

ระบบควบคุมดิจิทัล

DIGITAL CONTROL



โดย  
นายภาสกร โควินท์  
นางสาวสรญา สุวรรณปิฎกกุล

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 42487  
วัน, เดือน, ปี 24 พ.ค. 2545

b.....  
i.....

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมดิจิทัล  
DIGITAL CONTROL



ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2543

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบควบคุมดิจิทัล

**DIGITAL CONTROL**

ผู้จัดทำ

1. นายภาสกร โควินท์ 40010563

2. นางสาวสรญา สุวรรณปิฎกกุล 40010817

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ. วิพันธ์ ปรีชาพานิช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบควบคุมดิจิทัล

## DIGITAL CONTROL

โดย นายภาสกร โควินท์ 40010563

นางสาวสรญา สุวรรณปิฎกกุล 40010817

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. วิพันธ์ ปรีชาพานิช

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอเรื่องระบบควบคุมดิจิทัล โดยการใช้ตัวควบคุมแบบPID ซึ่งเน้นในรูปของโครงสร้างสามกิ่ง ซึ่งเนื้อหาจะเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมซึ่งใช้ควบคุมแพลนท์ที่ต่าง ๆ กัน ในเล่มนี้ได้ นำเสนอหลายวิธี ดังนี้

1. ตัวควบคุมดิจิทัล PID
  2. การวางตำแหน่งโพล
  3. การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระ
  4. การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี การเพิ่มอินพุตน้ำหนัก
- ซึ่งสามารถใช้กับระบบอันดับใดก็ได้ และระบบที่มีเวลาหน่วง (หรือไม่มี) ก็ได้

## ABSTRACT

In this thesis , we present digital control system by using digital controller especially tri-branch R-S-T. The subject matter handled relates to the design of digital PID controller method to control many kind of plant (such as plant with time delay , disturbance ). The following design method are then presented.

1. Digital PID controller
2. Poles placement
3. Tracking and Regulation with Independent objective
4. Tracking and Regulation with weighted input

These methods permit the control of system of any order with or without time delay

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
สารบัญ	II
สารบัญรูปภาพ	IV
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 องค์ประกอบสำคัญขั้นพื้นฐานของวิธีการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัล	2
2.1 โครงสร้างของตัวควบคุมดิจิทัล	2
2.2 ควบคุมลูปด้วยตัวควบคุมชนิด PI	6
บทที่ 3 วิธีการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัล	8
3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับตัวควบคุมดิจิทัล	8
3.2 ตัวควบคุมดิจิทัล PID	9
3.2.1 โครงสร้างของตัวควบคุมดิจิทัล PID1	9
3.2.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดิจิทัล PID1	12
3.2.3 ตัวควบคุมดิจิทัล PID2	15
3.2.4 สรุปตัวควบคุมดิจิทัลแบบ PID	17
3.3 การวางตำแหน่งโพล	18
3.3.1 โครงสร้าง	18
3.3.2 การกำจัดสัญญาณรบกวน ( การคำนวณค่า $R(q^{-1})$ และ $S(q^{-1})$ )	19
3.3.3 การติดตามสัญญาณ (การคำนวณค่า $T(q^{-1})$ )	21
3.4 การติดตามและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระ	25
3.4.1 โครงสร้าง	26
3.4.2 การกำจัดสัญญาณรบกวน ( การคำนวณค่า $R(q^{-1})$ และ $S(q^{-1})$ )	27
3.4.3 การติดตามสัญญาณ (การคำนวณค่า $T(q^{-1})$ )	29
3.5 การติดตามและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการเพิ่มอินพุตน้ำหนัก	30
3.5.1 โครงสร้าง	30
3.5.2 การออกแบบตัวควบคุม	31
3.5.3 การอธิบายกฎการควบคุม	33
3.6 บทสรุป	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ตัวอย่างการทดลอง	36
4.1 ตัวควบคุมคิจิตอล PI	36
4.2 ตัวควบคุมคิจิตอล PID	37
4.2.1 ตัวควบคุมคิจิตอล PID1	37
4.2.2 ตัวควบคุมคิจิตอล PID2	43
4.3 การวางตำแหน่งโพล	45
4.4 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระ	47
4.5 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการเพิ่มอินพุตน้ำหนัก	53
บทที่ 5 สรุปผล	55
ภาคผนวก	57
กิตติกรรมประกาศ	86
บรรณานุกรม	87

