.....	56
5.3 แนวทางในการพัฒนา.....	56
เอกสารอ้างอิง.....	57
ภาคผนวก ก.....	58
ภาคผนวก ข.....	63
ประวัติผู้เขียนโครงการ.....	67





## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของระบบควบคุมพีไอดี.....	14
2.2 แสดงสูตรของ Ziegler และ Nichols ได้กำหนดค่า $K_p, T_i$ และ $T_d$ (วิธีที่ 1).....	18
2.3 แสดงสูตรของ Ziegler และ Nichols ได้กำหนดค่า $K_p, T_i$ และ $T_d$ (วิธีที่ 2).....	19



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงแนวคิดพื้นฐานการทำงานของการทำงานของการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ.....	5
2.2 แนวคิดพื้นฐานของระบบควบคุมพีไอดี.....	11
2.3 การต่อระบบควบคุมแบบปิด.....	15
2.4 แสดงรูปแบบของระบบควบคุมพีไอดี.....	16
2.5 เป้าหมายที่จะได้รับสูงสุด 25% ในขั้นตอนการตอบสนอง.....	16
2.6 แสดงการทดลองการตอบสนองของเครื่องจักรในหน่วยของการตั้งค่ารับเข้าไป.....	17
2.7 แสดงการปรับระดับของตัวควบคุมพีไอดี โดยใช้วิธีแรกของกฎ Ziegler - Nichols.....	17
2.8 แสดงสัดส่วนของการควบคุม.....	18
2.9 แสดงการกำหนดค่าในระบบของ Ziegler - Nichols.....	19
2.10 การควบคุมด้วยระบบพีไอดี ในมอเตอร์ของแกนกล.....	21
2.11 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบพีไอดี เชื่อมต่อกันทั้งระบบ.....	22
3.1 แสดงระบบควบคุมพีไอดี.....	28
3.2 แสดงแผนภาพของระบบควบคุมกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี.....	29
4.1 แสดงค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์ม.....	32
4.2 แสดงให้เห็นถึงอินพุต $u(t)$ เอาท์พุท $y(t)$ และค่าความผิดพลาด $e(t)$ .....	33
4.3 แสดงค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์ม.....	34
4.4 แสดงให้เห็นถึงอินพุต $u(t)$ เอาท์พุท $y(t)$ และค่าความผิดพลาด $e(t)$ .....	35
4.5 แสดงค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์ม.....	37
4.6 แสดงให้เห็นถึงอินพุต $u(t)$ เอาท์พุท $y(t)$ และค่าความผิดพลาด $e(t)$ .....	38
4.7 แสดงค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์ม.....	39
4.8 แสดงให้เห็นถึง อินพุต $u(t)$ เอาท์พุท $y(t)$ และค่าความผิดพลาด $e(t)$ .....	40
4.9 แสดงค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์ม เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเปลี่ยนแปลง ( $w$ ).....	42
4.10 แสดงค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์ม เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเปลี่ยนแปลง ( $w$ ).....	43
4.11 แสดงค่าเอาท์พุท อินพุท และค่าความผิดพลาดเทียบกับเวลา.....	45
4.12 แสดงค่าเอาท์พุท อินพุท และค่าความผิดพลาดเทียบกับเวลา.....	46
4.13 แสดงค่าเอาท์พุท อินพุท และค่าความผิดพลาดเทียบกับเวลา.....	48
4.14 แสดงค่าเอาท์พุท อินพุท และค่าความผิดพลาดเทียบกับเวลา.....	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 การเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำกับระบบควบคุมพีไอดี ที่ทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดย เปรียบเทียบค่าอ้างอิง $r = \sin(t)$ .....	51
4.16 การเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำกับระบบควบคุมพีไอดี ที่ทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดย เปรียบเทียบค่าอ้างอิง $r = e^{(t/20)} \sin(t)$ .....	52
4.17 การเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำกับระบบควบคุมพีไอดี ที่ทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดย เปรียบเทียบค่าอ้างอิง $r = \sin(t)$ .....	53
4.18 การเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำกับระบบควบคุมพีไอดี ที่ทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดย เปรียบเทียบค่าอ้างอิง $r = e^{(t/20)} \sin(t)$ .....	54

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากปัจจุบันนี้โลกได้พัฒนาเป็นยุคแห่งเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม มีโรงงานอุตสาหกรรมแห่งใหม่เกิดขึ้นมากมาย บ้างผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ บ้างผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ บ้างผลิตของอุปโภคบริโภค การใช้งานส่วนใหญ่จึงใช้เครื่องจักรกล ซึ่งควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ และโดยส่วนมากการใช้ระบบควบคุมพีไอดี (PID-control) ซึ่งจะเป็นที่นิยมเนื่องจากเป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้เพื่อควบคุมระบบใดๆ ก็ตามเพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตตรงตามที่ต้องการ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นระบบควบคุมพีไอดี ก็ยังมีข้อบกพร่องคือยังให้ค่าคลาดเคลื่อน (Error) ที่ส่งผลให้งานหรือผลิตภัณฑ์ออกมาไม่สมบูรณ์แบบและไม่มีคุณภาพตามที่ต้องการ ทำให้การลงทุนไม่คุ้มค่าหรือไม่ได้ประโยชน์สูงสุด

ดังนั้นปริญญาโทฉบับนี้จึงนำเสนอขั้นตอนวิธีที่เรียกว่า การควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ (Iterative Learning Control, ILC) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ค่าความผิดพลาดหรือข้อมูลใดๆ จากการคำนวณที่ผ่านมา นำมาเป็นตัวปรับแก้เพื่อให้ได้ค่าใหม่ที่มีความแม่นยำมากขึ้น และได้นำผลจากขั้นตอนวิธีมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากระบบควบคุมพีไอดี

ปริญญาโทฉบับนี้จะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ศึกษาผลลัพธ์จากระบบควบคุมพีไอดี และศึกษาผลลัพธ์จากขั้นตอนการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ และนำทั้งสองวิธีมาวิเคราะห์สมรรถนะที่ได้โดยใช้โปรแกรมเมทแล็บ (MATLAB)

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อทบทวนความรู้ในทฤษฎีเรื่องของระบบควบคุมพีไอดี และนำผลที่ได้มาประยุกต์ใช้กับระบบที่กำหนดให้
2. เพื่อศึกษาและนำความรู้ในทฤษฎีเรื่องการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ มาประยุกต์ใช้กับระบบที่กำหนดให้
3. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่างของสมรรถนะระหว่างระบบควบคุมแบบพีไอดีกับขั้นตอนการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ

### 1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

1. ศึกษาเรื่องระบบควบคุมพีไอดี โดยแสดงสมรรถนะที่ได้โดยใช้โปรแกรมเมทแลป
2. ศึกษาเรื่องระบบการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ และเขียน โปรแกรมแสดงการทำงานและสมรรถนะ โดยใช้โปรแกรมเมทแลป
3. เปรียบเทียบและวิเคราะห์สมรรถนะที่ได้จากทั้งสองระบบ โดยดูจากค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

รายละเอียด	ปี 2551						ปี 2552					
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	
1. รวบรวมข้อมูล	←————→											
2. ศึกษา PID Control และ Iterative learning Control				←————→								
3. ทดลองและเปรียบเทียบระหว่าง PID Control และ Iterative learning Control							←————→					
4. จัดทำรายงานและสรุปผล										←————→		

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการงาน

1. เข้าใจเรื่องระบบควบคุมพีไอดี
2. เข้าใจเรื่องของการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ
3. คาดว่าจะสามารถนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมได้
4. เพื่อเป็นประโยชน์กับผู้ประกอบการในโรงงานอุตสาหกรรม

## 1.6 งบประมาณ

1. ค่าเอกสารและเข้าเล่มโครงการ	800 บาท
2. ค่าหนังสือ	700 บาท
3. ค่าพิมพ์เอกสาร	<u>500</u> บาท
รวมเป็นเงิน (สองพันบาทถ้วน)	<u>2,000</u> บาท
หมายเหตุ : ถัวเฉลี่ยทุกรายการ	



## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

ปริญญานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการลดค่าของความผิดพลาดเนื่องจากการทำงานของเครื่องจักรกลต่างๆ ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม โดยที่การทำงานของเครื่องจักรกล ในบางครั้งอาจจะต้องมีการทำงานที่เป็นการทำซ้ำทำหลายรอบ ซึ่งจะเป็นรูปแบบที่แน่นอน หากพิจารณาผลของแนววิถีของระบบนั้นๆ (System output trajectory) เทียบกับแนววิถีที่ต้องการ (Desired trajectory) พบว่าจะเกิดวิถีคลาดเคลื่อน (Tracking error) ทูกรอบของการทำงานอยู่เสมอ ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้มาได้จากหลายปัจจัยได้แก่ ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากคุณลักษณะของระบบที่เป็นลักษณะของสมการเชิงอนุพันธ์ (หรือสมการผลต่าง) ซึ่งค่าผลลัพธ์ที่ได้มานั้นย่อมไม่เท่ากับค่าที่เราต้องการ ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นยังมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ประการต่อมาเราจะพบการรบกวนที่สามารถระบุค่าได้ (Deterministic disturbance) เกิดขึ้นเป็นประจำในทุกๆรอบของการทำงานยกตัวอย่างเช่น แรงบิดที่เกิดเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อตัวเครื่องจักรกล หรือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในข้อต่อของชิ้นส่วนของเครื่องจักร และประการสุดท้ายคือค่าของการรบกวนแบบสุ่ม (Random disturbance) รูปแบบของการควบคุมแบบทำซ้ำนั้นค่าของคำสั่งที่ถูกสั่งให้เครื่องจักรทำงานในรูปแบบของคาบซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา เป้าหมายของระบบนี้คือการกำจัดค่าของความคลาดเคลื่อนของระบบเท่าที่จะทำได้ โดยอาศัยเทคนิคของการนำเอาความผิดพลาดจากการทำงานครั้งที่ผ่านมาเพื่อปรับปรุงคำสั่งในการทำงานครั้งต่อไป

#### 2.1 ทฤษฎีระบบการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ (Iterative learning control, ILC) [1]

การควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำเป็นหัวข้อซึ่งค่อนข้างใหม่ในสาขาของการควบคุมที่ถูกใช้ในงานที่มีการปฏิบัติการซ้ำๆ ที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำสูง โครงการนี้มีเป้าหมายที่จะศึกษาวิธีการแบบใหม่เพื่อที่จะนำผลและความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับระบบจริงๆ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการติดตามวิถีที่ต้องการ การควบคุมด้วยการเรียนรู้แบบทำซ้ำเป็นวิธีการที่เรียบง่ายแต่ให้ประสิทธิผลสูงในการลดค่าผิดพลาด จึงควรพิจารณาถึงความสำคัญและประโยชน์ในแต่ละสาขาของวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และอุตสาหกรรมที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำสูง

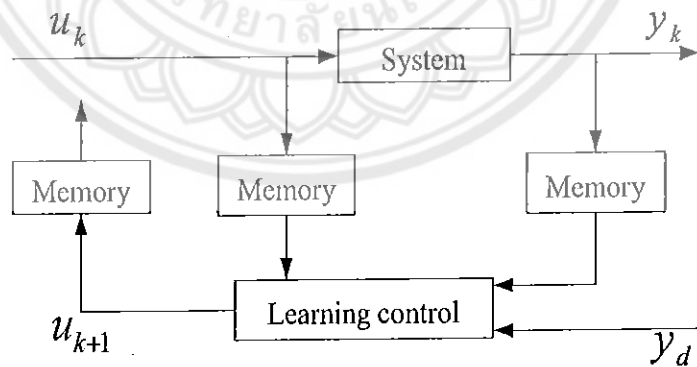
การควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ ของระบบควบคุมมีพื้นฐานความคิดมาจากการใช้การควบคุมแบบอินทิกรัลประยุกต์ในโดเมนการทำซ้ำ (Repetition domain) เพื่อที่จะปรับปรุงการทำงานของตัวเองอย่างอัตโนมัติเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในการทำงานที่ซ้ำเดิม การควบคุมด้วยการเรียนรู้พิจารณาการทำงานที่ต้องการการติดตามวิถีที่ต้องการทำซ้ำเดิมหลายๆรอบ และเมื่อแต่

ลรอบของคำสั่งสิ้นสุดลง ระบบจะเริ่มกลับมาทำงานใหม่ โดยเริ่มจากเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) เดิมซึ่งเป็นการควบคุมระบบที่มีช่วงคาบเวลาการทำงานจำกัด (finite time)

หลักการการทำงานของวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำเป็นการปรับค่าพารามิเตอร์ให้กับระบบควบคุมแทนที่จะปรับเปลี่ยนคำสั่งของระบบควบคุม การปรับค่าพารามิเตอร์ให้กับระบบควบคุมนั้นทำได้โดยใช้ค่าของความผิดพลาด จากการควบคุมในคาบการทำงานที่ผ่านมา มาปรับปรุงการทำงานในรอบการทำงานปัจจุบัน

วิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำนี้เป็นทฤษฎีที่คิดค้นโดยคุณอาริมโตะ (Arimoto) ซึ่งได้คิดค้นขึ้นในปี 1984 โดยที่เขาเป็นผู้คิดค้นและเสนอขั้นตอนการคำนวณ ก่อให้เกิดการทดลองใหม่ โดยใช้วิธีการควบคุมค่าอินพุตโดยการป้อนค่าๆหนึ่งในเทอมของอินพุตเป็นค่าเริ่มต้น วิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำนี้แม้จะเป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางแต่ก็ยังคงขาดการพัฒนา แต่เมื่อไม่นานมานี้ได้ตำราเกี่ยวกับวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ ซึ่งประกอบด้วยการสำรวจและวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้

แนวคิดพื้นฐานของการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ สามารถนำเสนอได้ดังรูปที่ 2.1 จากรูปสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อป้อนอินพุต  $u_k$  เข้าในระบบจะได้เอาต์พุต  $y_k$  ออกมา จากนั้นเอาต์พุต  $y_k$  ที่ได้จะถูกนำมาเก็บไว้ในหน่วยความจำ แล้วส่งต่อไปยังตัวควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้จะได้  $u_{k+1}$  ออกมาป้อนกลับเข้าสู่ระบบต่อไป โดยให้  $u_{k+1}$  เป็นอินพุตตัวใหม่ของระบบ รูปแบบของการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบซ้ำ นั้น คำสั่งจะถูกส่งออกไปในรูปแบบของคาบเวลาสำหรับเป้าหมายของระบบนี้คือการลดค่าความคลาดเคลื่อนของระบบโดยอาศัยเทคนิคของการนำเอาความผิดพลาดมาจากการทำงานครั้งที่ผ่านๆไปมาปรับปรุงคำสั่งในการทำงานครั้งต่อไป



รูปที่ 2.1 แสดงแนวคิดพื้นฐานการทำงานของระบบควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ

ถ้าผลของระบบเป็นไปตามที่แสดงตามวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ และสมมุติให้ค่าตัวแปรของระบบมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะเห็นว่าเอาต์พุตจะออกมาตามอินพุตที่ได้ป้อนเข้าไป เมื่อระบบเริ่มทำงาน จากเงื่อนไขโดยใช้ค่าอินพุต  $u_k(t)$  และเอาต์พุต  $y_k(t)$  และกำหนดค่าความ



ผิดพลาด  $e_k(t) = r(t) - y_k(t)$  ระบบจะคำนวณโดยการวนซ้ำไปเรื่อยๆ โดยอินพุต  $u_k(t)$  ที่ได้จากการคำนวณจะมีการเปลี่ยนแปลง จนกระทั่งทำให้ค่าความผิดพลาดค่อยๆ ลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น จนได้ค่าที่น่าพอใจมากที่สุด โดยกระบวนการวิธีได้มาจากการคำนวณตามสมการนี้คือ

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \beta e_k(t) \quad (2.1)$$

### 2.1.1 นิยามของวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ [2]

การออกแบบระบบควบคุมในวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำนี้จะใช้รูปแบบเฉพาะเจาะจง ถ้า  $u_k(t)$  คือค่าอินพุตที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้  $k \in N$  และ  $e_k(t) = r(t) - y_k(t)$  คือค่าที่ได้จากการติดตามผลของค่าความผิดพลาด (วิถีความคลาดเคลื่อน) ปัญหาของการออกแบบระบบควบคุมคือ ค่าที่สมมุติขึ้นของคำสั่งในการควบคุมระบบ (หรือการคำนวณ) ตัวอย่างสมการของค่าความสัมพันธ์

$$u_{k+1}(t) = f(e_{k+1}(\cdot), \dots, e_{k-s}(\cdot), u_k(\cdot), \dots, u_{k-r}(\cdot)) \quad (2.2)$$

คำสั่งในการควบคุม คือ ต้องการให้คุณสมบัติของ  $\lim_{k \rightarrow \infty} u_k = u^*$  ขณะที่ผลที่ตามมา  $\lim_{k \rightarrow \infty} e_k = 0$  ในแนวโครงสร้างที่เหมาะสม นอกจากนี้ค่าสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล ต้องอาศัยค่าเฉพาะจาก  $u_k(t)$  ไปยัง  $e_k(t)$  เท่านั้น โดยที่  $0 < s \leq t$

**หมายเหตุ** จากปัญหาในข้อกำหนด สมมุติว่าอินพุต  $u^*$  ให้มีวิถีติดตามที่สมบูรณ์ ถ้าไม่เป็นไปตามกรณีนี้ ปัญหานี้สามารถถูกปรับปรุงให้ได้ตามความต้องการในวิธีการคำนวณ โดยจะให้ค่าการดูเข้าเข้าหากันที่จุด  $u^*$  ที่ดีที่สุดในการแก้ไขปัญหาคือกำหนดให้

$$u^* = \operatorname{argmin}_{u \in \mu} \|r - Gu\|^2 \quad (2.3)$$

โดยที่  $u$  คือค่าอินพุตที่เป็นไปได้ในการตั้งค่าและ  $\|\cdot\|$  คือค่าที่เหมาะสมตามมาตรฐาน สมมุติให้ผลการติดตามสมบูรณ์แบบ ดังนั้น  $r = Gu^*$  และ  $u^*$  สามารถบรรลุผลได้ จากความเป็นไปได้ของค่าอ้างอิง และสถานะเริ่มต้น ในการคำนวณเข้าสู่ทฤษฎีของการเรียนรู้แบบทำซ้ำ จะต้องมีคุณสมบัติของการดูเข้าในหนึ่งรอบการวนซ้ำ พิจารณาวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำแบบใช้ค่าอินเวอร์ส

$$u_{k+1} = u_k + G_e^{-1} e_k \quad (2.4)$$

จากตัวอย่างการคำนวณ

$$e_1 = r - y_1 = r - Gu_1 = r - G[u_0 + G^{-1}e_0] = 0 \quad (2.5)$$

เมื่อ  $u_0, e_0$  คือตัวแปรอิสระ

### 2.1.2 วิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำแบบสองมิติ [2]

พิจารณาการคำนวณโดยทฤษฎีวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + [Ke_k](t) \quad (2.6)$$

ที่  $k$  คือจำนวนรอบการทำซ้ำ (มีการเพิ่มของเทอม  $Z_0$ ) จะได้

$$u_{k+1}(t) = [Gu_{k+1}](t) + Z_0(t) \quad (2.7)$$

ให้  $t \in [0, T]$  ในลำดับของการวิเคราะห์คุณสมบัติของการคู่เข้าในการคำนวณ มีความจำเป็นในการหาค่าการติดตามผลของค่าความผิดพลาด  $e_k(t) := r(t) - y_k(t)$  มีการพัฒนาฟังก์ชันของดัชนีการวนซ้ำค่า  $k$  จากสมการสามารถพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการคำนวณการควบคุมสมการที่ (2.8) จะได้สมการใหม่เป็น

$$y_{k+1}(t) = [Gu_{k+1}](t) + z_0(t) \quad (2.8)$$

$$\text{และให้ } [Gu_{k+1}](t) + z_0(t) = [Gu_k](t) + z_0(t) + [Gke_k](t) \quad (2.9)$$