## สารบัญรูปภาพ

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1.1 ไคอะแกรมของตัวควบคุมอนาล็อก PI	2
รูปที่ 2.1.2 ตัวควบคุมดิจิทัล	3
รูปที่ 2.1.3 ตัวควบคุมดิจิทัล PI	4
รูปที่ 2.1.4 โครงสร้างมาตรฐานของตัวควบคุมดิจิทัล	5
รูปที่ 3.2.1 บล็อกไคอะแกรมของกฎการควบคุมดิจิทัลโดยใช้ PID1	11
รูปที่ 3.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของแพลนท์	12
รูปที่ 3.2.3 ตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง PID ที่สอดคล้องกับตัวควบคุมดิจิทัล PID2	17
รูปที่ 3.3.1 การวางตำแหน่งโพลด้วยตัวควบคุมแบบ R-S-T	18
รูปที่ 3.3.2 ผลตอบสนองสำหรับ $P(q^{-1}) = 1 - 0.5q^{-1}$	19
รูปที่ 3.3.3 เส้นทาง $y^*$ ที่ต้องการ	22
รูปที่ 3.3.4 การวางตำแหน่งโพล : การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวน	23
รูปที่ 3.4.1 การติดตามและการกำจัดสัญญาณรบกวน	25
รูปที่ 3.4.2 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณด้วยวิธีอิสระ	26
รูปที่ 3.5.1 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีเพิ่มอินพุตหน้าหน้า 31	
รูปที่ 4.1.1 ตัวควบคุมดิจิทัล PI	36
รูปที่ 4.2.1 ตัวควบคุมดิจิทัล PID1 เมื่อ $\zeta = 0.8, \omega_0 = 0.05$	37
รูปที่ 4.2.2 ตัวควบคุมดิจิทัล PID1 เมื่อ $\omega_0 = 0.1$	38
รูปที่ 4.2.3 ตัวควบคุมดิจิทัล PID1 เมื่อ $\omega_0 = 0.15$	39
รูปที่ 4.2.4 ตัวควบคุมดิจิทัล PID1 เมื่อ $\zeta = 0.8, \omega_0 = 0.05$	40
รูปที่ 4.2.5 ตัวควบคุมดิจิทัล PID1 เมื่อ $\omega_0 = 0.1$	41
รูปที่ 4.2.6 ตัวควบคุมดิจิทัล PID1 เมื่อ $\omega_0 = 0.15$	42
รูปที่ 4.2.7 ตัวควบคุมดิจิทัล PID2 เมื่อ $\omega_0 = 0.15$	43
รูปที่ 4.2.8 ตัวควบคุมดิจิทัล PID2 เมื่อ $\omega_0 = 0.15$	44
รูปที่ 4.3.1 การวางตำแหน่งโพล	45
รูปที่ 4.3.2 การวางตำแหน่งโพล (สำหรับอันดับสูงๆ)	46
รูปที่ 4.4.1 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระ	48
รูปที่ 4.4.2 เมื่อมีสัญญาณรบกวน	49

รูปที่ 4.4.3	เมื่อมีเวลาว่างเป็น 3	50
รูปที่ 4.4.4	การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระ (เมื่อเพลงที่มีซีโรที่ไม่เสถียร)	51
รูปที่ 4.4.5	กราฟแสดงสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอ้างอิง	52
รูปที่ 4.4.6	กราฟแสดงสัญญาณควบคุม	52
รูปที่ 4.5.1	การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวน ด้วยวิธีการเพิ่มอินพุตน้ำหนัก	53



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 3.2.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดิจิทัล PID	14
ตาราง 3.3.1 สมการกฎการควบคุมของวิธีการวางตำแหน่งโพล	24
ตาราง 5.1 คุณสมบัติและข้อจำกัดของวิธีการออกแบบ	55



## บทที่ 1

### บทนำ

ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่างๆ เมื่อเราต้องการผลตอบสนองที่ต้องการ จะต้องทำการส่งสัญญาณ ไปควบคุมแพลนท์ เพื่อให้ได้คุณลักษณะตามที่ต้องการ จึงต้องทำการใส่ตัวควบคุม ซึ่งเป็นได้ทั้งแบบเวลาต่อเนื่องและแบบดิจิทัล

ในปฏิญานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัล เพื่อควบคุมแพลนท์ที่อยู่ในรูปดิสคริต ที่มีเวลาหน่วงและมีสัญญาณรบกวน โดยตัวควบคุมที่ออกแบบจะเป็นแบบ PID ที่อยู่ในรูปโครงสร้างสามกึ่ง เรียกว่า R-S-T ได้มีการนำเสนอวิธีการออกแบบหลาย ๆ วิธีที่ต่างกัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB

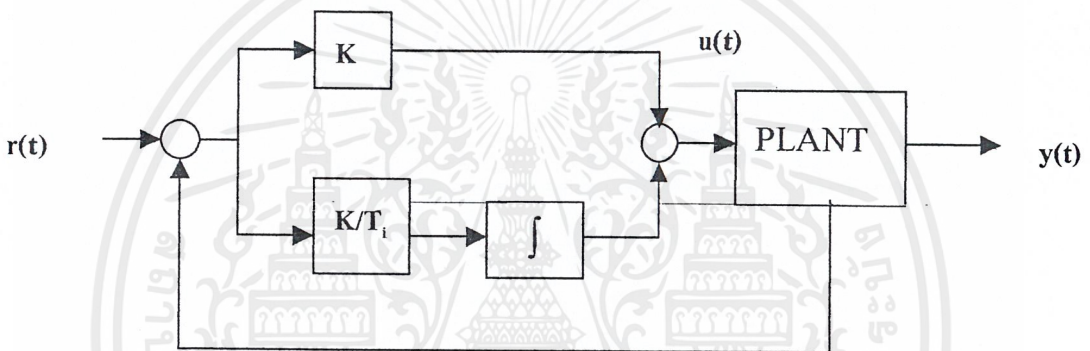


## บทที่ 2

## องค์ประกอบสำคัญขั้นพื้นฐานของวิธีการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัล

## 2.1 โครงสร้างของตัวควบคุมดิจิทัล ( Digital Controllers )

## Analog PI



รูปที่ 2.1.1 ไคอะแกรมของตัวควบคุมอนาล็อก PI

จากรูปที่ 2.1.1 แสดงถึง ไคอะแกรมของตัวควบคุมอนาล็อก ( analog controller ) ชนิด PI ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ช่อง คือ ช่องของ proportional และ ช่องของ integral โดยจะทำการจัดการค่าผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิง ( reference signal ) กับ สัญญาณขาออก ( output signal ) ในกรณีของระบบการสุ่มค่า ( sampled system ) ตัวควบคุม ( controller ) จะเป็นดิจิทัล และวิธีการดำเนินการจะมีเพียงการบวก, การคูณ, การเก็บค่า, และการเลื่อน ซึ่งขั้นตอนการแก้ปัญหาของตัวควบคุมดิจิทัลทั้งหมดมีโครงสร้างคล้ายกัน มีเพียงหน่วยความจำ ( memory ) ของตัวควบคุมเท่านั้นที่เปลี่ยนไป โดยอ้างจากจำนวนของสัมประสิทธิ์

จากรูปที่ 2.1.2 แสดงถึงรูปแบบ โครงสร้างการคำนวณของตัวควบคุม  $u(t)$  ซึ่งถูกปรับโดยตัวควบคุมไปยังแพลนท์ ( plant ) ที่เวลา  $t$  ในทันที ( instant  $t$  ) โดยการควบคุมนี้เป็นค่าเฉลี่ยของค่าเอาท์พุท ที่วัดที่เวลา  $t, t-1, \dots, t-n$ , ในทันที ของค่าการควบคุมก่อนหน้านี้ที่เวลา  $t-1, t-2, \dots, t-m$ , และของสัญญาณอ้างอิง ซึ่งถ่วงน้ำหนักโดยค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดยการคูณทั้งสองข้างของสมการ (2.1.4) ด้วย  $(1 - q^{-1})$  สมการของตัวควบคุมชนิด PI สามารถเขียนได้เป็น

$$S(q^{-1})u(t) = T(q^{-1})r(t) - R(q^{-1})y(t) \quad (2.1.5)$$

โดยที่

$$S(q^{-1}) = 1 - q^{-1} = 1 + s_1 q^{-1} \quad (s_1 = -1) \quad (2.1.6)$$

$$R(q^{-1}) = T(q^{-1}) = K\left(1 + \frac{1}{T_i}\right) - Kq^{-1} = r_0 + r_1 q^{-1} \quad (2.1.7)$$