ใช้กระบวนการใน (2.9) และกำหนดให้ผลการติดตามค่าความผิดพลาด  $e_k(t)$  จะสามารถเขียนสมการได้คือ

$$e_{k+1}(t) = [Le_k](t) \quad (2.10)$$

$$\text{โดยที่ } e_{k+1} = Le_k, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.11)$$

$$\text{หรือ } e_{k+1} = Le_k + b; k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.12)$$

ที่  $L = I - GK$  โดยที่  $L$  คือ กระทบการที่ได้จากการส่งผ่าน  $e_k(\cdot)$  ไปยัง  $e_{k+1}(\cdot)$  สามารถแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ทำให้เพิ่มคุณสมบัติในการคำนวณค่าการลู่เข้าสู่เป้าหมายได้มากขึ้น

### 2.1.3 คุณสมบัติการลู่เข้า [2]

พิจารณารูปแบบคาบเวลาที่ไม่ต่อเนื่องโดยกฎของคุณอริโมโต

$$u_{k+1}(t) = u_k + \gamma e_k(t+1) \quad (2.13)$$

สมการนี้ใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะการคำนวณการควบคุมระบบ เพราะในวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำจะมีแกนค่าเวลาที่แน่นอน และสามารถเขียนสมการ "super - vector" ได้จาก

$$y_k = G_e u_k + d \quad (2.14)$$

$$G_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ C\Gamma & 0 & 0 & \dots & 0 \\ c\Phi\Gamma & c\Gamma & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c\Phi^{N-2}\Gamma & c\Phi^{N-3}\Gamma & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$d = \begin{bmatrix} Cx_0 \\ C\Phi x_0 \\ C\Phi^2 x_0 \\ \vdots \\ C\Phi^{N-1} x_0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

องค์ประกอบของ  $C\Phi^j B$  ในเมตริกซ์  $G_e$  คือ พารามิเตอร์ ในแบบที่ 1 และ  $D$  เป็นสถานะเริ่มต้นของการตอบสนอง นอกจากนี้ "super - vector"  $u_k$  และ  $y_k$  หาได้จาก

$$u_k = [u_k(0)u_k(1)\dots u_k(N-1)]^T \quad (2.17)$$

$$y_k = [y_k(0)y_k(1)\dots y_k(N-1)]^T \quad (2.18)$$

การติดตามผลของค่าความผิดพลาด  $e_{k+1}$  สามารถหาได้จาก

$$e_{k+1} = r - y_{k+1} = r - (G_e u_{k+1} + d) = (r - d) - G_e u_{k+1} \quad (2.19)$$

#### 2.1.4 ค่ามาตรฐานของวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ [2]

การวิเคราะห์เทอมของค่าการลู่เข้าเป็นแนวความคิดของกุลแอมานน์ (Amann) (1996) สมการเริ่มต้นใน Norm Optimal Iterative Learning Control (NOILC) สามารถเขียนได้เป็น

$$y = Gu + Z_0$$

โดยที่

$G$  คือกระบวนการอินพุต-เอาต์พุตของระบบ;  $u \in U$

$$y, z_0 \in Y$$

โดยที่  $Y$  และ  $U$  คือขอบเขตของ อินพุต และเอาต์พุต ใน NOILC

ค่าที่  $Y$  และ  $U$  คือค่าจริงที่ถูกเลือกให้มาใส่ในช่องว่าง นอกจากนี้ สมมุติให้  $G$  คือค่าสมมุติ ที่เป็นเชิงเส้น และขอบเขตของกระบวนการจาก  $Y$  ถึง  $U$

#### 2.1.5 ตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ [2]

จากเทคนิคตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำนี้มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้ระบบสมบูรณ์แบบ และเข้าถึงผลของ NOILC และยังคาดการณ์ได้จากผลการปรับปรุงใหม่ในการลู่เข้าทางคณิตศาสตร์ เพราะไม่จำเป็นต้องเป็นเชิงเส้นตามรูปแบบของ NOILC เพื่อสามารถหาข้อแตกต่างของการคำนวณวิธีต่างๆ จากเทอมของ feedback และ feedforward ซึ่งทั้ง 2 เทอมนี้จะเกิดเวลาที่เปลี่ยนแปลงซึ่งไม่เกี่ยวกับการคงที่ของระบบ และอธิบายโดยใช้วิธีอินทิเกรตในเทอมของ feedback เพื่อต้องการทราบสถานะของระบบ แต่ละวิธีสามารถวัดค่าสถานะของระบบหรือสังเกตการรวมตัวของสถานะที่จะนำไปสู่การคำนวณ NOILC

โอเวนส์ (Owens) และ เฟงค์ (Feng) (2003) ได้ประยุกต์สมการของอาริโมโต เพื่อให้ได้ระบบที่สมบูรณ์

$$u_{k+1}(t) = u_k + \gamma e_k(t+1) \quad (2.20)$$

เพราะว่าเป็นการคำนวณแบบ feedforward และใช้ในการแก้ไขเทอมที่มีการเรียนรู้แบบซ้ำซ้อนกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด ถ้า  $\gamma$  ไม่ใช่ตัวเลือกที่ดีที่สุด ในค่ามาตรฐานของการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำจะแสดงผลการคำนวณการลู่เข้าสู่เป้าหมายและจะแสดงผลลัพธ์ของสมการที่ไม่สมบูรณ์ชั่วขณะ ดังนั้นสิ่งที่เป็นไปได้ในการเลือกค่า  $\gamma$  โดยรูปแบบทำซ้ำที่

ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของการทำซ้ำที่เกิดขึ้นนี้แก้ไขโดยใช้  $\gamma_{k+1}$  โดยที่แต่ละรอบของการทำซ้ำจะต้องหาค่า  $\gamma_{k+1}$  ให้เหมาะสม โดยเราจะกำหนดขอบเขตของการคำนวณโดยพิจารณาจาก ค่ามาตรฐานของอินพุตในรอบถัดไปกับรอบปัจจุบันซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\|u_{k+1} - u_k\|^2 = \gamma^2 \|e_{k+1}\|^2 \quad (2.21)$$

และโดยคอสต์ฟังก์ชันที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของ  $\gamma_{k+1}$  จะใช้สมการนี้

$$J_{k+1}(\gamma_{k+1}) = \|e_{k+1}\|^2 + w\gamma_{k+1}^2 \quad (2.22)$$

## 2.2 ทฤษฎีระบบการควบคุมพีไอดี (Proportional Integral Derivative, PID) [3]

สิ่งที่น่าสนใจมากในปัจจุบันก็คือระบบควบคุมมากกว่าครั้งที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมจะใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี หรือ PID control schemes ที่ถูกดัดแปลงมา ตัวควบคุมพีไอดีที่เป็นแบบอนาล็อกโดยส่วนใหญ่จะใช้น้ำ ใช้อากาศ/ลม ใช้ไฟฟ้า และ ใช้อิเล็กทรอนิกส์ หรือนำมาใช้ประกอบกัน (ใช้หลายๆอย่างรวมกัน) ในปัจจุบันสิ่งต่างๆเหล่านี้มักจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแบบดิจิทัลโดยใช้ตัวประมวลผลผ่านทางคอมพิวเตอร์

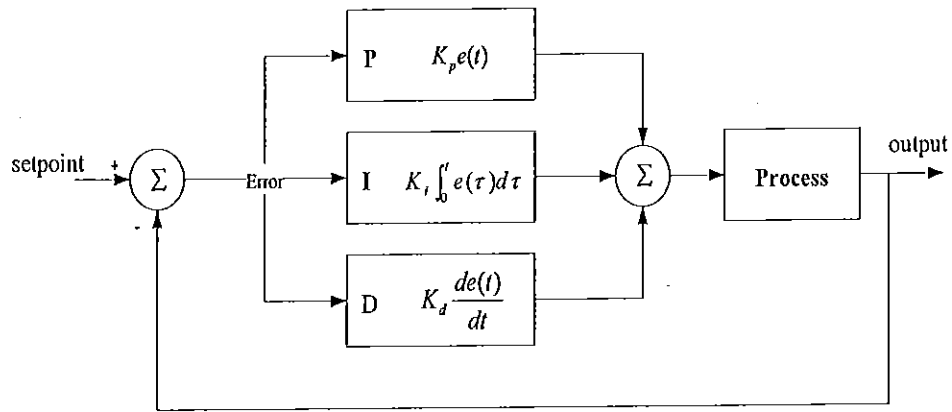
การใช้ประโยชน์ของระบบควบคุมพีไอดี จะใช้ในงานต่างๆ จนถึงระบบควบคุมขนาดใหญ่เป็นที่ทราบกันดีว่าตัวพื้นฐานและตัวดัดแปลงของ PID control schemes นั้น การใช้ประโยชน์จะทำให้เกิดความพึงพอใจในระบบควบคุม แม้ว่าอาจจะไม่ได้มีการควบคุมที่เป็นผลบวกเสมอไปในสถานการณ์ต่างๆที่ให้มา

ปัญหาที่ยากที่สุดในการเขียนโปรแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี คือการควบคุมความถูกต้องแม่นยำในการทำงานของเครื่องจักรกล ตอนนี้ความต้องการทางด้านการควบคุมระบบเครื่องจักรให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดเป็นที่ต้องการอย่างมากในโรงงานอุตสาหกรรม และเพื่อที่จะบรรลุตามเป้าหมายสูงสุด ผู้คนจำนวนมากมานำเสนอทฤษฎีพีไอดีและวิธีการควบคุมแบบพีไอดีซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการควบคุมในระบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop Control Systems, Feedback Control Systems) โดยการควบคุมแบบพีไอดีจะประกอบไปด้วยส่วนการควบคุมที่สำคัญด้วยกันสามส่วนคือ [4]

Proportional control action (P - Action)

Integral control action (I-Action)

Derivative control action (D-Action)



รูปที่ 2.2 แนวคิดพื้นฐานของระบบควบคุมพีไอดี [5]

ตัว P คือหน่วยควบคุมสัดส่วน เป็นการกำหนดการทำงานของเอาท์พุทให้เป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาดหรือการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์

$$\text{เอาท์พุท} = (\text{ค่าความผิดพลาด} \times 100) / P_b$$

$$\text{โดยที่ ค่าความผิดพลาด} = (\text{ค่าที่กำหนด}) - (\text{ค่าที่วัดได้})$$

ในทางปฏิบัติ ค่า P (Proportional control) จะเข้าใกล้ค่าหนึ่ง ซึ่งไม่ใช่ค่าที่ถูกกำหนดจริง ซึ่งค่าแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะถูกเรียกว่าค่าออฟเซต (offset)

ตัว I คือหน่วยควบคุมสำคัญ จะใช้ในการแก้ปัญหาค่าออฟเซตที่เกิดขึ้น ระบบควบคุม I (Integral control) จะช่วยกำจัดค่าออฟเซตที่ยังคงมีอยู่ให้ระบบเข้าสู่ค่าที่กำหนดโดยค่าเอาท์พุทที่ออกมาจะขึ้นอยู่กับเวลาทางอินทิกรัล (integral time) ที่กำหนดขึ้นมาตั้งแต่ต้น หากกำหนดให้เวลาอินทิกรัลน้อย ระบบจะเข้าสู่ค่าที่กำหนดไว้อย่างรวดเร็วแต่จะเกิดการสั่นของกระบวนการมากด้วย และหากกำหนดให้เวลาอินทิกรัลมากจะเกิดการสั่นน้อย แต่จะใช้เวลานานกว่าระบบจะเข้าสู่ค่าที่กำหนด

ตัว D คือหน่วยควบคุมอนุพันธ์ ในกรณีที่มีการรบกวนระบบจากภายนอก เป็นผลให้กระบวนการของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด เราควรจะใช้การควบคุมแบบ D (Derivative control) ซึ่งจะมีการตอบสนองที่รวดเร็ว เป็นผลให้ระบบเข้าสู่ค่าที่กำหนดรวดเร็วขึ้น

หน่วยควบคุมที่มีความง่ายและไม่ซับซ้อนที่สุดของระบบควบคุมแบบพีไอดีคือ หน่วยควบคุมสัดส่วน สมการของ P คือ

$$P_{OUT} = K_P * K_{ERR} \tag{2.23}$$

จากสมการข้างต้น

$P_{OUT}$  คือ จุดเป้าหมาย

$K_p$  คือ ค่าที่ทำให้เข้าสู่เป้าหมาย และ

$K_{ERR}$  คือ ค่าความผิดพลาด

จะเห็นว่าการคำนวณอย่างง่ายๆ เพื่อที่จะให้เกิดผลลัพธ์ที่จุดเป้าหมายโดยใช้วิธีการคูณอย่างง่าย ตัวอย่างหนึ่งที่เกิดจากความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของหุ่นยนต์กลคือ การป้อนค่าเอาต์พุตในระบบ เพื่อให้ได้ค่าผลลัพธ์ที่แน่นอนแต่ระบบมีข้อผิดพลาดจากกระบวนการทำงาน เมื่อเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย ผลจากกระบวนการการผลิตของกำลังมอเตอร์เกิดข้อผิดพลาด ในที่สุดแล้วมีกำลังเพียงเล็กน้อยที่จะขับให้ระบบทำงานต่อไปได้ทำให้ถ่วงเวลาของระบบและการทำงานหยุดชะงักในช่วงระยะเวลาสั้นๆก่อนถึงเป้าหมาย และคงจะพยายามเคลื่อนไหวต่อไปแต่ไม่มีกำลังเพียงพอ โดยปกติแล้วนี่คือส่วนจำเป็นที่จะต้องมีการทำงานที่สมบูรณ์แบบเพื่อควบคุมให้ไปสู่ขั้นตอนสุดท้ายของการทำงาน

ตัว I คือส่วนจำเป็นที่จะทำให้ต้องสมบูรณ์เพื่อควบคุมสัดส่วน อย่างไรก็ตามแทนที่ข้อผิดพลาดปัจจุบันจะเป็นปัญหา แต่จะใช้ข้อผิดพลาดนี้รวมตัวกัน นี่คือบทสรุปของข้อผิดพลาดทุกอย่างรอบ โคจรซึ่งจะนำไปถึงเป้าหมาย การรวมตัวกันของข้อผิดพลาดจะกลายเป็นสิ่งที่เป็นประโยชน์มากในความสมบูรณ์ของหน่วยพื้นฐานควบคุมสัดส่วน ยิ่งไปกว่านั้นตัวอย่างการใช้การหมุนวนรอบ เมื่อผลลัพธ์ระดับกำลังที่ควบคุม โดย P กลายเป็นระดับค่าพอที่จะหยุด การรวมตัวของข้อผิดพลาดจึงเริ่มต้นสร้างขึ้นและเก็บการวนรอบของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นค่าที่เข้าใกล้เป้าหมาย ข้อผิดพลาด P ดำเนินต่อไปจนเริ่มลดลง และโดยทั่วไป I จะเป็นผลที่ทำให้การทำงานผ่านและดำเนินต่อไปได้ สมการของ I คือ

$$I_{OUT} = K_I * I_{ERR} \quad (2.24)$$

จากสมการนี้  $I_{ERR}$  คือ :

$$I_{ERR} = \text{สิ่งที่เกิดขึ้นก่อน } I_{ERR} - K_{ERR}$$

จากการใช้ทั้งสองสมการนี้ทำให้ระบบเกือบจะไปสู่เป้าหมายอย่างแน่นอน ยังมีอีกสิ่งหนึ่งที่จะเป็นประโยชน์กับระบบโดยจะปรับให้ระบบมีความเหมาะสมยิ่งขึ้น ทำให้การวนรอบเป็นวิธีการที่ถูกต้องง่ายๆแต่ต้องใช้เวลา อันดับแรกคือกำหนดให้ P และ I มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จากนั้นค่อยๆเพิ่มค่าของ P จนได้การตอบสนองหรือผลลัพธ์ที่พอใจแล้ว แต่จะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นเสมอ จากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มค่า I อย่างช้าๆ เป้าหมายของคุณจะถูกขับเคลื่อนไปอย่างรวดเร็วและเข้าใกล้สู่

จุดเป้าหมายในที่สุด เวลาทั้งหมดที่ดีที่สุดที่จะทำให้ไปสู่เป้าหมายจะเลยกำหนด ไปหรือหลังจากนั้นเล็กน้อย

ปัญหาอีกสิ่งหนึ่งคือ เมื่อหุ่นยนต์เกิดการชะงักในช่วงระยะเวลาหนึ่งขณะที่ PID วนซ้ำอยู่เพื่อพยายามรักษาตำแหน่ง สิ่งที่เหลือไว้จากข้อผิดพลาดจะสร้างจูนอย่างรวดเร็วและก่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่คงที่เมื่อปล่อยออกมาอย่างกะทันหัน โดยสามารถตรวจสอบพอร์ตของการทำงานเพื่อระดับสถานะ ก่อนการเพิ่มข้อผิดพลาดซึ่งเป็นแนวความคิดที่ดี อย่างการตั้งค่าข้อผิดพลาดคือสิ่งที่สำคัญและดีที่สุด เพื่อป้องกันอุปสรรคในการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองที่มากเกินไปต่อข้อผิดพลาด

ในตอนท้าย สิ่งที่จะช่วยในกระบวนการควบคุมระบบของทั้งสามสิ่งนี้คือ D หรือ เรียกว่าค่าการควบคุมเดลต้า มันจะจับเคลื่อนจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอย่างที่เป็นจริง หรือเดลต้าของ  $K_{ERR}$  เพราะฉะนั้นมันสามารถใช้เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาตอบโต้โดยทันทีจากข้อผิดพลาด และเป็นสิ่งที่ดีในการรักษาตำแหน่งที่แน่นอน หรืออัตราความเร็วในการวนซ้ำของระบบ

สมการของ D คือ

$$D_{OUT} = D_{ERR} * K_D \quad (2.25)$$

จากสมการนี้  $D_{ERR}$  คือ :

$$D_{ERR} = K_{ERR} - \text{สิ่งที่เกิดขึ้นก่อน } K_{ERR}$$

ระบบควบคุมพีไอดีเป็นการรวมตัวเข้าด้วยกันอย่างง่ายของผลลัพธ์ในสมการทั้งสามสมการ การรวมแต่ละหน่วยการทำงานเข้าด้วยกันจะเป็นประโยชน์กับการใช้งานในสถานการณ์ที่แตกต่างเป็นต้นว่า PI จะเป็นตัวควบคุมที่จะทำให้ได้ค่าตำแหน่งอย่างรวดเร็วแต่ไม่มีความถูกต้องที่สุด ส่วนตัวควบคุมแบบ PD คือสิ่งที่จะนำไปสู่จุดหมายอย่างแม่นยำและรวดเร็ว และตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถรักษาตำแหน่งที่ถูกต้องแน่นอนได้

ระบบควบคุมโดยทั่วไป สามารถแบ่งคุณสมบัติของระบบได้เป็น 4 แบบ สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

### 2.2.1 ระบบควบคุมแบบพี (P Controller)

จะมีคุณสมบัติ

ลดค่า Rise Time ( $t_r$ ) ทำให้ระบบทำงานเร็วขึ้นในช่วงแรก

เพิ่ม Over Shoot ( $M_p$ ) ทำให้ระบบแกว่งในช่วงเริ่มต้น แต่ส่งผลให้ค่า Steady State Error

ลดลง



### 2.2.2 ระบบควบคุมแบบพีดี (PD Controller)

จะมีคุณสมบัติ

ลด Over Shoot ( $M_p$ ) ทำให้ระบบมีการแกว่งน้อยลงในช่วงเริ่มต้น

ลด Setting Time ( $t_r$ ) ทำให้ระบบทำงานถึงจุดคงที่ (Steady State) เร็วขึ้น

### 2.2.3 ระบบควบคุมแบบพีไอ (PI Controller)

จะมีคุณสมบัติ

ลดค่า Rise Time ( $t_r$ ) ทำให้ระบบทำงานเร็วขึ้นในช่วงแรก

กำจัดค่า Steady State Error  $e_{ss}$  เพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตเทียบเท่ากับค่าอินพุต

### 2.2.4 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

เป็นการนำคุณสมบัติของระบบควบคุมทั้ง 3 แบบ คือ P, PD และ PI มารวมกัน โดยสามารถกำหนดค่าเกณฑ์ทั้ง 3 แบบ คือ P, I และ D ได้อย่างอิสระ ทำให้สามารถออกแบบระบบควบคุมให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ โดยทำการปรับค่าคงที่ทั้ง 3 แบบ และนำมาพิจารณาผลตอบสนองที่ได้ เมื่อปรับค่าคงที่จนได้ผลตอบสนองตามต้องการแล้ว จึงนำค่าที่ได้ไปติดตั้งหรือออกแบบเป็นวงจรให้งานต่อไป

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของระบบควบคุมพีไอดี

ระบบควบคุม	Rise Time ( $t_s$ )	Maximum Overshoot ( $M_p$ )	Setting Time ( $t_s$ )	Steady State Error $e_{ss}$
แบบ P	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลงน้อย	ลด
แบบ I	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	กำจัด
แบบ D	เปลี่ยนแปลงน้อย	ลด	ลด	เปลี่ยนแปลงน้อย

ถ้าพิจารณาการคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของระบบควบคุมแบบพีไอดีได้ดังนี้

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $K_p$  ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพี

$K_I$  ค่าคงที่ทางเวลาในการอินทิเกรตสัญญาณของตัวควบคุมแบบไอ

$K_D$  ค่าคงที่ทางเวลาในการดิฟเฟอเรนเชียล สัญญาณของตัวควบคุมแบบดี

วิธีการของ Ziegler-Nichols เป็นการปรับตัวชดเชยสำหรับกระบวนการการต่อระบบควบคุมแบบปิดที่แสดงดังรูปที่ 2.3 ที่ถูกนำเสนอไว้ มีอยู่ 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

1. ตัวชดเชยแบบพีจะประยุกต์ใช้เป็น

$$G_c(s) = K_p \tag{2.27}$$

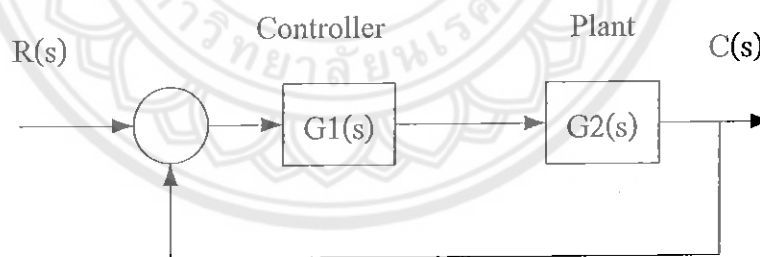
2. ตัวชดเชยแบบพีไอคือจะประยุกต์ใช้เป็น

$$G_c(s) = K_p + \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) + T_d s \tag{2.28}$$

โดยการใช้นิยามตัวชดเชยก่อนหน้านี้ นั่นคือ  $T_i$  และ  $T_d$  ไปใช้ในการคำนวณเมื่อ

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \tag{2.29}$$

$$K_d = K_p T_d \tag{2.30}$$



รูปที่ 2.3 การต่อระบบควบคุมแบบปิด

### 2.2.5 การปรับระดับการควบคุมของตัวควบคุมพีไอดี [6]

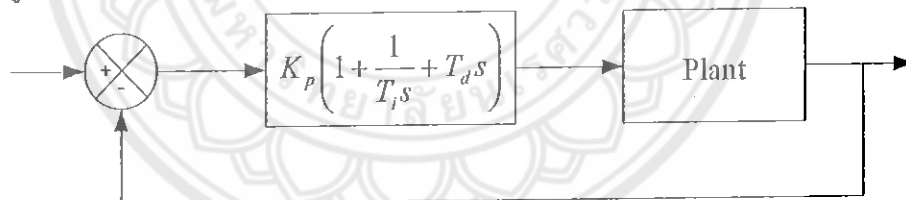
ระบบควบคุมพีไอดีของเครื่องจักรรูปที่ 2.4 จะแสดงให้เห็นถึงระบบควบคุมพีไอดีของเครื่องจักร ถ้าโมเดลทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรสามารถเขียนออกมาได้ เมื่อนั้นก็จะสามารถออกแบบเทคนิคที่หลากหลายเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้ว่าจะพบค่าจำเพาะที่เป็นแบบชั่วคราวหรือมีสภาวะคงที่ของระบบวงจรปิด อย่างไรก็ตามถ้าในเครื่องจักรมีความซับซ้อน โมเดลทางคณิตศาสตร์ก็จะไม่สามารถได้ออกมาอย่างง่ายดายได้ เมื่อการวิเคราะห์ถึงรูปแบบตัว

ควบคุมพีไอดีนั้นเป็นไปได้ ดังนั้นจึงหันไปใช้การทดลองที่จะปรับการควบคุมของตัวควบคุมพีไอดีแทน

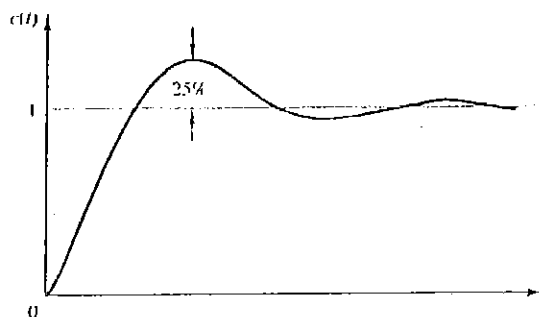
กระบวนการการเลือกใช้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่จะทำให้พบค่าจำเพาะที่รู้จักกันว่าเป็นตัวปรับระดับตัวควบคุม Ziegler และ Nichols ซึ่งถูกเสนอไว้ในกฎของการปรับระดับการควบคุมของตัวควบคุมพีไอดี (หมายถึงการกำหนดค่า  $K_p, T_i$  และ  $T_d$ ) ขึ้นพื้นฐาน กฎของ Ziegler – Nichols จะสะดวกมากเมื่อไม่ทราบโมเดลทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรที่เราจะนำมาใช้ (กฎนี้สามารถใช้ได้เพราะว่ามันจะสามารถประยุกต์รูปแบบของระบบกับโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่รู้ได้)

กฎของ Ziegler – Nichols สำหรับการปรับระดับของตัวควบคุมพีไอดี Ziegler และ Nichols ได้เสนอกฎสำหรับการหาค่าของสัดส่วน  $K_p$ , integral time  $T_i$  และ derivative time  $T_d$  โดยอาศัยพื้นฐานจากลักษณะการตอบสนองชั่วคราวของเครื่องจักร ดังเช่น การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี หรือ การปรับระดับควบคุมของตัวควบคุมพีไอดีที่สามารถทำได้โดยวิศวกรที่ชาญฉลาด โดยการทดลองกับเครื่องจักร (การปรับระดับควบคุมของตัวควบคุมพีไอดีมักจะเสนอไว้ในกฎของ Ziegler – Nichols)

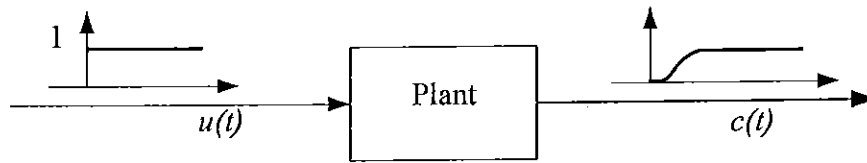
มีรูปแบบหรือวิธีการอยู่ 2 แบบ ที่เรียกว่ากฎการปรับระดับของ Ziegler – Nichols ทั้ง 2 วิธีนี้มีเป้าหมายที่จะได้รับสูงสุด 25% ในขั้นตอนการตอบสนอง รูปที่ 2.5  
วิธีที่ 1 ในวิธีแรกนี้ จะทดลองการตอบสนองของเครื่องจักรในหน่วยของการตั้งค่ารับเข้าไป ดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบของระบบควบคุมพีไอดี



รูปที่ 2.5 เป้าหมายที่จะได้รับสูงสุด 25% ในขั้นตอนการตอบสนอง



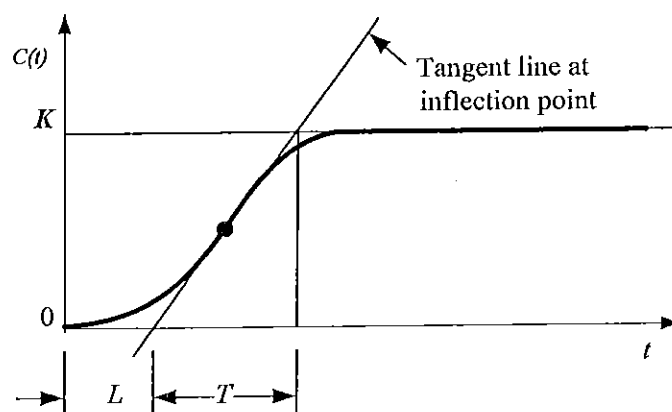
รูปที่ 2.6 แสดงการทดลองการตอบสนองของเครื่องจักรในหน่วยของการตั้งค่ารับเข้าไป

ถ้าเครื่องจักรที่นำมาพิจารณาไม่มีความเกี่ยวข้องกับตัวประมวลผลและโพลต่างๆที่มารวมกันอย่างซับซ้อน เมื่อนั้นกราฟของขั้นตอบสนองอาจจะเหมือนกับกราฟรูปตัว S ที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.7 (ถ้าการตอบสนองไม่แสดงออกมาเป็นกราฟรูปตัว S วิธีนี้จะใช้ไม่ได้) ถ้ากราฟของขั้นการตอบสนองอาจจะใช้การทดลอง หรือได้มาจากการเรียนแบบการตอบสนองของเครื่องจักร

กราฟรูปตัว S อาจจะมีเกิดจากสร้างลักษณะโดยค่าคงที่ 2 ตัวคือเวลาที่ล่าช้า (time  $L$ ) และเวลาคงที่ (time constant  $T$ ) เวลาที่ล่าช้าและเวลาที่คงที่จะถูกกำหนดจากการวาดเส้นแทนเจนต์ (tangent) (เส้นตรงที่สัมผัสกับเส้นตรง/โค้งอื่นโดยไม่ตัดกัน) ที่จุดตัดกันของกราฟรูปตัว S กับเส้นแทนเจนต์กับส่วนปลายของเวลา และเส้น  $C(t) = K$  ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7 ฟังก์ชันถ่ายโอน  $C(s)/U(s)$  อาจจะประมาณได้โดยใช้ระบบคำสั่งแรกกับการถ่ายโอนอย่างช้าๆดังนี้

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \quad (2.31)$$

Ziegler และ Nichols ได้กำหนดค่า  $K_p$ ,  $T_i$  และ  $T_d$  ตามที่แสดงในสมการในตารางที่ 2.2 สังเกตว่าการปรับระดับของตัวควบคุมพีไอดี โดยใช้วิธีแรกของกฎ Ziegler – Nichols นั้นจะให้ข้อมูลดังนี้รูปที่ 2.7



รูป 2.7 แสดงการปรับระดับของตัวควบคุมพีไอดี โดยใช้วิธีแรกของกฎ Ziegler – Nichols

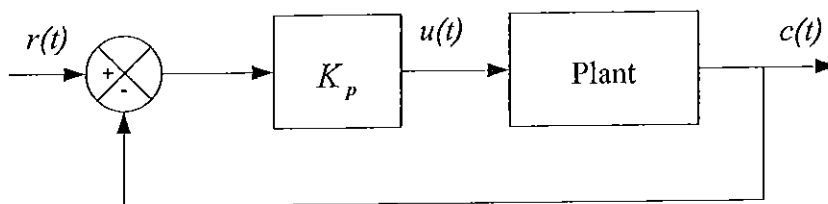
ตารางที่ 2.2 แสดงสูตรของ Ziegler และ Nichols ได้กำหนดค่า  $K_p, T_i$  และ  $T_d$  (วิธีที่ 1)

ระบบควบคุม	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

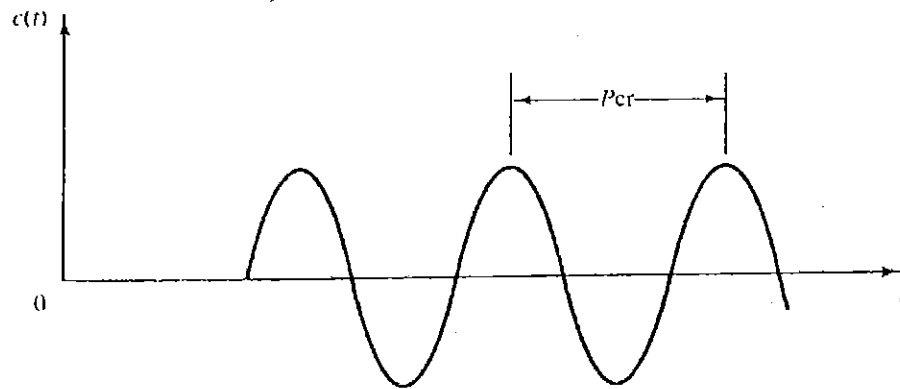
$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 1.2 \frac{T}{L} \left( 1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \\
 &= 0.6T \frac{\left( s + \frac{4}{L} \right)^2}{s}
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

ดังนั้น ตัวควบคุมพีไอดี จะมีโพลที่จุดกำเนิดและซีโรลำดับที่สองครั้งที่  $s = -1/L$

**วิธีที่ 2** ตัวควบคุมพีไอดีจะมีโพลที่จุดกำเนิด  $T_i = \infty$  และ  $T_d = 0$  ใช้แค่สัดส่วนของการควบคุม รูปที่ 2.8 การเพิ่มขึ้นของ  $K_p$  จากศูนย์ถึงค่าวิกฤต  $K_{cr}$  ซึ่งจะแสดงผลลัพธ์ที่ไม่แน่นอนออกมา ก่อน (ถ้าผลลัพธ์ที่ออกมาไม่ได้แสดงค่าที่ไม่แน่นอนออกมาค่าของ  $K_p$  อาจจะได้ เมื่อนั้นวิธีนี้จะใช้ไม่ได้) ดังนั้น ค่า  $K_{cr}$  ที่ได้และจุดที่สัมพันธ์กัน  $P_{cr}$  จากการทดลองจะถูกกำหนดรูปที่ 2.7 Ziegler และ Nichols เสนอไว้ว่าเราจะกำหนดค่าพารามิเตอร์  $K_p, T_i$  และ  $T_d$  ตามสูตรที่แสดงใน ตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.8 แสดงสัดส่วนของการควบคุม



รูปที่ 2.9 แสดงการกำหนดค่าในระบบของ Ziegler - Nichols

ตารางที่ 2.3 แสดงสูตรของ Ziegler และ Nichols ได้กำหนดค่า  $K_p, T_i$  และ  $T_d$  (วิธีที่ 2)

ระบบควบคุม	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

สังเกตว่าการปรับระดับตัวควบคุมพีไอดี โดยวิธีที่ 2 กฎของ Ziegler-Nichols ให้ผลดังนี้

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$= 0.6K_{cr} \left( 1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125P_{cr}s \right)$$

$$= 0.075K_{cr}P_{cr} \frac{\left( s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s} \quad (2.33)$$

ดังนั้นตัวควบคุมพีไอดี จะมีโพลที่จุดกำเนิดและซีโรลำดับที่สองครั้งที่  $s = -4/P_{cr}$

ข้อคิดเห็น กฎการปรับระดับของ Ziegler-Nichols (และกฎการปรับระดับอื่นๆตามทฤษฎีของ Ziegler - Nichols) นั้นมีการใช้อย่างกว้างขวางในการปรับระดับของตัวควบคุมพีไอดีในระบบกระบวนการควบคุมที่ซึ่งกำลังของเครื่องจักรไม่สามารถทราบได้อย่างเที่ยงตรง (ถ้าทราบกำลัง

เครื่องจักร จะมีหลายๆการวิเคราะห์และแสดงภาพออกมาในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี จะใช้ได้ ซึ่งจะนอกเหนือไปจากกฎการปรับระดับการควบคุมของ Ziegler-Nichols)

ถ้าเราทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของเครื่องจักรที่นำมาพิจารณา ขั้นตอนที่มีการตอบสนอง อาจจะมีการคำนวณหรือค่าต่างๆ ซึ่งจะมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์  $K_p, T_i$  และ  $T_d$  จากตารางที่ 2.2 หรือ 2.3 อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จริงๆของกฎการปรับระดับการควบคุมของ Ziegler-Nichols (และกฎการปรับระดับอื่นๆ) จะสามารถประยุกต์ใช้ได้กับเครื่องจักรที่ไม่ทราบฟังก์ชันถ่ายโอนซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์หรือแสดงภาพออกมาเพื่อที่จะได้ออกแบบตัวควบคุมได้

โดยทั่วไปเครื่องจักรจะมีการทำงานที่ซับซ้อนแต่ไม่ได้รวมกัน จึงสามารถใช้กฎการปรับระดับการควบคุมของ Ziegler-Nichols ได้ อย่างไรก็ตามด้วยเครื่องจักรมีการทำงานร่วมกัน กฎเหล่านี้ อาจจะใช้ไม่ได้ในบางกรณี ยกตัวอย่างกรณีที่กฎของ Ziegler-Nichols ใช้ไม่ได้ พิจารณาจากกรณีต่อไปนี้ สมมุติว่าระบบควบคุมย้อนกลับในหน่วยต่างๆที่เครื่องจักรที่มีการเปลี่ยนย้ายหน้าที่ คือ

$$G(s) = \frac{(s+2)(s+3)}{s(s+1)(s+5)} \quad (2.34)$$

เนื่องจากการรวมกันของการทำงานวิธีแรกจึงใช้ไม่ได้ อ้างอิงจากรูปที่ 2.5 ขั้นตอนของการตอบสนองของเครื่องจักรจะไม่ได้กราฟเป็นรูปตัว S แทนที่จะเป็นเช่นนั้น การตอบสนองนั้นเพิ่มขึ้นพร้อมๆกับเวลา ดังนั้นวิธีที่ 2 จึงถูกนำมาพิจารณารูปที่ 2.8 ในระบบวงจรมีปิด กับสัดส่วนของตัวควบคุมจะไปแสดงค่าที่ยังไม่คงที่ ค่าใดก็ตามที่ได้ค่า  $K_p$  อาจจะได้นี้ทำให้เห็นตามที่ได้วิเคราะห์หามาตั้งแต่สมการว่ามีลักษณะ ดังนี้

$$s(s+1)(s+5) + K_p(s+2)(s+3) = 0 \quad (2.35)$$

$$\text{หรือ} \quad s^3 + (6 + K_p)s^2 + (5 + 5K_p)s + 6K_p = 0 \quad (2.36)$$

เพราะฉะนั้น จะสามารถจัดรูปได้เป็น

$$\begin{array}{r} s^2 \\ s^2 \\ s^1 \\ s^0 \end{array} \begin{array}{r} 1 \\ 6 + K_p \\ \frac{30 + 29K_p + 5K_p^2}{6 + K_p} \\ 6K_p \end{array} \begin{array}{r} 5 + 5K_p \\ 6K_p \\ 0 \\ 6K_p \end{array}$$

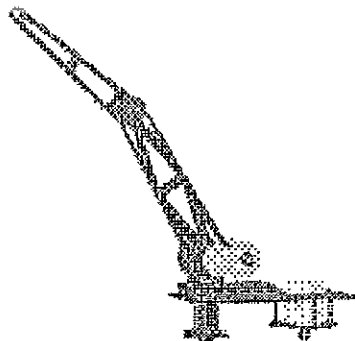
ค่าสัมประสิทธิ์ในแถวแรกนั้นจะเป็นบวกสำหรับทุกๆค่าของค่าบวก  $K_p$  ดังนั้นในกรณีที่แสดงนี้ระบบวงจรปิดจะไม่แสดงค่าที่ไม่คงที่ออกมา และดังนั้นค่าวิกฤตที่ได้รับ คือค่า  $K_{cr}$  จะไม่ปรากฏ เพราะฉะนั้นวิธีที่ 2 จึงใช้ไม่ได้