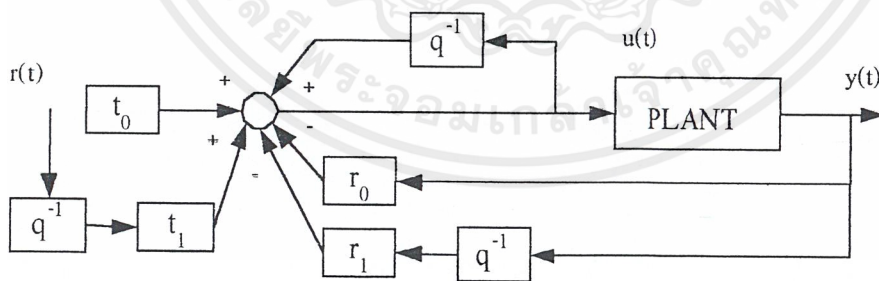
โดยจะสามารถนำมาเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.1.3

เมื่อมาพิจารณาผลรวมของสัญลักษณ์  $S(q^{-1})$  การควบคุม  $u(t)$  จะถูกคำนวณโดยสูตร

$$\begin{aligned} u(t) &= -u(t-1) + T(q^{-1})r(t) - R(q^{-1})y(t) \\ &= u(t-1) - r_0 y(t) - r_1 y(t-1) + r_0 r(t) + r_1 r(t-1) \end{aligned} \quad (2.1.8)$$

ซึ่งก็คล้ายกับไดอะแกรมในรูปที่ 2.1.3

Digital PI



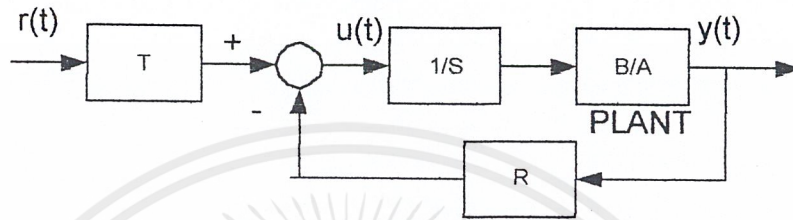
รูปที่ 2.1.3 ตัวควบคุมดิจิทัล PI

พิจารณาอีกด้าน โดยหารทั้งสองข้างของสมการ (2.1.5) ด้วย  $S(q^{-1})$  ซึ่งจะได้

$$u(t) = -\frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} y(t) + \frac{T(q^{-1})}{S(q^{-1})} r(t) \quad (2.1.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถนำมาเขียนเป็น โครงสร้างของรูปแบบมาตรฐานของตัวควบคุมดิจิทัล ดังแสดงในรูปที่ 2.1.4 ( โครงสร้างของรูปแบบ 3 กิ่ง R-S-T )



รูปที่ 2.1.4 โครงสร้างมาตรฐานของตัวควบคุมดิจิทัล

กำหนดให้

$$H(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (2.1.10)$$

เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของกลุ่ม DAC+ZOH+ระบบเวลาต่อเนื่อง+ADC โดยตัวฟังก์ชันถ่ายโอน ของระบบวงปิดใช้ตัวควบคุมดิจิทัลซึ่งเป็น โครงสร้างแบบ มาตรฐาน จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_d(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})R(z^{-1})}{A(z^{-1})S(z^{-1}) + B(z^{-1})R(z^{-1})} = \frac{B(z^{-1})R(z^{-1})}{P(z^{-1})} \quad (2.1.11)$$

โดยที่

$$P(z^{-1}) = A(z^{-1})S(z^{-1}) + B(z^{-1})R(z^{-1}) = 1 + p_1z^{-1} + p_2z^{-2} \dots \quad (2.1.12)$$

ซึ่งจะระบุตำแหน่ง โพล ของระบบวงปิด

วัตถุประสงค์ของการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัลเพื่อต้องการหาค่าของตัว R,S และ T โดยพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด จะสามารถหาค่าที่ต้องการได้

นี่เป็นเหตุผลที่ทำให้การออกแบบรูปแบบของระบบวงปิด จะต้องถูกแสดง ( หรือหากไม่ใช้ในกรณีนี้ให้ทำการเปลี่ยน ) ในรูปแบบของการออกแบบ โพลวงปิด [  $P(z^{-1})$  ] และท้ายสุดในรูปแบบของการออกแบบ ซีโร

## 2.2 ความคุมลู่ด้วยตัวควบคุมดิจิทัลชนิด PI

โดยการสาธิตวิธีการคำนวณสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมดิจิทัลชนิด PI ฟังก์ชันถ่ายโอนของ แพลนท์ที่ดิสครีต (discretized plant) กับตัว zero order hold เป็นดังนี้

$$H(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{b_1 q^{-1}}{1 + a_1 q^{-1}} \quad (2.2.1)$$

สำหรับประโยชน์ของเครื่องหมายที่เป็นรูปแบบที่กำหนดไว้ เราจะใช้เครื่องหมาย  $q^{-1}$  สำหรับตัว หน่วงเวลา (delay) และ ตัว complex variable ( $z^{-1}$ )

ตัวควบคุมดิจิทัลชนิด PI ถูกทำให้มีคุณลักษณะตามแบบสมการพหุนาม ดังนี้

$$R(q^{-1}) = T(q^{-1}) = r_0 + r_1 q^{-1} \quad (2.2.2)$$

$$S(q^{-1}) = 1 - q^{-1} \quad (2.2.3)$$

โดยฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด ในรูปแบบปกติของตัวมันเองสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.1.11)

ตัวพหุนาม  $P(q^{-1})$  เหมาะกับการออกแบบโพลวงปิด ซึ่งระบุถึงการปฏิบัติการที่จำเป็น โดยปกติจะทำการเลือกระบบพหุนามอันดับสอง (second-order polynomial) ให้เหมาะกับการดิสครีต (discretization) ของระบบเวลาต่อเนื่องอันดับสอง (second-order continuous time) ซึ่งจะให้  $\omega_0$  และ  $\zeta$

ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมของพหุนาม  $P(q^{-1})$  จะได้จากการใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งในกรณีทั้งสองนี้ คาบการสุ่ม ( $T_s$ ), ค่าความถี่ธรรมชาติ  $\omega_0$  และค่า damping factor ( $\zeta$ ) จะต้องถูกระบุด้วย ความเกี่ยวเนื่องกันระหว่าง  $\omega_0$  และ  $T_s$  แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนดังนี้

$$0.25 \leq \omega_0 T_s \leq 1.5; \quad 0.7 \leq \zeta \leq 1 \quad (2.2.4)$$

ในกรณีที่แพลนท์ที่ทำการดิสครีตแล้ว มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังในสมการที่ (2.2.1) และใช้ตัว ควบคุมดิจิทัลชนิด PI สมการ (2.1.12) จะทำให้ โพลวงปิด กลายเป็น

$$(1 + a_1 q^{-1})(1 - q^{-1}) + b_1 q^{-1}(r_0 + r_1 q^{-1}) = 1 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2} \quad (2.2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการจัดกลุ่มใหม่ในรูปแบบของสมการ (2.2.5) โดยอ้างจากตัวกำลัง  $q^{-1}$  จะได้

$$1 + (a_1 - 1 + r_0 b_1)q^{-1} + (b_1 r_1 - a_1)q^{-2} = 1 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2} \quad (2.2.6)$$

พิจารณาสมการ (2.2.6) สามารถจัดสัมประสิทธิ์ของทั้งสองข้างให้เท่ากัน สมการของระบบจะกลายเป็น

$$\left. \begin{aligned} a_1 - 1 + r_0 b_1 &= p_1 \\ b_1 r_1 - a_1 &= p_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.2.7)$$

ซึ่งจะทำให้ได้ค่าของ  $r_0$  และ  $r_1$  คือ

$$r_1 = \frac{p_2 - a_1}{b_1}; \quad r_0 = \frac{p_1 - a_1 + 1}{b_1} \quad (2.2.8)$$