ถ้าเครื่องจักรเป็นดังเช่นกฎของ Ziegler-Nichols จะสามารถใช้ได้ เมื่อเครื่องจักรจะถูกปรับระดับตัวควบคุมพีไอดีโดยกฎของ Ziegler-Nichols ที่แสดงออกมามีค่าประมาณ 10% ~ 60% ซึ่งมากที่สุดที่มีการตอบสนอง โดยมีค่าเฉลี่ย (การทดลองในหลายๆเครื่องจักร) ซึ่งมีค่าประมาณสูงสุด 25% (ค่านี้ น่าจะสามารถเข้าใจได้เพราะค่าที่ได้เสนอไว้ในตารางที่ 2.2 และ 2.3 นั้นเป็นมัธยฐาน) ในกรณีที่ให้มานั้น ถ้าค่าที่ได้้นั้นมากเกินไปจะยอมรับได้มักจะเป็นไปได้ (จากการทดลองหรือนอกเหนือจากนั้น) ที่จะทำให้มีการปรับระดับแบบละเอียดซึ่งระบบวงจรปิดจะตอบสนองชั่วคราวได้อย่างเป็นที่น่าพอใจ ความจริงแล้วกฎการปรับระดับของ Ziegler-Nichols จะให้การศึกษาเพื่อคาดคะเนถึงค่าพารามิเตอร์ และให้จุดเริ่มต้นของการปรับระดับละเอียดได้

**ตัวอย่าง** การใช้ระบบควบคุมพีไอดีในการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์

การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ให้เสร็จสมบูรณ์ได้ต้องมีการควบคุมระบบทุกส่วน (motor, actuators และ sensor) ของหุ่นยนต์ โดยในการสร้างนั้นส่วนของการควบคุมระบบของข้อต่อ ทางกลไก และส่วนที่เกี่ยวกับไฟฟ้าจะทำให้ที่ Advanced Manufacturing Laboratory (AML) ซึ่งอยู่ในแผนก computer science และในส่วนสุดท้ายคือข้อต่อนั้นจะใช้แบบ revolute หรือ prismatic ซึ่งหมายถึงตัวหุ่นยนต์จะสามารถกำหนดข้อต่อที่กำหนดที่แตกต่างกันได้

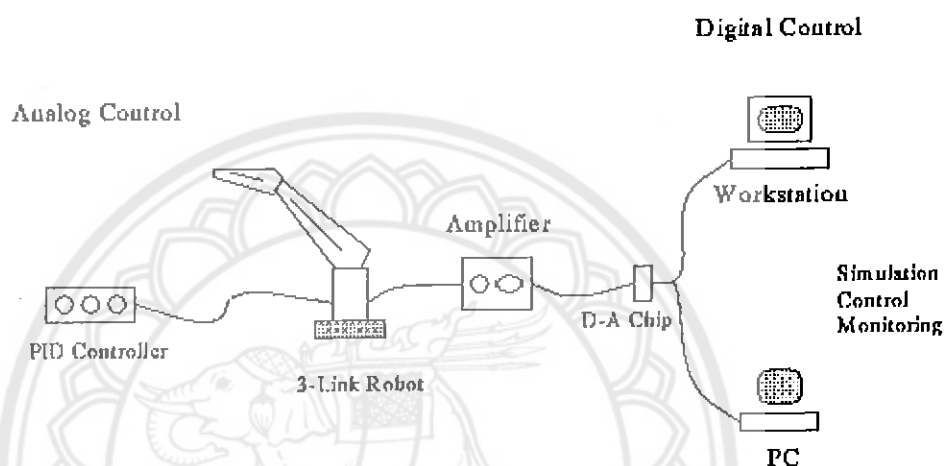
จากรูปที่ 2.11 หุ่นยนต์นี้จะมีมอเตอร์ อยู่ 3 แบบเพื่อควบคุมข้อต่อ 3 ตัว และมีเซนเซอร์ 6 ตัว (3 ตัวในการบอกตำแหน่ง และอีก 3 ตัวในการบอกความเร็ว) เพื่ออ่านตำแหน่งและความเร็วสำหรับในแต่ละข้อต่อ ซึ่งจะนำไปใช้ในระบบ feedback control loop



รูปที่ 2.10 การควบคุมด้วยระบบพีไอดีในมอเตอร์ของแขนกล



หุ่นยนต์ตัวนี้สามารถควบคุมโดยใช้การควบคุมแบบอนาล็อกโดยจะต่อกับ analog PID controller และศึกษาอาการแกว่งของหุ่นยนต์ สำหรับระบบดิจิทัล จะถูกใช้โดยการต่อเครื่อง workstation (SUN, HP, ฯลฯ) หรือ PC โดยผ่านทาง RS232 ซึ่งจะต้องอาศัยชิพ D/A และ A/D ในการเชื่อมต่อกับ เครื่อง workstation (หรือ PC) และแอมพลิไฟเออร์ที่สามารถจ่ายไฟเพียงพอกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ในรูปแบบที่ 2.11 จะแสดงรูปแบบทั้งหมดของ interface ต่างๆ และ platforms ที่สามารถควบคุมหุ่นยนต์นั้น



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบที่โอดีเชื่อมต่อกันทั้งระบบ

จากเนื้อหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้กล่าวถึงทฤษฎีของระบบการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำและทฤษฎีระบบการควบคุมพีโอดีที่จะนำมาเปรียบเทียบสมรรถนะของทั้งสองระบบ ทฤษฎีของระบบควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำที่ได้ศึกษามาสามารถแบ่งออกเป็นสองวิธีการคือ

1. ค่ามาตรฐานของวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ
2. ตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ

ทฤษฎีของระบบควบคุมพีโอดีสามารถแบ่งคุณสมบัติของระบบออกเป็น 4 แบบดังนี้

1. ระบบควบคุมแบบพี (P Controller)
2. ระบบควบคุมแบบพีดี (PD Controller)
3. ระบบควบคุมแบบพีไอ (PI Controller)
4. ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

## บทที่ 3

# รูปแบบการทดลอง

การที่ได้ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมพีไอดี (Proportional Integral Derivative, PID) และการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ (Iterative Learning Control, ILC) มาแล้วในบทที่ผ่านมา ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของแต่ละขั้นตอนวิธี และการนำเอาทฤษฎีมาเขียนในโปรแกรมแมทแล็บ เพื่อนำผลของทั้งสองวิธีการมาเปรียบเทียบว่าขั้นตอนวิธีใดให้ผลค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยจะมีการวิเคราะห์รูปแบบการทดลองของแต่ละวิธีการดังจะกล่าวถึงต่อไปนี้

ในปริณญาณิพนธ์เล่มนี้ได้้นำการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ โดยใช้หลักการของ Parameter Optimization Iterative Learning Control มาทำการทดลอง ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการคำนวณ เทียบกับทฤษฎีของระบบการควบคุมพีไอดี ซึ่งเป็นระบบควบคุมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์สมรรถนะที่ได้จากทั้งสองระบบ โดยดูจากค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น

### 3.1 Parameter optimization iterative learning control (POILC) [8]

การพัฒนาสมการพีชคณิตได้ถูกนำมาใช้เพื่อลดคំกฏการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำในการคำนวณแบบใหม่ ซึ่งจะทำให้ค่าความผิดพลาดของระบบเข้าสู่ค่าที่เป็นศูนย์ได้ถ้าระบบนั้นให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ แต่ถ้าผลลัพธ์ออกมาไม่เป็นที่น่าพอใจ จะนำสองวิธีการที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้มาประยุกต์ใช้ ซึ่งจะต้องมีการวิเคราะห์ของอัตราการลู่เข้า ดังนั้นจึงมีการเลือกใช้พารามิเตอร์ที่ปรับค่าได้เพื่อช่วยพัฒนาประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งนำไปสู่การสร้างระบบที่มีศักยภาพ

#### 3.1.1 กรณีปัญหา [8]

พิจารณาระบบต่อเนื่องระบบหนึ่งที่แสดงในรูปของปริภูมิสแตต [ภาคผนวก ก]

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (3.2)$$

ตัวแปรจากสมการสามารถอธิบายได้ดังนี้

A คือ State Matrix

B คือ Input Matrix

C คือ Output Matrix

D คือ Direct Transmission Matrix

จากการวิเคราะห์กระบวนการทดลองนี้ สมมติให้อินพุตและเอาต์พุตมีช่วงแซมปลิงตาม (sampling time)  $t_s$  ในช่วงเวลา  $[0, T]$  และจำนวนรอบของการแซมปลิงคือ  $N = T/t_s$  โดยผลที่ได้สามารถเขียนเป็นสมการ

$$x(t+1) = \phi x(t) + \Delta u(t) \quad (3.3)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3.4)$$

กำหนดให้  $x(0)$ ,  $N \geq t \geq 0$

และยังสามารถวิเคราะห์รูปแบบจากสมการของเวกเตอร์อินพุตต่อเวกเตอร์เอาต์พุตของแต่ละการทดลอง และถ้าจะให้ถูกต้องมากขึ้นควรจะให้  $m \geq 1$  เป็นระดับความสัมพันธ์ฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งสามารถเขียนแสดงได้ดังนี้

$$u_k = (u_k(0), u_k(1), \dots, u_k(N-m)) \quad (3.5)$$

$$y_k = (y_k(m), y_k(m+1), \dots, y_k(N)) \quad (3.6)$$

$$r = (r(m), r(m+1), \dots, r(N)) \quad (3.7)$$

โดยค่า  $k$  คือจำนวนรอบที่ศึกษา แต่จากสมการนี้จำเป็นต้องมีการเลื่อนระหว่างซูเปอร์เวกเตอร์ (super vector) ของอินพุตกับเอาต์พุต จึงกำหนดง่ายๆ ว่า  $m=1$  ทำให้สมการ (3.3) และ (3.4) สามารถถูกเขียนใหม่ได้เป็น

$$y = Gu + d \quad (3.8)$$

กับ

$$G = \begin{bmatrix} C\Delta & 0 & \dots & 0 & 0 \\ C\Phi\Delta & C\Delta & \ddots & 0 & 0 \\ C\Phi^2\Delta & C\Phi\Delta & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & C\Delta & 0 \\ C\Phi^{N-1}\Delta & \dots & \dots & C\Phi\Delta & C\Delta \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$d = \begin{bmatrix} C\Phi x_0 \\ C\Phi^2 x_0 \\ C\Phi^3 x_0 \\ \vdots \\ C\Phi^N x_0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ซึ่ง  $G$  และ  $d$  เป็น เมตริกซ์ และ  $G$  ประกอบด้วย ค่าตัวแปร Markov ของสมการ (3.3) และ (3.4) เพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ได้ เพราะฉะนั้นสมการ (3.8) จะเขียนได้ว่า

$$y_k = Gu_k + d \quad (3.11)$$

โดยค่า  $k$  คือ จำนวนรอบที่ศึกษาและค่าผิดพลาดในรอบศึกษาที่  $k$  จะกำหนดให้เป็นสมการได้ ดังนี้  $e_k = r - Gu_k - d = (r - d) - Gu_k$  ดังนั้น ถ้าไม่มีการสูญเสียใดๆแล้วแทน  $r$  เป็น  $r - d$  และจะทำให้  $d = 0$  ส่งผลให้  $x_0 = 0$

กรณีปัญหาการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ สามารถหาได้โดยง่ายโดยให้ค่าอินพุต เข้าสู่  $u_\infty$  สำหรับค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ

$$\min_u \|e\|^2 : e = r - y, y = Gu \quad (3.12)$$

โดยผลที่ได้คือ  $\langle f, g \rangle = f^T Qg$  และค่ามาตรฐาน เป็น  $\|e\|^2 = e^T Qe$  และ  $Q = Q^T > 0$  โดยค่าปกติของ  $Q$  คือ ไดอะแกรม  $\{Q_j\}$  ซึ่งค่า  $Q_j$  เป็นตัวกำหนดน้ำหนักของ  $e(j)$  ในค่ามาตรฐาน

และจากค่ากำหนดของเอาท์พุท ทาง  $y_k \mapsto Q^{1/2} y_k$  และ  $G \mapsto Q^{1/2} G$  ทำให้สรุปได้ว่า  $Q = I$  ส่วนค่าผิดพลาดที่ดีที่สุดคือ  $\|r - Gu_\infty\|^2$  จะเป็นตัวชี้วัดว่าระบบมีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหน ซึ่งเทอม  $\|r - Gu_\infty\|^2$  เป็นเทอมที่ชี้ให้เห็นว่าเอาท์พุทที่ได้จะมีค่าที่น่าพอใจที่สุด ดังนั้นจากการนำเสนอต่อไปนี้สามารถบอกได้ว่าจะสามารถติดตามผลของอินพุทที่ป้อนเข้าไปและให้ค่าออกมาทางเอาท์พุทได้ และเมื่อค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด

### 3.1.2 ขั้นตอนวิธีการ [8]

ผลที่ทำให้เกิดการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ มาจากการปรับปรุงระบบการติดตามวิถีที่ต้องการที่สมบูรณ์แบบมากที่สุด โดยสามารถหาค่าที่เหมาะสมกับปัญหาซึ่งเป็นข้อเสนอของคุณฟูรูตะ (Furuta) และคุณยามากิตะ (Yamakita) ได้นำเสนอในปี ค.ศ.1987 จากสมการ

$$u_{k+1} = u_k + \varepsilon_k A^* e_k \quad (3.13)$$

ซึ่งให้  $A^*$  เป็นตัวควบคุมของระบบ ส่วน  $\varepsilon_k$  เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับค่าในแต่ละรอบ แต่ปัญหาที่พบคือ ข้อยุ่งยากในการเลือกช่วงเวลาและโครงสร้างของ feedforward

ทฤษฎีของการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ แบบ Parameter Optimization Iterative Learning Control ถูกพัฒนาขึ้นโดย โอเวนส์ และเอมานันน์ ในปี ค.ศ.1996 และปี ค.ศ. 1998 วิธีการนี้มีแนวคิดเหมือนกับวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำโดยทั่วไปที่ซึ่งประกอบไปด้วยการคำนวณค่าต่างๆที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบ ซึ่งค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบนี้จะเป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของฟังก์ชันที่เลือกมาพิจารณา โดยฟังก์ชันที่เลือกมาพิจารณานี้จะต้องเป็นฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติในการทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงในแต่ละรอบการทำงาน ในขณะที่ค่าอินพุตที่ป้อนเข้าไปจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และฟังก์ชันที่เลือกมาพิจารณาคือฟังก์ชันที่แสดงในสมการ

$$J_{k+1} = \|e_{k+1}\|^2 + \|u_{k+1} - u_k\|^2 \quad (3.14)$$

ผลลัพธ์จากฟังก์ชันที่เลือกมาพิจารณาในสมการที่ (3.14) จะได้อยู่ในรูปของวิธีการคำนวณค่าอินพุตดังนี้

$$u_{k+1} = u_k + A^* e_{k+1} \quad (3.15)$$

ซึ่งคล้ายกับสมการที่ (3.12) แต่ตัวแวกเตอร์ของค่าความผิดพลาดในสมการนี้จะได้มาจากรอบการคำนวณในรอบปัจจุบัน

ในปริยายนิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะแสดงให้เห็นถึงข้อมูลของการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ ที่ได้จากการคำนวณการคำนวณ ดังนั้นสมการการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ แบบ Parameter optimization in iterative learning control จะได้ว่า

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \beta_{k+1} e_k(t+1) \quad (3.16)$$

ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการคำนวณ โดย  $\beta_{k+1}$  คือตัวแปรที่มีจำนวนรอบเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบ จะเห็นได้ว่าสมการ (3.16) ไม่มีความซับซ้อนและใช้ได้ง่ายกว่าสมการ (3.15) แต่ควรเลือกค่า  $\beta_{k+1}$  ให้เหมาะสมในแต่ละปัญหาที่พิจารณา ในการคำนวณหาอินพุตของรอบที่  $k+1$  จากสมการ (3.16) นั้นจะเห็นว่า จะต้องมีการคำนวณหาค่า  $\beta_{k+1}$  ก่อน และค่า  $\beta_{k+1}$  นี้สามารถหามาจากผลลัพธ์ของสมการควอดราติกที่ทำให้ได้ค่า  $\beta_{k+1}$  ที่เหมาะสมที่สุด สมการควอดราติกนี้คือ

$$\beta_{k+1}(t) = \arg \min_{\beta_{k+1}} \{J_{k+1}(\beta_{k+1}) : e_{k+1} = r - y_{k+1}, y_{k+1} = Gu_{k+1}\} \quad (3.17)$$

จะได้

$$J(\beta_{k+1}) = \|e_{k+1}\|^2 + w\beta_{k+1}^2 ; w \geq 0 \quad (3.18)$$

และเมื่อ  $e = r - Gu$  ค่าความสัมพันธ์จะได้

$$e_{k+1} = (I - \beta_{k+1}G)e_k, \quad \forall k \geq 0 \quad (3.19)$$

ที่สภาวะคงที่  $dJ/d\beta_{k+1} = 0$  (สภาวะจำเป็น) จะได้ค่า  $\beta_{k+1}$  เป็น

$$\beta_{k+1} = \frac{\langle e_k, Ge_k \rangle}{w + \|Ge_k\|^2} \quad (3.20)$$

สมการนี้เป็นสมการเริ่มต้นของการวิเคราะห์ของการลู่เข้าและอัตราการลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ แต่ว่าค่า  $\beta_{k+1}$  ยังสามารถคำนวณได้จาก  $e_k$  และ  $Ge_k$  ขณะที่เงื่อนไขเริ่มต้นเป็นศูนย์ หรือตามแต่ที่ระบบจะกำหนด

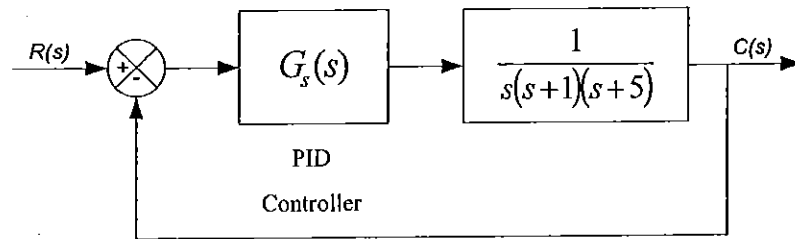
(สามารถติดตามผลการทดลองได้ที่บทที่ 4 ในหัวข้อที่ 4.1)

### 3.2 การปรับระดับการควบคุมของตัวควบคุมพีไอดี [6]

พิจารณาระบบการควบคุมที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.1 ที่ซึ่งตัวควบคุมพีไอดีถูกใช้ในการควบคุมระบบ โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$G_c(s) = K_p + \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) + T_d s \quad (3.21)$$

สำหรับระบบควบคุมพีไอดี ที่นำมาใช้ในปริญาณิพนธ์นี้ได้อ้างอิงมาจากหนังสือ Modern Control Engineering ของตัวอย่างที่ 10-1 หน้าที่ 674 และขั้นตอนการหาตัวควบคุมพีไอดีแบบ Unity feedback จะได้ดังรูปที่ 3.1



รูป 3.1 แสดงระบบควบคุมพีไอดี

เมื่อระบบมีการทำงานร่วมกัน จะใช้วิธีที่ 2 ของกฎ Ziegler – Nichols โดยตั้ง  $T_i = \infty$  และ  $T_d = 0$  จะได้ฟังก์ชันการถ่ายโอนวงจรมีดังนี้

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_p}{s(s+1)(s+5) + K_p} \quad (3.22)$$

ค่า  $K_p$  คือค่าที่ทำให้ระบบมีความเสถียรแบบขอบเขต (marginally stable) ดังนั้นจะได้สมการ Characteristic ของสมการของวงจรมีดังนี้

$$s^3 + 6s^2 + 5s + K_p = 0 \quad (3.23)$$

เพราะฉะนั้น จะสามารถจัดรูปได้เป็น

$s^3$	1	5
$s^2$	6	$K_p$
$s^1$	$\frac{30 - K_p}{6}$	
$s^0$	$K_p$	

ตัวอย่างของค่าสัมประสิทธิ์ของแถวแรกของตาราง Routh จะพบว่าไม่มีค่าที่ไม่คงที่ปรากฏอยู่ ถ้า  $K_p = 30$  ดังนั้นค่าวิกฤตที่ได้  $K_{cr}$  คือ

$$K_{cr} = 30 \quad (3.24)$$

และได้ค่า  $K_p$  เท่ากับค่า  $K_{cr} = 30$  สมการจะได้เป็น

$$s^3 + 6s^2 + 5s + 30 = 0 \quad (3.25)$$

การหาความถี่ของค่าที่ไม่คงที่จะแทน  $s = j\omega$  เข้าไปในสมการดังนี้

$$(j\omega)^3 + 6(j\omega)^2 + 5(j\omega) + 30 = 0 \quad (3.26)$$

หรือ 
$$6(5 - \omega^2) + j\omega(5 - \omega^2) = 0 \quad (3.27)$$

จะได้ค่าเท่ากับ  $\omega^2 = 5$  หรือ  $\omega = \sqrt{5}$  ดังนั้นช่วงของค่าที่ไม่คงก็คือ

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{5}} = 2.8099 \quad (3.28)$$

เมื่ออ้างอิงจากตารางที่ 2.2 สามารถกำหนด  $K_p, T_i$  และ  $T_d$  ได้ดังนี้

$$K_p = 0.6K_{cr} = 18 \quad (3.29)$$

$$T_i = 0.5P_{cr} = 1.405 \quad (3.30)$$

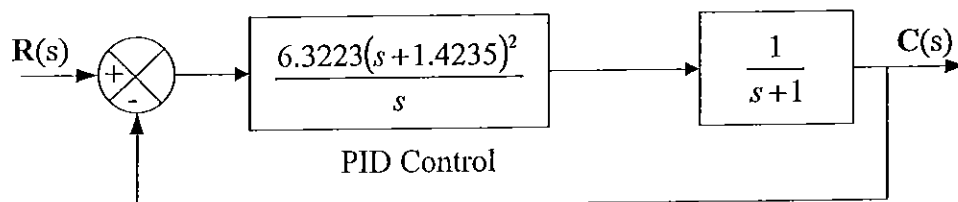
$$T_d = 0.125P_{cr} = 0.35124 \quad (3.31)$$

การเปลี่ยนย้ายของตัวควบคุมที่ไอดีเป็นดังนี้

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$= 18 \left( 1 + \frac{1}{1.405s} + 0.3514s \right)$$

$$= \frac{6.3223(s+1.4235)^2}{s} \quad (3.32)$$



รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพของระบบควบคุมกับการออกแบบตัวควบคุมที่ไอดี

(สามารถติดตามผลการทดลองได้ที่บทที่ 4 ในหัวข้อที่ 4.2)



จากเนื้อหาที่ได้กล่าวมาข้างต้นตามที่ได้กล่าวถึงทฤษฎีของระบบการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ และทฤษฎีระบบการควบคุมพีไอดี ที่จะนำมาเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละทฤษฎี

ทฤษฎีของระบบการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ จะใช้วิธีการของ Parameter optimization iterative learning control มาประยุกต์ใช้กับระบบที่จะทำการทดลองซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการคำนวณ

ทฤษฎีระบบการควบคุมพีไอดี จะเลือกใช้กฎของ Ziegler – Nichols ซึ่งจะกำหนดตัวควบคุมพีไอดีที่ถูกใช้ในการควบคุมของระบบ โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการที่ (3.23) และสำหรับระบบที่นำมาใช้ในการทดลองของระบบเพื่อหาค่าความผิดพลาดจะเป็นดังรูปที่ 3.2



## บทที่ 4

# ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างวิธีการของระบบการควบคุม ด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ (Iterative learning control, ILC) และระบบการควบคุมพีไอดี (Proportional Integral Derivative, PID)

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองเมื่อนำเอาวิธีการของระบบการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ และระบบการควบคุมพีไอดี มาเขียนในโปรแกรมเมทแลป ซึ่งจะสามารถแสดงผลการรันโปรแกรมออกมาและทำการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการของระบบการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ และระบบควบคุมพีไอดี โดยแสดงผลการทดลองในรูปของกราฟ

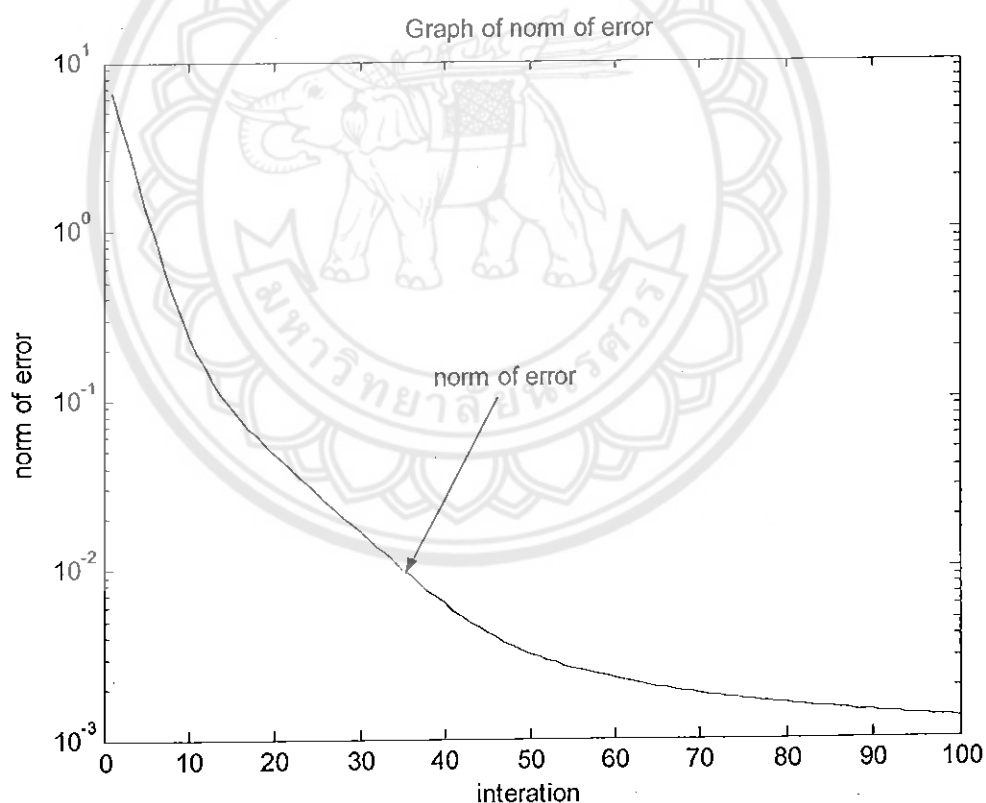


## 4.1 ผลที่ได้จากโปรแกรมแมทแลปโดยใช้การควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ

[ภาคผนวก ข]

### 4.1.1 การทดสอบโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง (first-order system)

จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเลือกใช้ค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0, 20]$  ในช่วงแซมปลิงตาม (sampling time)  $t_s = 0.1$  และ ค่าถ่วงน้ำหนัก  $w = 10^{-6}$  ซึ่งผลที่ออกมาจะแสดงดังรูปที่ 4.1 จะสังเกตเห็นว่าค่าความผิดพลาดของระบบจะลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความผิดพลาดนี้จะหาในรูปของนอร์ม (norm) และแสดงค่าในสเกลของเซมิล็อก (semilog) ซึ่งค่าความผิดพลาด (norm of error) เริ่มต้น ที่ได้จะเท่ากับ 6.6141 และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นไปที่ 10 รอบ จากนั้นจะค่อยๆลดลงจนถึงรอบที่ 80 ระบบก็จะเริ่มคงที่เท่ากับ 0.0013 และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบให้มากขึ้นค่าที่ได้ก็จะเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้นเรื่อยๆ



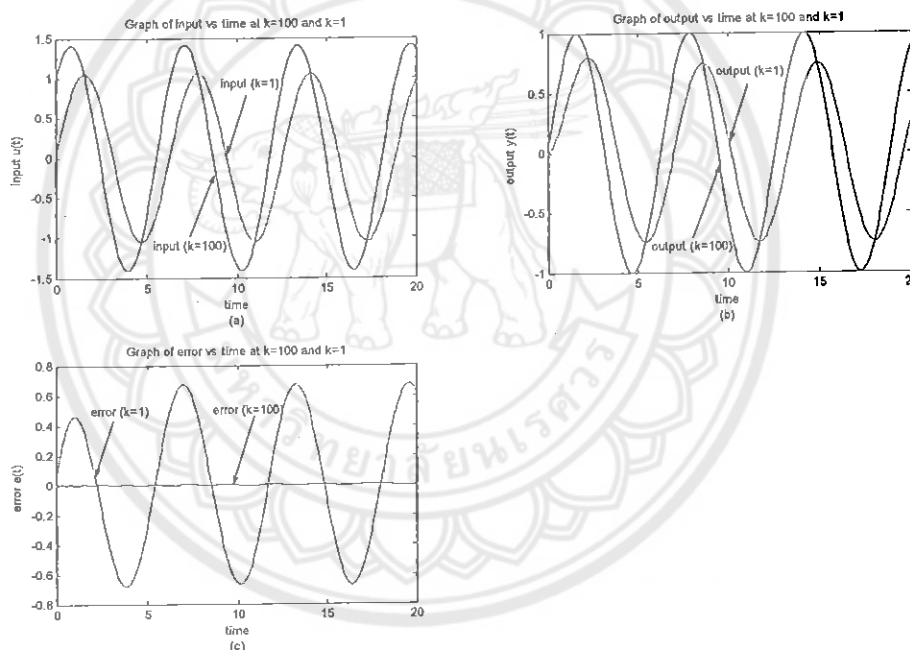
รูปที่ 4.1 แสดงค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์ม

จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเลือกใช้ค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0, 20]$  ในช่วงแซมปลิงตาม  $t_s = 0.1$  และ ค่าถ่วงน้ำหนัก  $w = 10^{-6}$  ซึ่งผลที่ออกมาจะแสดงดังรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 a แสดงค่าอินพุตจะเห็นว่าเมื่อรอบเพิ่มขึ้นอินพุตที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ

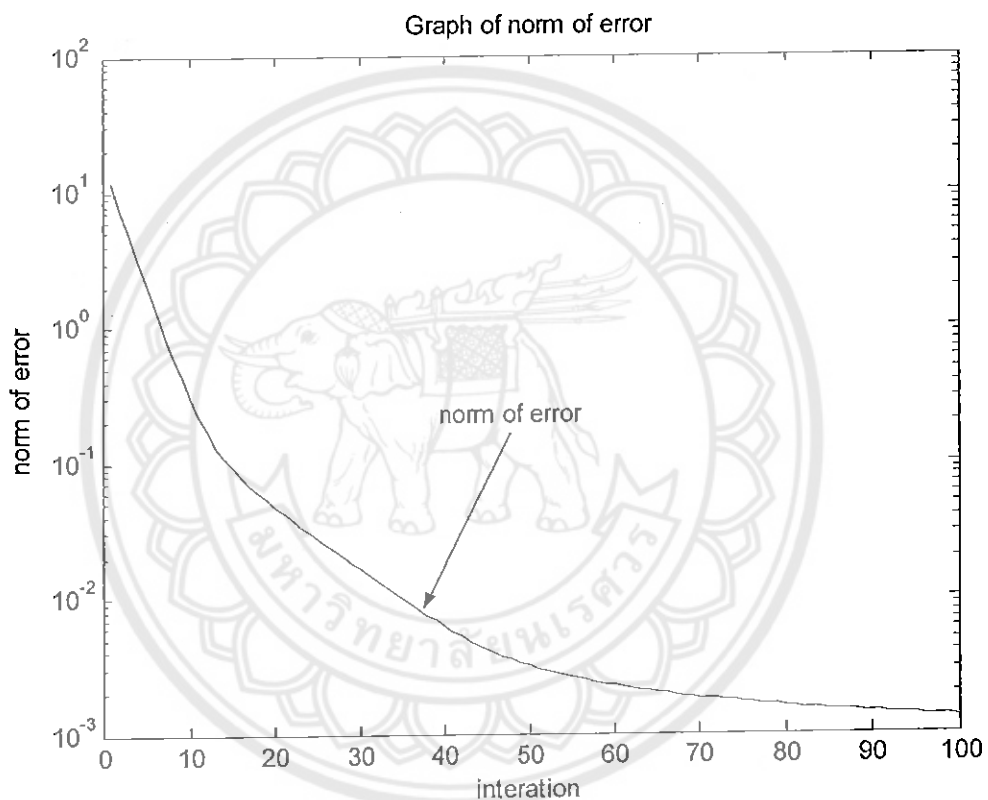
จากรูปที่ 4.2 b แสดงค่าเอาต์พุตจะเห็นว่าเมื่อรอบเพิ่มขึ้นเอาต์พุตที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ

จากรูปที่ 4.2 c แสดงค่าความผิดพลาดจะเห็นว่าในรอบแรกค่าความผิดพลาดจะมีค่าสูง จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงและเข้าใกล้ศูนย์เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ในรอบที่ 100 ค่าความผิดพลาดจะคงที่และมีค่าเท่ากับศูนย์ หากเทียบกับรูปที่ a และรูปที่ b จะเห็นว่าเมื่อค่าอินพุตและเอาต์พุตเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบค่าของความผิดพลาดก็จะลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงอินพุต  $u(t)$  เอาต์พุต  $y(t)$  และค่าความผิดพลาด  $e(t)$

จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยจะเลือกใช้อ้างอิง  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0, 20]$  ในช่วงแอมพลิจูด  $t_s = 0.1$  และค่าถ่วงน้ำหนัก  $w = 10^{-6}$  ซึ่งผลที่ออกมาจะแสดงดังรูปที่ 4.3 จะสังเกตเห็นว่าค่าความผิดพลาดของระบบจะลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความผิดพลาดนี้จะหาในรูปของนอร์ม และแสดงค่าในสเกลของเซมิล็อก ซึ่งค่าความผิดพลาด เริ่มต้นที่ได้จะเท่ากับ 11.8924 และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นไปที่ 15 รอบ จากนั้นจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆจนถึงรอบที่ 96 ระบบก็จะเริ่มคงที่เท่ากับ 0.0013 และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบให้มากขึ้นค่าที่ได้ก็จะเข้าใกล้ศูนย์มากขึ้นเรื่อยๆ



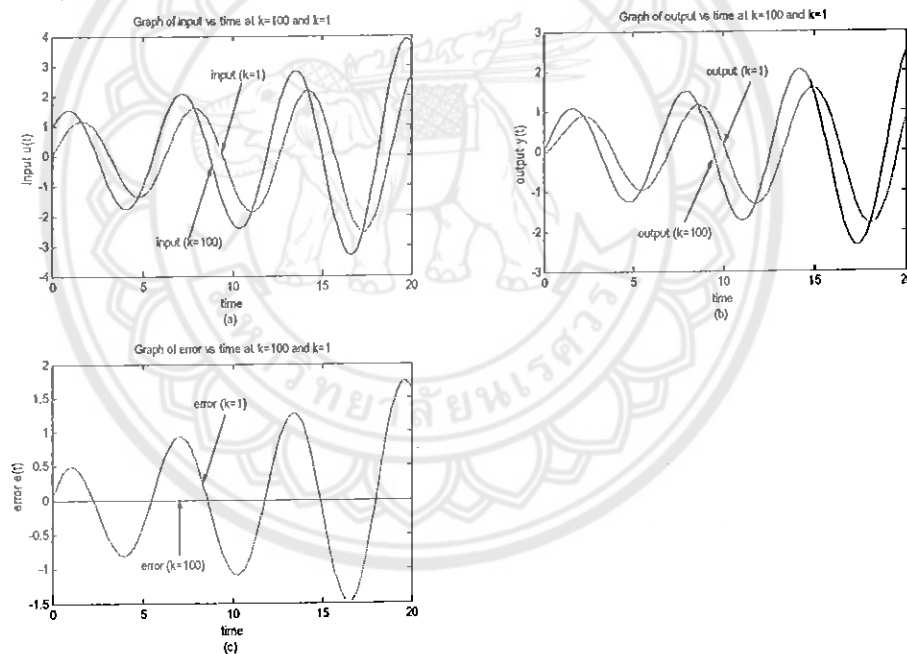
รูปที่ 4.3 แสดงค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์ม

จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยจะเลือกใช้ค่าอ้างอิง  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0, 20]$  ในช่วงแซมปลิงทาม  $t_s = 0.1$  และค่าถ่วงน้ำหนัก  $w = 10^{-6}$  ซึ่งผลที่ออกมาจะแสดงดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงอินพุต  $u(t)$ , เอาต์พุต  $y(t)$ , และค่าความผิดพลาด  $e(t)$

จากรูปที่ 4.4 a แสดงค่าอินพุตจะเห็นว่าเมื่อรอบเพิ่มขึ้นอินพุตที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ

จากรูปที่ 4.4 b แสดงค่าเอาต์พุตจะเห็นว่าเมื่อรอบเพิ่มขึ้นเอาต์พุตที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ

จากรูปที่ 4.4 c แสดงค่าความผิดพลาดจะเห็นว่าในรอบแรกค่าความผิดพลาดจะมีค่าสูง จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงและเข้าใกล้ศูนย์เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ในรอบที่ 100 ค่าความผิดพลาดจะคงที่และมีค่าเท่ากับศูนย์ หากเทียบกับรูปที่ a และรูปที่ b จะเห็นว่าเมื่อค่าอินพุตและเอาต์พุตเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบค่าของความผิดพลาดก็จะลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงอินพุต  $u(t)$  เอาต์พุต  $y(t)$  และค่าความผิดพลาด  $e(t)$

สรุปการทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  กับ  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$

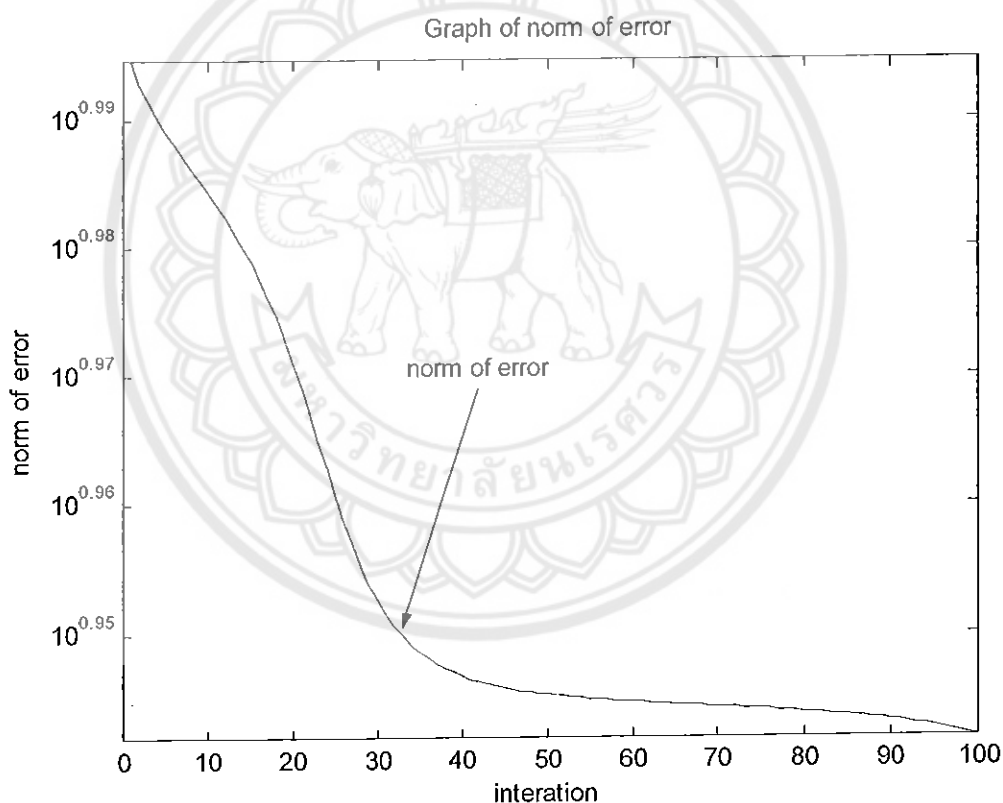
จากการทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  ที่แสดงดังรูปที่ 4.1, 4.2 กับ  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  ที่แสดงดังรูปที่ 4.3, 4.4 จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์มในรูปที่ 4.1 ให้ผลที่น่าพอใจกว่ารูปที่ 4.3 คือ จะมีความผิดพลาดเริ่มต้นน้อยกว่าและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนรอบที่เท่ากัน แต่รอบที่ 100 ค่าความผิดพลาดที่ได้จะมีค่าเท่ากันคือ 0.0013

พิจารณาในรูปที่ 4.2 และ 4.4 จะเห็นว่า ทั้งสองรูปจะได้ผลที่เหมือนกันคือ ค่าอินพุตที่ได้จะมีค่ามากกว่าค่าเอาต์พุตเสมอ และเมื่อจำนวนรอบเพิ่มมากขึ้นค่าอินพุตและเอาต์พุตก็จะเพิ่มขึ้น แต่รูปที่ 4.2 ค่าอินพุตและเอาต์พุตจะมีค่ามากกว่ารูปที่ 4.4 ส่วนค่าความผิดพลาดของทั้งสองรูปจะให้ผลคือ ในรอบแรกจะมีค่าสูงจากนั้นจะลดลงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นรูปที่ 4.2 จะมีค่าผิดพลาดน้อยกว่ารูปที่ 4.4



#### 4.1.2 การทดสอบโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง (second - order system)

จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยจะเลือกใช้ค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0, 20]$  ในช่วงแซมปลิงตาม  $t_s = 0.1$  และ ค่าถ่วงน้ำหนัก  $w = 10^{-6}$  ซึ่งผลที่ออกมาจะแสดงดังรูปที่ 4.5 จะสังเกตเห็นว่าค่าความผิดพลาดของระบบจะลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความผิดพลาดนี้จะหาในรูปของนอร์ม และแสดงค่าในสเกลของเซมิล็อก ซึ่งค่าความผิดพลาด เริ่มต้นที่ได้จะเท่ากับ 9.8762 และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นไปที่ 40 รอบ จากนั้นจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ จากนั้นค่าจะเริ่มคงที่และเข้าใกล้ศูนย์ โดยค่าที่ได้จากรอบที่ 100 เท่ากับ 8.7484 ถึงแม้ว่าค่าจะลดลงไม่มากและไม่เข้าใกล้ศูนย์ แต่ผลที่ได้นี้เป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวอ้างมาว่าจำนวนรอบเพิ่มมากขึ้นค่าความผิดพลาดก็จะลดลง



รูปที่ 4.5 แสดงค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์ม

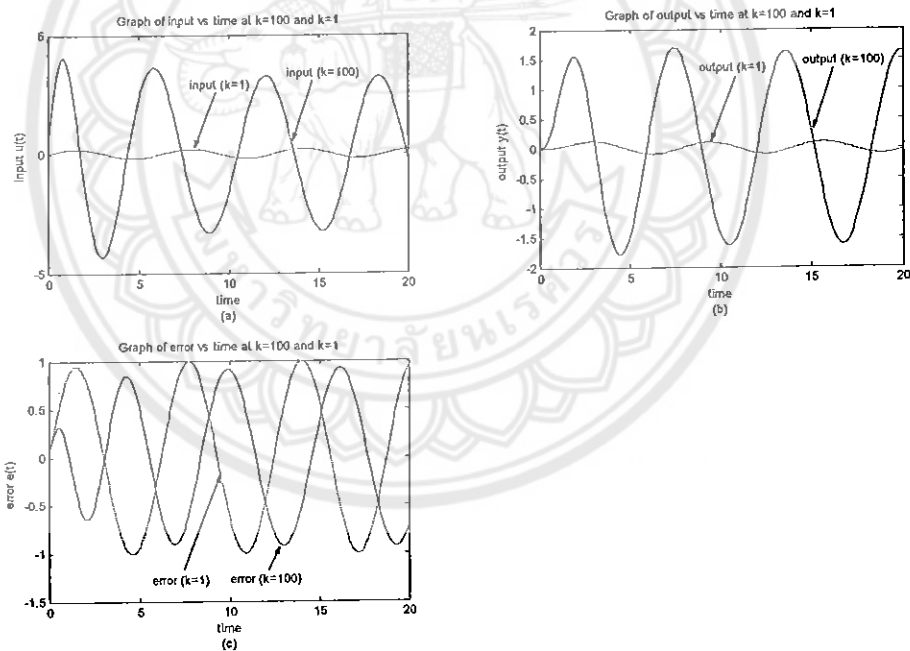


จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสองในการทดสอบโดยจะเลือกใช้อ้างอิง  $r = \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0, 20]$  ในช่วงแซมปลิงทาม  $t_s = 0.1$  และ ค่าวงนำหนัก  $w = 10^{-6}$  ซึ่งผลที่ออกมาจะแสดงดังรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงอินพุต  $u(t)$  เอาท์พุท  $y(t)$  และค่าความผิดพลาด  $e(t)$

จากรูปที่ 4.6 a แสดงค่าอินพุตจะเห็นว่าเมื่อรอบเพิ่มขึ้นอินพุตที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ

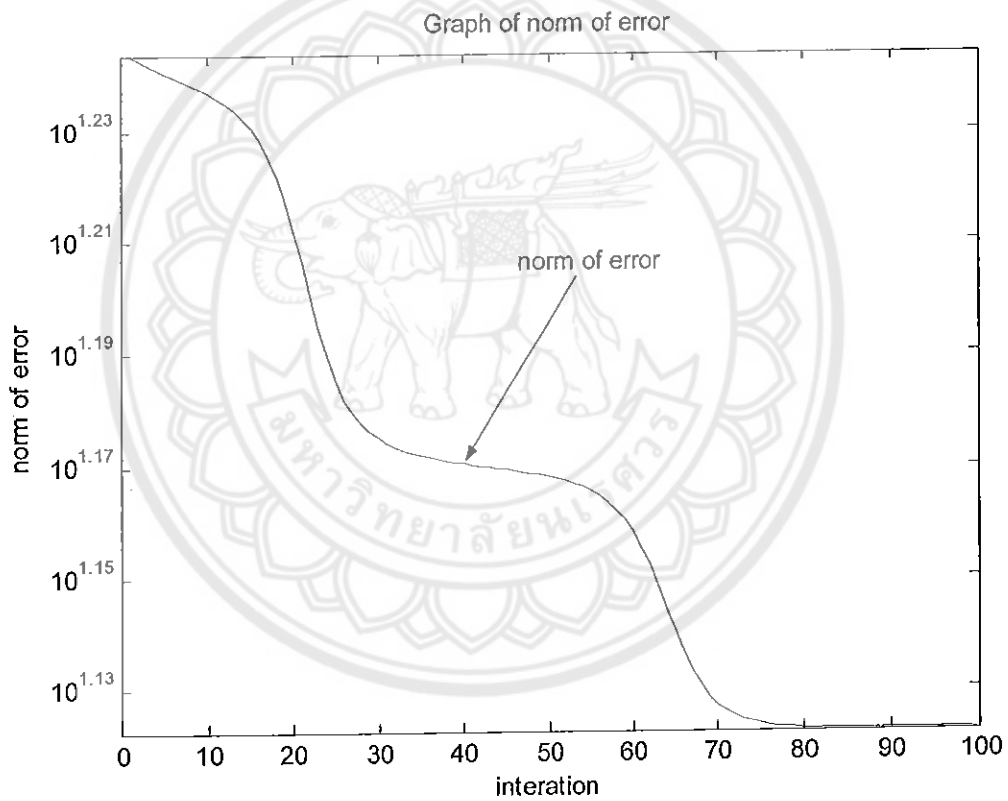
จากรูปที่ 4.6 b แสดงค่าเอาท์พุทจะเห็นว่าเมื่อรอบเพิ่มขึ้นเอาท์พุทที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ

จากรูปที่ 4.6 c แสดงค่าความผิดพลาดจะเห็นว่าในรอบแรกค่าความผิดพลาดจะมีค่าสูง จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงและเข้าใกล้ศูนย์เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าค่าที่ได้จากรอบที่ 100 ค่าความผิดพลาดจะลดลงไม่มากนัก หากเทียบกับรูปที่ a และรูปที่ b จะเห็นว่าเมื่อค่าอินพุตและเอาท์พุทเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบค่าความผิดพลาดก็จะลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงอินพุต  $u(t)$  เอาท์พุท  $y(t)$  และค่าความผิดพลาด  $e(t)$

จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยจะเลือกใช้ค่าอ้างอิง  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0, 20]$  ในช่วงแซมปลิงตาม  $t_s = 0.1$  และค่าถ่วงน้ำหนัก  $w = 10^{-6}$  ซึ่งผลที่ออกมาจะแสดงดังรูปที่ 4.7 จะสังเกตเห็นว่าค่าความผิดพลาดของระบบจะลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความผิดพลาดนี้จะหาในรูปของนอร์ม และแสดงค่าในสเกลของเซมิล็อก ซึ่งค่าความผิดพลาด เริ่มต้นที่ได้จะเท่ากับ 17.5461 และลดลงอย่างช้าๆ เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นไปที่ 15 รอบ จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ 16-29 และลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงรอบที่ 30-63 และจะลดลงอย่างรวดเร็วในรอบที่ 64-70 จากนั้นค่าจะเริ่มคงที่และเข้าใกล้ศูนย์ โดยค่าที่ได้จากรอบที่ 100 เท่ากับ 13.2511 ถึงแม้ว่าค่าจะลดลงไม่มากและไม่เข้าใกล้ศูนย์ แต่ผลที่ได้นี้เป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวอ้างมาว่าจำนวนรอบเพิ่มมากขึ้นค่าความผิดพลาดก็จะลดลง



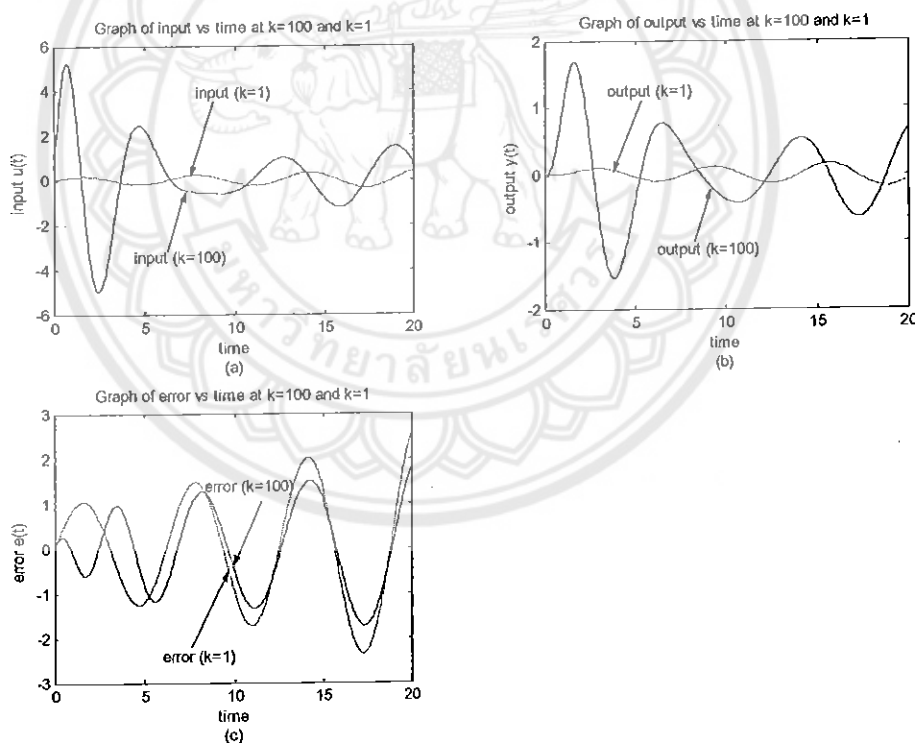
รูปที่ 4.7 แสดงค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์ม

จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสองในการทดสอบ โดยจะเลือกใช้อ้างอิง  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0, 20]$  ในช่วงแซมปลิงตาม  $t_s = 0.1$  และค่าถ่วงน้ำหนัก  $w = 10^{-6}$  ซึ่งผลที่ออกมาจะแสดงดังรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงอินพุต  $u(t)$  เอาท์พุท  $y(t)$  และค่าความผิดพลาด  $e(t)$

จากรูปที่ 4.8 a แสดงค่าอินพุตจะเห็นว่าเมื่อรอบเพิ่มขึ้นอินพุตที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ

จากรูปที่ 4.8 b แสดงค่าเอาท์พุทจะเห็นว่าเมื่อรอบเพิ่มขึ้นเอาท์พุทที่ได้ก็จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบ

จากรูปที่ 4.8 c แสดงค่าความผิดพลาดจะเห็นว่าในรอบแรกค่าความผิดพลาดจะมีค่าสูง จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงและเข้าใกล้ศูนย์เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น แต่จะเห็นว่าค่าที่ได้จากรอบที่ 1 และรอบที่ 100 ค่าความผิดพลาดจะลดลงไม่มากนัก หากเทียบกับรูปที่ a และรูปที่ b จะเห็นว่าเมื่อค่าอินพุทและเอาท์พุทเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบค่าของความผิดพลาดก็จะลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึง อินพุท  $u(t)$  เอาท์พุท  $y(t)$  และค่าความผิดพลาด  $e(t)$

สรุปการทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  กับ  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$

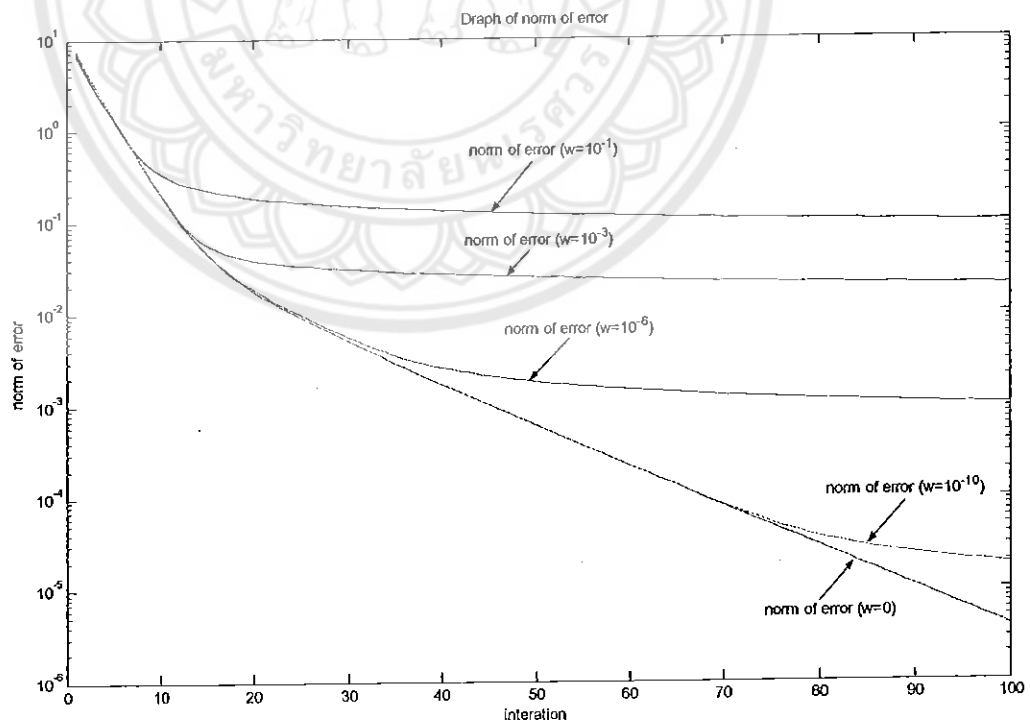
จากการทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  ที่แสดงดังรูปที่ 4.5, 4.6 กับ  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  ที่แสดงดังรูปที่ 4.7, 4.8 จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์มในรูปที่ 4.5 เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.7 จะมีความผิดพลาดเริ่มต้นน้อยกว่าและลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งในรอบที่ 100 จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากกว่ารูปที่ 4.7 ส่วนรูปที่ 4.7 มีค่าความผิดพลาดลดลงแบบขั้นบันได

พิจารณารูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าทั้งสองรูปจะได้ผลที่เหมือนกันคือ ค่าอินพุตที่ได้จะมีค่ามากกว่าเอาต์พุตเสมอและเมื่อจำนวนรอบเพิ่มมากขึ้นอินพุตและเอาต์พุตก็จะเพิ่มขึ้น แต่รูปที่ 4.6 ค่าอินพุตและเอาต์พุตจะมีค่ามากกว่ารูปที่ 4.8 ส่วนค่าความผิดพลาดของทั้งสองรูปจะให้ผลคือ ในรอบแรกจะมีค่าสูงจากนั้นจะลดลงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น และจะเห็นว่าค่าที่ได้จากรอบที่ 1 และรอบที่ 100 ค่าความผิดพลาดจะลดลงไม่มากนัก แต่รูปที่ 4.6 จะมี ค่าผิดพลาดน้อยกว่ารูปที่ 4.8



### 4.1.3 การทดสอบโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง เมื่อค่าตัวนำหนักมีการเปลี่ยนแปลง

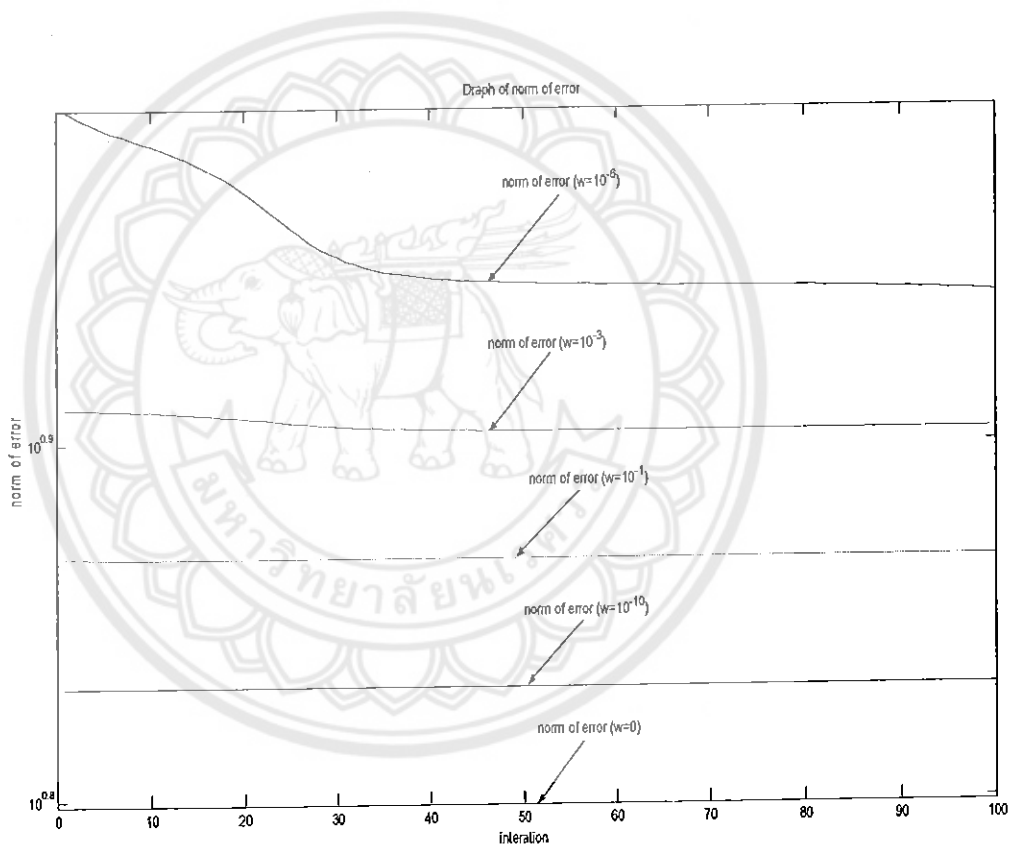
จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบ โดยจะเลือกใช้ค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0, 20]$  ในช่วงแอมพลิจูด  $t_r = 0.1$  เมื่อค่าตัวนำหนักมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก  $w = 0, 10^{-1}, 10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-10}$  ตามลำดับจะได้ผลดังรูป 4.9 จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดจะลดอย่างรวดเร็วและเท่ากันในรอบที่ 1-10 เมื่อค่า  $w$  มีค่ามากจะทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงได้ช้าและมีค่าไม่เข้าใกล้ศูนย์ โดยที่จำนวนรอบเท่ากันและเมื่อค่า  $w$  มีค่าน้อยทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงได้อย่างรวดเร็วและมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ โดยค่าความผิดพลาดนี้จะหาในรูปของนอร์ม เมื่อ  $w = 0$  จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดจะลดลงอย่างรวดเร็วจากรอบที่ 1-100 และมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด เมื่อ  $w = 10^{-1}$  จะเห็นว่าค่าจะลดลงอย่างรวดเร็วในรอบที่ 1-10 และจากนั้นค่าจะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ และเริ่มคงที่ เมื่อ  $w = 10^{-3}$  จะเห็นว่าค่าจะลดลงอย่างรวดเร็วในรอบที่ 1-20 จากนั้นค่าจะลดลงอย่างช้าๆ และเริ่มคงที่ เมื่อ  $w = 10^{-6}$  จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงรอบที่ 1-15 จากนั้นค่าได้ลดลงอย่างสม่ำเสมอและเข้าใกล้ศูนย์ในที่สุด ซึ่งเหมาะที่จะทำให้ระบบมีความเสถียรภาพ เมื่อ  $w = 10^{-10}$  จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดจะลดลงอย่างรวดเร็วจากรอบที่ 1-90 จากนั้นค่าจะลดลงอย่างช้าๆ และเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งค่าตัวนำหนัก  $w = 0$  จะมีค่าเข้าสู่ศูนย์มากกว่าค่าตัวนำหนัก  $w = 10^{-1}, 10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-10}$



รูปที่ 4.9 แสดงค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์ม เมื่อค่าตัวนำหนักมีค่าเปลี่ยนแปลง ( $w$ )

### 4.1.4 การทดสอบโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลง

จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยเลือกใช้ค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0, 20]$  ในช่วง แซมปลิงทาม  $t_s = 0.1$  เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก  $w = 0, 10^{-1}, 10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-10}$  ตามลำดับจะได้ผลดังรูปที่ 4.10 จากรูปจะสังเกตเห็นว่า  $w = 0, 10^{-1}, 10^{-3}$  จะมีค่าความผิดพลาดคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งจะไม่เหมาะสมกับระบบ เนื่องจากว่าค่าความผิดพลาดลดลงน้อยมากเกือบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ ส่วนที่  $w = 10^{-6}$  จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดจะมีค่าลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีความเหมาะสมกับระบบ



รูปที่ 4.10 แสดงค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์ม เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเปลี่ยนแปลง (w)

สรุปการทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง กับระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยเลือกค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  และเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก  $w = 0, 10^{-1}, 10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-10}$

จากการทดลองจะเห็นว่าในรูปที่ 4.9 ใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบ โดยเลือกค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  เมื่อค่า  $w$  มีค่ามาก ค่าความผิดพลาดก็จะลดลงอย่างช้าๆ เมื่อค่า  $w$  มีค่าน้อยค่าความผิดพลาดก็จะลดลงอย่างรวดเร็วและเข้าใกล้ศูนย์มากกว่าค่า  $w$  ที่มีค่ามาก

ส่วนรูปที่ 4.1 ใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบ โดยเลือกค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  เมื่อค่า  $w = 0, 10^{-1}, 10^{-3}, 10^{-10}$  จะมีค่าความผิดพลาดคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งจะไม่เหมาะสมกับระบบ เนื่องจากว่าค่าความผิดพลาดลดลงน้อยมาก เกือบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่กำหนดไว้ ส่วนที่ค่า  $w = 10^{-6}$  จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดจะมีค่าลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีความเหมาะสมกับระบบ

แต่จะเห็นได้จากการทดลองที่ผ่านมาว่าจะใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก  $w = 10^{-6}$  เพราะว่าจะทำให้ระบบมีความเสถียรภาพหรือทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากที่สุด คือสามารถทำให้ระบบมีค่าความผิดพลาดลดลงมากที่สุด

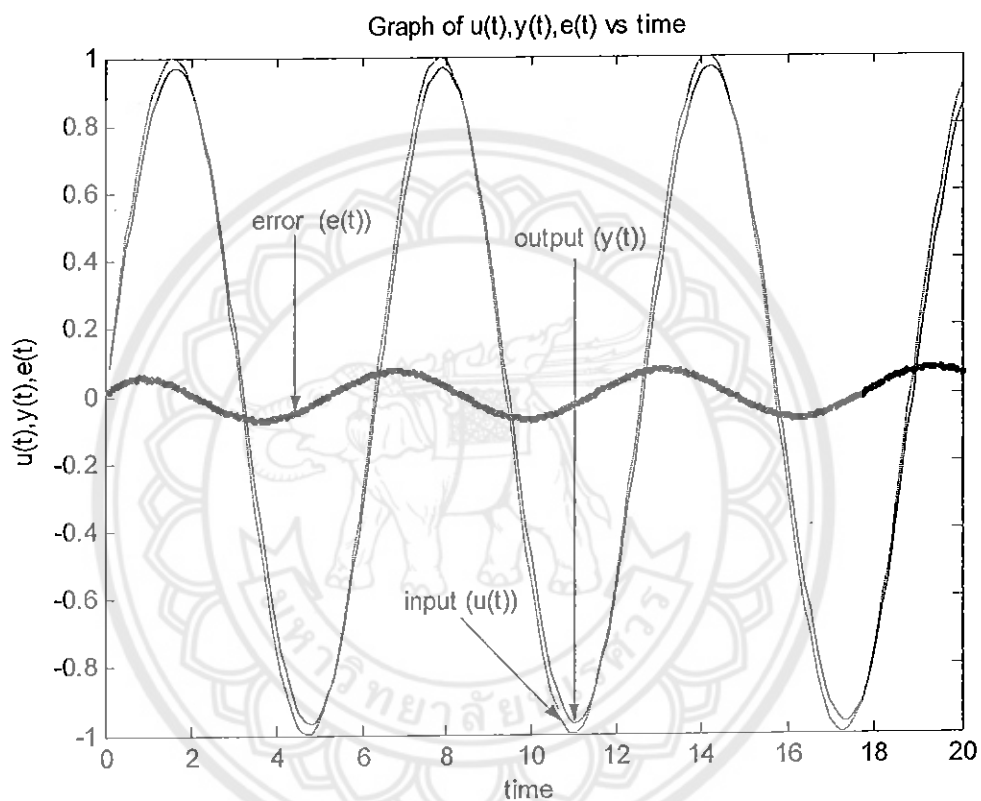
สรุปการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง กับระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ของการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ

จากการทดลองระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง เป็นระบบที่ให้ค่าความผิดพลาดเป็นที่น่าพอใจและให้ค่าความผิดพลาดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากกว่า การทดลองระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง เนื่องจากว่าระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง เป็นระบบที่ง่าย ส่วนระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง เป็นระบบที่มีความซับซ้อนยุ่งยาก

## 4.2 ผลที่ได้จากโปรแกรมแมทแลบโดยใช้ระบบควบคุมพีไอดี [ภาคผนวก ข]

### 4.2.1 การทดสอบโดยระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง

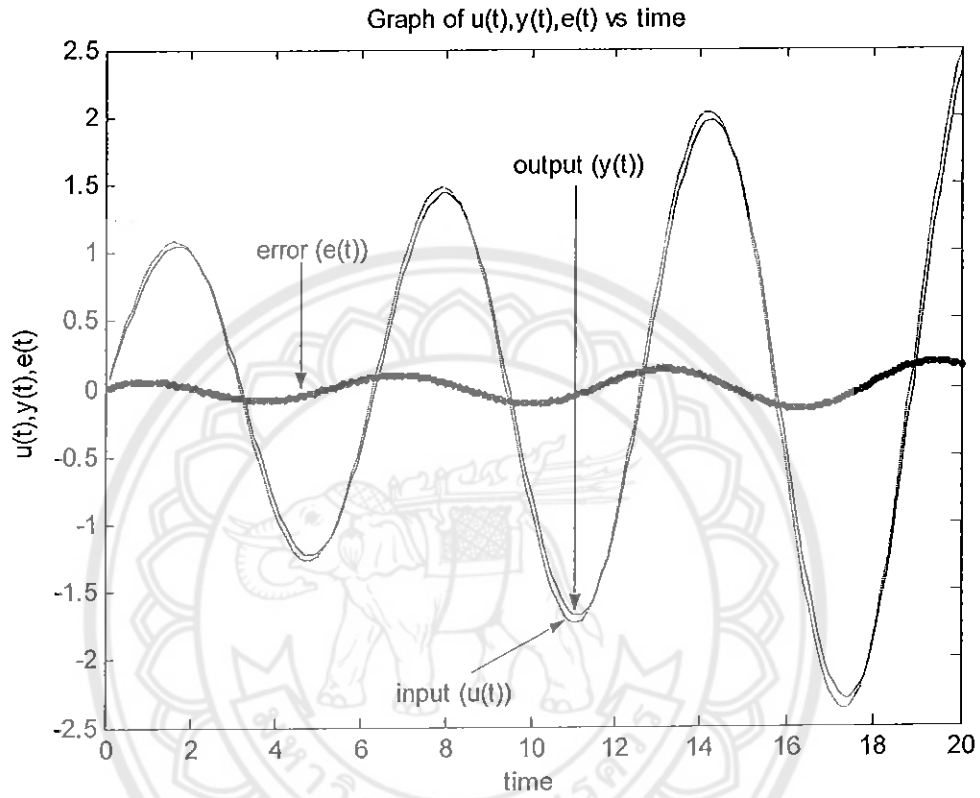
จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบ โดยจะเลือกใช้ค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0, 20]$  ในช่วงแซมปลิงตาม  $t_s = 0.1$  แสดงผลดังรูปที่ 4.11 จากรูปจะสังเกตเห็นว่าค่าอินพุตจะมีค่ามากกว่าค่าเอาต์พุต แต่ไม่มากนัก ส่วนค่าความผิดพลาดจะเห็นว่าไม่เข้าใกล้ศูนย์และจะเป็นค่าเดิมตลอดไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.11 แสดงค่าเอาต์พุต อินพุต และค่าความผิดพลาดเทียบกับเวลา



จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยจะเลือกใช้ ค่าอ้างอิง  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0,20]$  ในช่วงแซมปลิงทาม  $t_s = 0.1$  แสดงผลดังรูปที่ 4.12 จากรูปจะสังเกตเห็นว่าค่าอินพุตที่ได้จะมี มากกว่าเอาต์พุต แต่ไม่มากนัก ส่วนค่าความผิดพลาดจะเห็นว่าไม่เข้าใกล้ศูนย์และจะเป็นค่าเดิมตลอดไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.12 แสดงค่าเอาต์พุต อินพุต และค่าความผิดพลาดเทียบกับเวลา

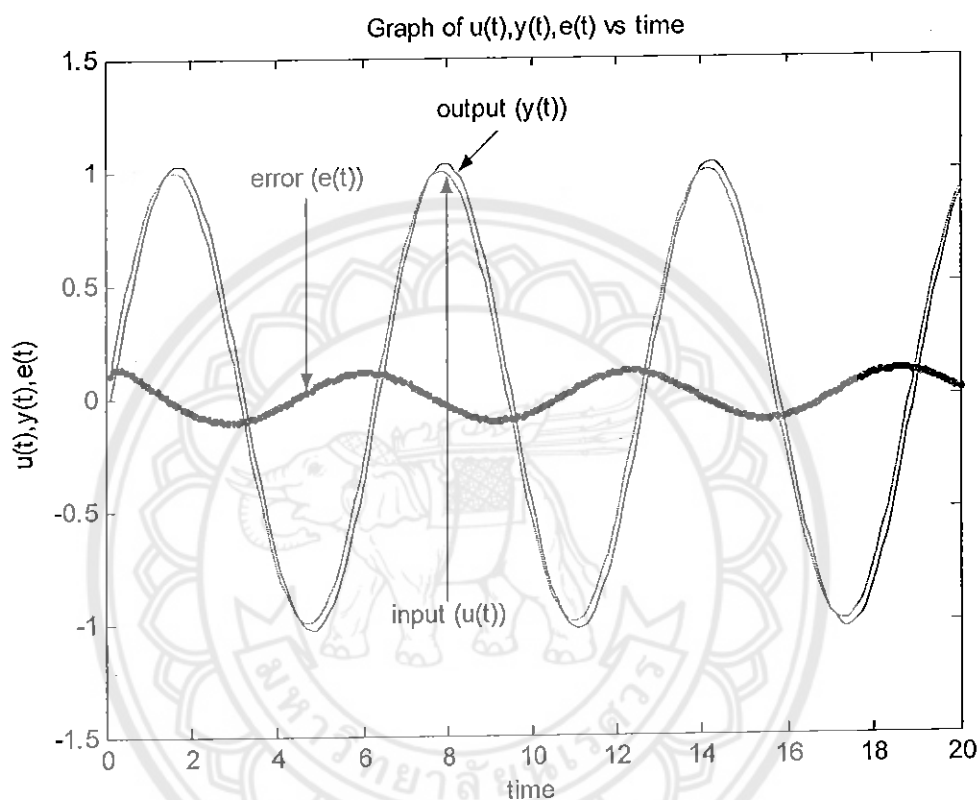
สรุปการทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  กับ  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$

จากการทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง ที่แสดงดังรูปที่ 4.11 กับ  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  ที่แสดงดังรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าทั้งสองรูปจะได้ผลที่เหมือนกันคือ ค่าอินพุตมีค่ามากกว่าเอาต์พุตเสมอ ส่วนค่าความผิดพลาดจะเห็นว่าไม่เข้าใกล้ศูนย์และจะเป็นค่าเดิมตลอดไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ค่าความผิดพลาดรูปที่ 4.11 จะมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่ารูปที่ 4.12



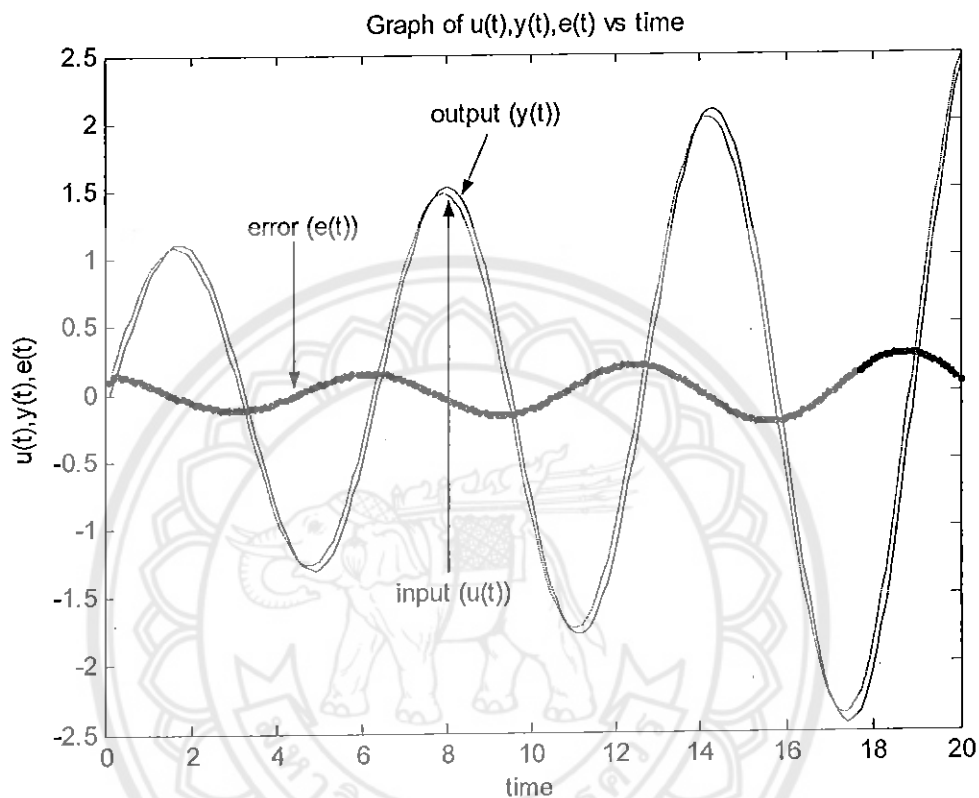
#### 4.2.2 การทดสอบโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง

จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบ โดยเลือกใช้ค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0, 20]$  ในช่วงแซมปลิงตาม  $t_s = 0.1$  แสดงผลดังรูปที่ 4.13 จากรูปจะสังเกตเห็นว่าค่าอินพุตจะมีค่าน้อยกว่าค่าเอาต์พุต แต่ก็ไม่มากนัก ส่วนค่าความผิดพลาดจะเห็นว่าไม่เข้าใกล้ศูนย์และจะเป็นค่าเดิมตลอดไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.13 แสดงค่าเอาต์พุต อินพุต และค่าความผิดพลาดเทียบกับเวลา

จากการทดลองจะใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยจะเลือกใช้ค่าอ้างอิง  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  ที่มีช่วงเวลา  $t \in [0,20]$  ในช่วงแซมปลิงตาม  $t_s = 0.1$  แสดงผลดังรูปที่ 4.14 จากรูปจะสังเกตเห็นว่าค่าอินพุตจะมีค่าน้อยกว่าค่าเอาต์พุต แต่ไม่มากนัก ส่วนค่าความผิดพลาดจะเห็นว่าไม่เข้าใกล้ศูนย์และจะเป็นค่าเดิมตลอดไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.14 แสดงค่าเอาต์พุต อินพุต และค่าความผิดพลาดเทียบกับเวลา

**สรุปการทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  กับ  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$**

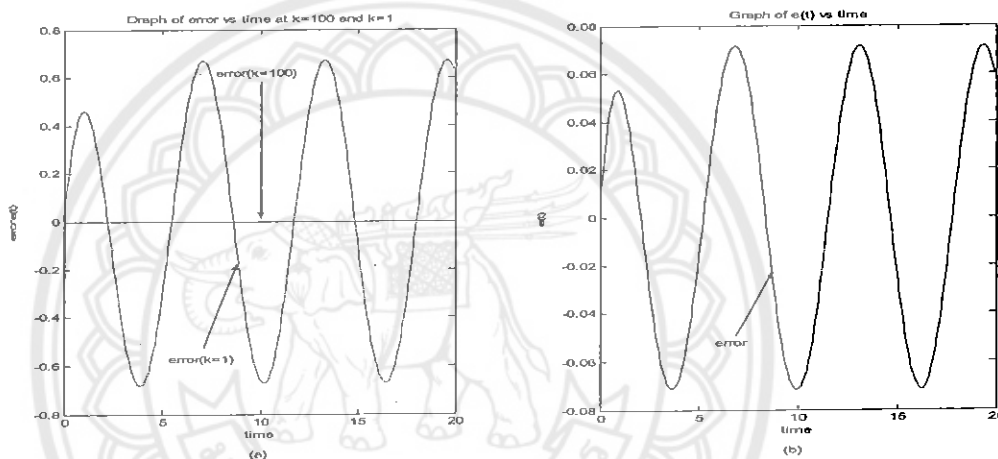
จากการทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  ที่แสดงดังรูปที่ 4.13 กับ  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  ที่แสดงดังรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าทั้งสองรูปจะได้ผลที่เหมือนกันคือ ค่าอินพุตจะมีค่าน้อยกว่าเอาต์พุตเสมอ ส่วนค่าความผิดพลาดจะเห็นว่าไม่เข้าใกล้ศูนย์และจะเป็นค่าเดิมตลอดไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ค่าความผิดพลาดรูปที่ 4.13 จะมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่ารูปที่ 4.14

**สรุปการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง กับระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ของระบบควบคุมพีไอดี**

จากการทดลองระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง เป็นระบบที่ให้ค่าความผิดพลาดเป็นที่น่าพอใจและให้ค่าความผิดพลาดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากกว่าการทดลองระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ของระบบเนื่องจากว่าระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่งเป็นระบบที่ง่าย ส่วนระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง เป็นระบบที่มีความซับซ้อนยุ่งยาก ทั้งนี้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ให้ค่าอินพุตจะมีค่าน้อยกว่าเอาต์พุต และระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง จะให้ค่าอินพุตจะมีค่ามากกว่าเอาต์พุต

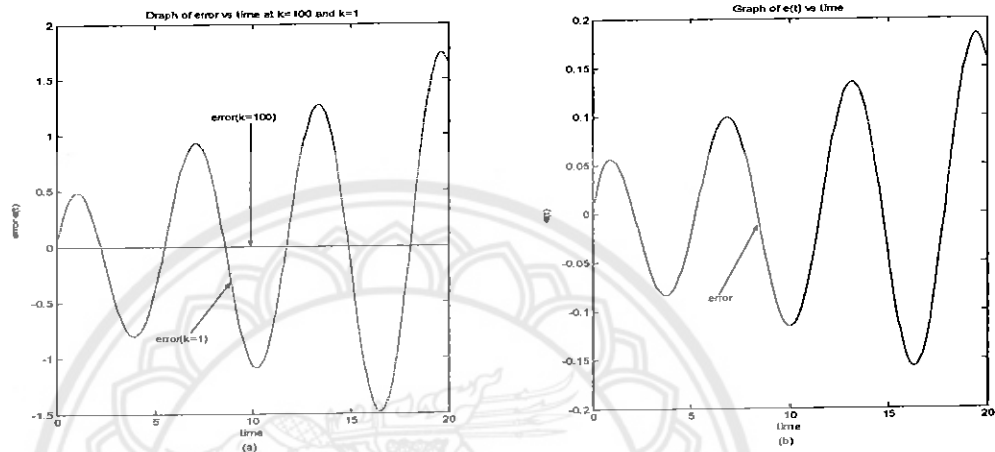
### 4.3 สรุปผลการเปรียบเทียบที่ได้จากโปรแกรมแมทแล็บโดยใช้การควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ กับระบบควบคุมพีไอดี

การทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  จะเห็นว่า การควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ ที่แสดงดังรูปที่ 4.15 a ให้ผลที่เป็นที่น่าพอใจกว่าระบบควบคุมพีไอดี ที่แสดงดังรูปที่ 4.15 b เพราะว่าการผิดพลาดในรูปของนอร์มของการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำได้ล้ารอบที่ 100 เท่ากับ 0.0013 ส่วนระบบควบคุมพีไอดีนั้นได้ค่าเท่ากับ 0.7085



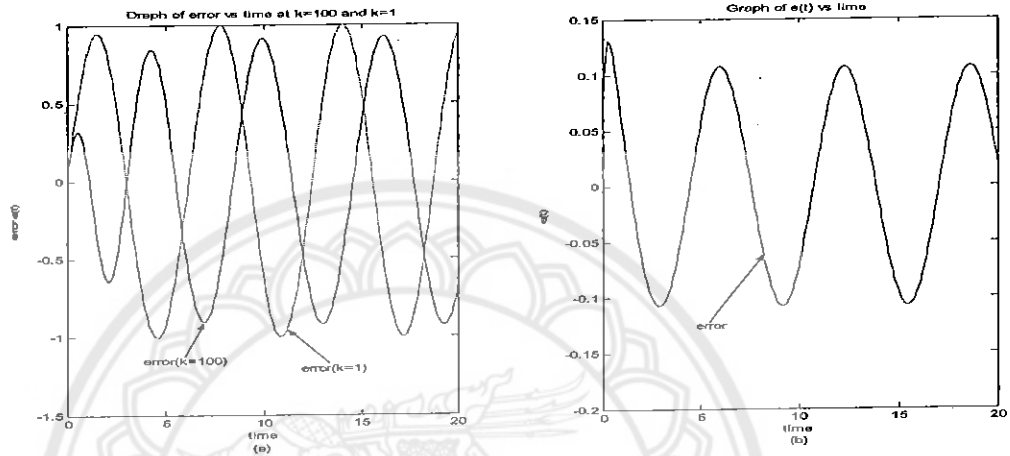
**รูปที่ 4.15** การเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ กับระบบควบคุมพีไอดี ที่ทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$

การทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  จะเห็นว่า การควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ ที่แสดงดังรูปที่ 4.16 a ให้ผลที่เป็นที่น่าพอใจกว่าระบบควบคุมพีไอดี ที่แสดงดังรูปที่ 4.16 b เพราะค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์มของการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำได้ค่ารอบที่ 100 เท่ากับ 0.0013 ส่วนระบบควบคุมพีไอดีนั้นได้ค่าเท่ากับ 1.2795



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ กับระบบควบคุมพีไอดี ที่ทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$

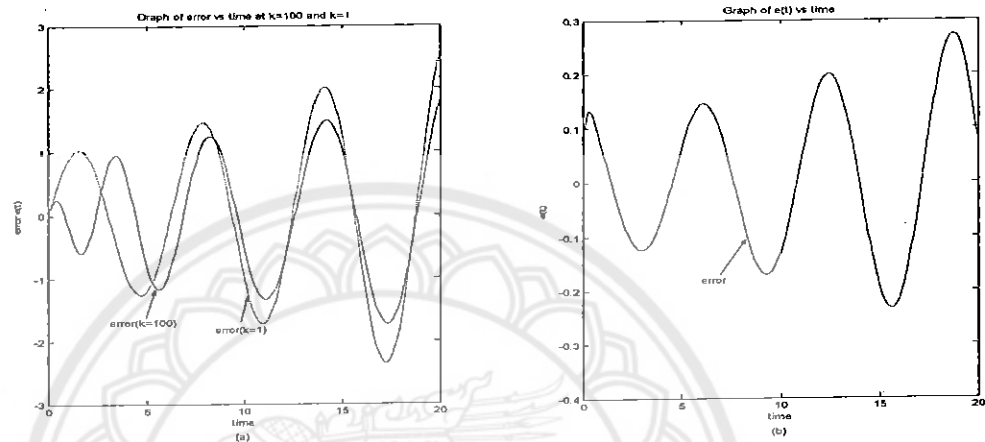
สรุปการทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  จะเห็นว่าระบบควบคุมพีไอดี ที่แสดงดังรูปที่ 4.17 b ให้ผลที่เป็นที่น่าพอใจกว่าการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ ที่แสดงดังรูปที่ 4.17 a เพราะค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์มของระบบควบคุมพีไอนั้นได้ค่าเท่ากับ 1.0940 ส่วนการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำได้ค่ารอบที่ 100 เท่ากับ 8.7484



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ กับระบบควบคุมพีไอดี ที่ทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$



การทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  จะเห็นว่าระบบควบคุมพีไอดี ที่แสดงดังรูปที่ 4.18 b ให้ผลที่เป็นที่น่าพอใจกว่าการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ ที่แสดงดังรูปที่ 4.18 a เพราะว่าค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์มของระบบควบคุมพีไอนั้นได้ค่าเท่ากับ 1.9499 ส่วนการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำได้ค่ารอบที่ 100 เท่ากับ 13.2511



**รูปที่ 4.18** การเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ กับระบบควบคุมพีไอดี ที่ทดลอง โดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$

## บทที่ 5

# สรุปผลและแนวทางในการพัฒนา

### 5.1 ผลการดำเนินงาน

จากการทดลองเปรียบเทียบระหว่างวิธีการควบคุมด้วยระบบเรียนรู้แบบทำซ้ำ (Iterative learning control, ILC) กับวิธีระบบควบคุมแบบพีไอดี (Proportional Integral Derivative, PID) เมื่อใช้ระบบฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง (first-order system) ทำให้ทราบว่าวิธีการควบคุมด้วยระบบเรียนรู้แบบทำซ้ำ ได้ค่าความผิดพลาดลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นและให้ผลที่น่าพอใจกว่าเพราะค่าความผิดพลาดที่ได้มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงศูนย์ มากกว่าวิธีการควบคุมแบบพีไอดี แต่เมื่อใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง (second-order system) ทำให้ทราบว่าระบบควบคุมแบบพีไอดี จะให้ผลที่น่าพอใจกว่าวิธีการควบคุมด้วยระบบเรียนรู้แบบทำซ้ำ

#### 5.1.1 ผลการเปรียบเทียบที่ได้จากโปรแกรมเมทแลบโดยใช้การควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ กับระบบควบคุมพีไอดี

การทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  จะเห็นว่าการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ ให้ผลที่เป็นที่น่าพอใจกว่าระบบควบคุมพีไอดี เพราะค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์มของการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำได้ค่าน้อยกว่าระบบควบคุมพีไอดี

การทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังหนึ่ง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  จะเห็นว่าการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ ให้ผลที่เป็นที่น่าพอใจกว่าระบบควบคุมพีไอดี เพราะค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์มของการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำได้ค่าน้อยกว่าระบบควบคุมพีไอดี

การทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = \sin(t)$  จะเห็นว่าระบบควบคุมพีไอดี ให้ผลที่เป็นที่น่าพอใจกว่าการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ เพราะค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์มของระบบควบคุมพีไอดีนั้นได้ค่าน้อยกว่าการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ

การทดลองโดยใช้ระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง ในการทดสอบโดยเปรียบเทียบค่าอ้างอิง  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$  จะเห็นว่าระบบควบคุมพีไอดี ให้ผลที่เป็นที่น่าพอใจกว่าการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ เพราะค่าความผิดพลาดในรูปของนอร์มของระบบควบคุมพีไอดีได้ค่าน้อยกว่าการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ

## 5.2 ปัญหาที่พบขณะดำเนินโครงการ

1. เนื่องจากคำสั่งบางคำสั่งในโปรแกรมแมทแลป ผู้ดำเนินโครงการยังไม่มี ความเข้าใจอย่างถ่องแท้ ซึ่งต้องใช้เวลาศึกษา
2. เนื่องจากว่าทฤษฎีการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ เป็นเรื่อง ที่ใหม่ทำให้ได้เนื้อหาที่จะนำมาใช้อ้างอิงในปริยญาณพนธ์มีไม่มากนัก
3. เนื่องจากข้อมูลหรือเนื้อหาส่วนใหญ่เป็นภาษาอังกฤษ ทำให้ผู้ดำเนินโครงการต้องใช้ความพยายามในการแปลข้อมูล จึงทำให้ได้ข้อมูลที่ล่าช้า

## 5.3 แนวทางในการพัฒนา

1. ทฤษฎีการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ เป็นเรื่องใหม่สำหรับวงการอุตสาหกรรมในประเทศไทย ควรจะมีการศึกษาและวิจัยเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาทฤษฎีให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
2. ควรจะศึกษาในระบบที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการที่มีกำลังเพิ่มขึ้นเพื่อศึกษาค่าความผิดพลาดต่างๆที่เกิดขึ้นของระบบ



## เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Amann, D.H. Owens, E.Rogers, *Iterative learning control for discrete-time systems with exponential rate of convergence*, with the Centre for Systems & Control Engineering, University of Exeter, North Park Road, Exeter EX4 4QF, UK.
- [2] D.H. Owens, J. Hatonen, *Iterative learning control-An optimization paradigm*, Department of Automatic Control and Systems Engineering, The University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield S1 3JD, UK
- [3] Matt Krass, *PID Control Theory*, Last updated: April 10<sup>th</sup>, copyright@ 2005-2009 Hauppauge Robotics. All rights reserved. Best Viewed at 1024x768 resolution in Internet Explorer 7.0 or FireFox 2.x <http://www.team358.org/>
- [4] <http://www.4uengineer.com>
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/PID\\_controller#PID\\_controller\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller#PID_controller_theory)
- [6] KATSUHIKO OGATA, *Modern Control Engineering*, 3<sup>rd</sup> Simon & Schuster / A Viacom Company Upper Saddle River, Prentice-Hall, Inc., 1997.
- [7] <http://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/example/pid/robot.http>
- [8] D.H. Owens, K. FENG, *Parameter optimization in iterative learning control*, Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield S1 3JD, England.
- [9] [http://eng.sut.ac.th/me/3\\_2551/436307/slide%20of%20Automatic%20control/StateSpace%20Representation%20of%20TF%20system%20week2.ppt#267,1,Analysis of Control System in State Space](http://eng.sut.ac.th/me/3_2551/436307/slide%20of%20Automatic%20control/StateSpace%20Representation%20of%20TF%20system%20week2.ppt#267,1,Analysis of Control System in State Space)
- [10] โสภณา แจ่มใจ, กนต์ธร ชำนิประศาสน์, *การใช้ MATLAB สำหรับงานทางวิศวกรรม*, ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์แห่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [11] Dean K. Frederick Joe H, *Feedback Control Problems Using MATLAB and The Control System Toolbox*, Chow Rensselaer Polytechnic Institute by PWS Publishing Company, a division of International Thomson Publishing, Inc., 1995.



## การแปลงระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนกับตัวแทนปริภูมิสถานะ [9]

ในกรณีระบบ SISO ทั่วไป หากมีฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนให้เป็นระบบตัวแปรสถานะในรูปแบบบัญญัติ (Canonical form)

1. รูปแบบควบคุมได้ (Controllability form)
2. รูปแบบสังเกตได้ (Observability form)
3. รูปแบบทแยง (Diagonal form)
4. รูปแบบจอร์แดน (Jordan form)

จากรูปแบบ Transfer Function

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

### 1. รูปแบบควบคุมได้ (Controllability form)

เป็นรูปแบบ State space

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

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

ตัวอย่าง

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{s+3}{s^2+3s+2}$$

เป็นรูปแบบ State space

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [3 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

## 2. รูปแบบสังเกตได้ (Observability form)

เป็นรูปแบบ State space

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

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

ตัวอย่าง

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{s+3}{s^2+3s+2}$$

เป็นรูปแบบ State space

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -2 \\ 1 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

## 3. รูปแบบทแยง (Diagonal form)

เป็นรูปแบบ State space

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^n + b_1 s^{n-1} + \cdots + b_{n-1} s + b_n}{(s+p_1)(s+p_2) \cdots (s+p_n)}$$

$$= b_0 + \frac{c_1}{s+p_1} + \frac{c_2}{s+p_2} + \cdots + \frac{c_n}{s+p_n}$$

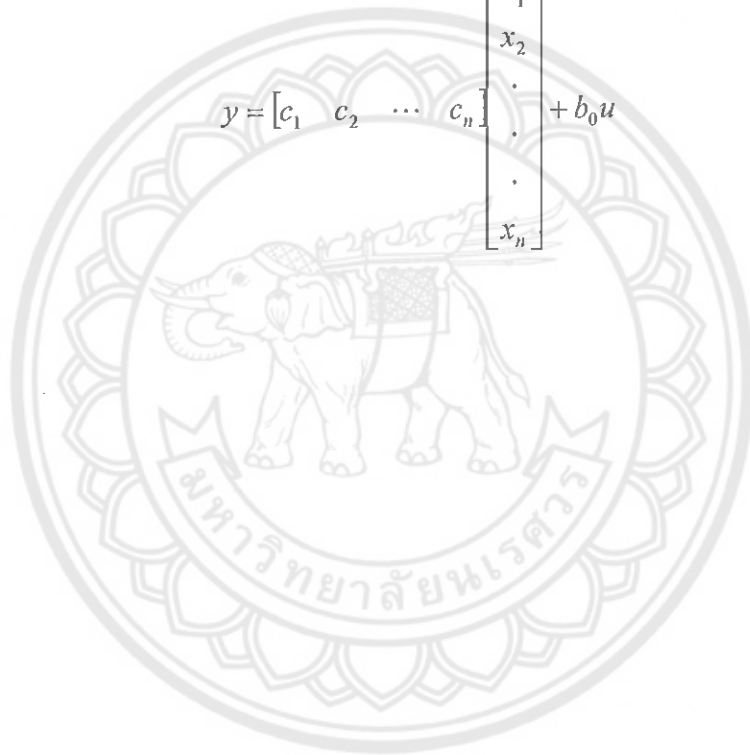




จะได้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_1 & 1 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & -p_1 & 1 & \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & -p_1 & 0 & \cdot & & & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -p_4 & & & & 0 \\ \cdot & & \cdot & & \cdot & & & \\ \cdot & & \cdot & & \cdot & & & \\ \cdot & & \cdot & & \cdot & & & \\ 0 & \dots & 0 & 0 & & & & -p_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} + b_0 u$$





### โปรแกรมเมทแพลของวิธีการควบคุมด้วยวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำ[10]

```

close all;

close all;

clc

k=100;

T=20;

ts=0.1;

t=[0.1:ts:T];

N=T/ts;

%%%%%%%%%% define the system %%%%%%%%%%%
(เป็นระบบที่สามารถเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง(second-order system))

num=[1];

den=[1 1];

%%%%%%%%%% convert from continuous to discrete %%%%%%%%%%%

sysc=tf(num,den)

sysd=c2d(sysc,ts);

[A,B,C,D]= ssdata(sysd);

%%%%%%%%%% calculating matrix %%%%%%%%%%%

G=[];

for i=1:1:N

    for j=1:1:N

        if i-j<0

            G(i,j)=0;

        else G(i,j)=C*A^(i-j)*B;

        end

    end

end

end

%%%%%%%%%% setting the integral condition %%%%%%%%%%%

r=sin(t);.....สามารถเปลี่ยนค่าอ้างอิงเป็น  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$ 

w=10^(-6);.....สามารถเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักเป็น  $w = 10^{-1}, 10^{-3}, 10^{-10}$ 

u=0;

u_collect=[];

```

```

y=0;
y_collect=[];
e=r-y;
e_collect=[];
gamma_collect=[];
norm_collect=[];
%%%%%%%%% starting the ILC algorithm %%%%%%%%%%
for i=1:k
    gamma=inv(w+transpose(e)*transpose(G)*G*e)*(transpose(e)*G*e)
    gamma_collect=[gamma_collect gamma];
    u=u+gamma*e;
    u_collect=[u_collect u];
    y=G*u;
    y_collect=[y_collect y];
    e=r-y;
    e_collect=[e_collect e];
    L=norm(e);
    norm_collect=[norm_collect L];
end
figure(1)
subplot(221),plot(ts:ts:T,u_collect(:,100),ts:ts:T,u_collect(:,1));
title ('Draph of input vs time at k=100 and k=1');
xlabel('time'), ylabel('input u(t)')
subplot(222),plot(ts:ts:T,y_collect(:,100),ts:ts:T,y_collect(:,1));
title ('Draph of output vs time at k=100');
xlabel('time'), ylabel('output y(t)')
subplot(223),plot(ts:ts:T,e_collect(:,100),ts:ts:T,e_collect(:,1));
title ('Draph of error vs time at k=100');
xlabel('time'), ylabel('error e(t)')
subplot(224),semilogy(1:1:k,norm_collect);
title ('Draph of normof of error');
xlabel('interation'), ylabel('normof of error')

```

### โปรแกรมเมทแลปของวิธีการควบคุมพีไอดี[11]

```

close all;

close all;

clc

T=20;

ts=0.1;

t=[0.1:ts:T];

N=T/ts;

%%%%%%%%%% define the system %%%%%%%%%%%
(เป็นระบบที่สามารถเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสมการกำลังสอง(second-order system))

num=[6.3223 18 12.811];
den=[7.3223 19 12.811];

%%%%%%%%%% setting input condition %%%%%%%%%%%
u=sin(t);.....สามารถเปลี่ยนค่าอ้างอิงเป็น  $r = e^{(t/20)} \sin(t)$ 
y=lsim(numG,denG,u,t)
e=u-y;
plot(t,y,t,u,t,e,'.')
title('Graph of u(t),y(t),e(t) vs time')
xlabel('time'),ylabel('(u(t),y(t),e(t)')

```

## ประวัติผู้เขียนโครงการ



ชื่อ-นามสกุล นายชนรินทร์ อินคำ

ภูมิลำเนา 236 หมู่ 3 ตำบลทุ่งผาสุข อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา 56110

ประวัติการศึกษา

- จบมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนเชียงคำวิทยาคม อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา

- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: showroom\_tigger@hotmail.com



ชื่อ-นามสกุล นางสาววารินทร์ นাপริง

ภูมิลำเนา 214 หมู่ 7 ตำบลหงส์หิน อำเภอจุน จังหวัดพะเยา 56150

ประวัติการศึกษา

- จบมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนจุนวิทยาคม อำเภอจุน จังหวัดพะเยา

- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: miaw\_ma@hotmail.com