โดยใช้สมการ (2.1.7) เป็นไปได้ที่จะทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ (parameters) ของตัวควบคุมเวลาต่อเนื่องชนิด PI ได้ดังนี้

$$K_1 = r_1; \quad T_i = \frac{r_1}{r_0 - r_1}$$

### บทที่ 3

## วิธีการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัล

ในบทนี้จะกล่าวถึง การนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัล PID ซึ่งอยู่ในรูปโครงสร้างทั่วไป หรือ โครงสร้างสามกึ่งที่เรียกว่า R-S-T และข้อจำกัดของดิจิทัล PID โดยใช้วิธีการออกแบบดังนี้

1. การวางตำแหน่งโพล  
( Poles Placement )
2. การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระ  
( Tracking and Regulation with Independent Objectives )
3. การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีเพิ่มอินพุตน้ำหนัก  
( Tracking and Regulation with Weighted input )

โดยที่วิธีเหล่านี้สามารถใช้ได้กับระบบอันดับใดก็ได้และระบบที่มีหรือไม่มีเวลาหน่วง(time delay) ก็ได้

### 3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับตัวควบคุมดิจิทัล

การใช้ตัวควบคุมดิจิทัลหรือไม่โคร โปรเซสเซอร์ในลูควบคุมจะมีผลดีมากมาย ดังนี้

- เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการออกแบบตัวควบคุม
- สามารถใช้อัลกอริทึม(algorithms)ที่มีความซับซ้อนและมีประสิทธิภาพดีกว่า PID
- เป็นวิธีที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการควบคุมระบบที่มีเวลาหน่วง

วิธีการออกแบบที่นำเสนอในบทนี้จะใช้กับการควบคุม single input-single output ที่มีสัญญาณรบกวน และทุกวิธีที่นำเสนอใช้นั้นสามารถใช้ MATLAB ได้

ตัวควบคุมที่เราออกแบบทุกตัวจะมีโครงสร้าง R-S-T เหมือนกัน แต่ค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว (จำนวนสัมประสิทธิ์) จะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของระบบ

การออกแบบและการปรับค่าตัวควบคุม (R,S,T) จะต้องใช้ความรู้ในเรื่องของพารามิเตอร์ของแบบจำลองเวลา discrete ของแพลนท์ที่เราจะควบคุม

### 3.2 ตัวควบคุมดิจิทัล PID

สำหรับการควบคุมพลานที่มีอันดับต่ำๆและไม่มีเวลาหน่วง (หรือมีเล็กน้อย)สามารถใช้ตัวควบคุมPID แบบเวลาต่อเนื่องก็ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ในบทนี้เราจะออกแบบส่วนดิจิทัลของตัวควบคุม PID โดยใช้แบบจำลองเวลา discrete ของพลาน์ ซึ่งได้มาจากการ discretize พลาน์เวลาต่อเนื่อง

การแปลงตัวควบคุมดิจิทัล PID ขึ้นพื้นฐานจะแปลงมาจากการ discretize ตัวควบคุมเวลาต่อเนื่องที่มี ค่า P I และD ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัล PID จะใช้ได้กับ

- พลาน์ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนของเวลาต่อเนื่องที่มีอันดับไม่เกินสอง และมีเวลาหน่วงเล็กน้อยหรือไม่มีก็ได้
- พลาน์ที่มีเวลาหน่วงน้อยกว่าคาบเวลาการสุ่ม (sampling time)

#### 3.2.1 โครงสร้างของตัวควบคุมดิจิทัล PID1

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง PID1

$$H_{PID}(s) = K \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \right] \quad (3.2.1)$$

ตัวควบคุมนี้มีค่าพารามิเตอร์ปรับค่าได้ 4 ค่า

$K$  = proportional gain

$T_i$  = integral action

$T_d$  = derivative action

$T_d/N$  = filtering of the derivative action

ในที่นี้การออกแบบตัวควบคุมจะอยู่ในรูปเวลา discrete ดังนั้น การ discretize เวลาต่อเนื่องจึงไม่จำเป็นจากที่กล่าวมานี้ เราจึงใช้การประมาณผลต่างแบบย้อนกลับ (backward difference approximation)

$$s = (1 - q^{-1}) / T_s \quad \text{และ} \quad 1/s = T_s / (1 - q^{-1})$$

ซึ่ง เราจะได้

$$\frac{1}{T_i s} = \frac{T_s}{T_i} \frac{1}{1-q^{-1}} \quad (3.2.2)$$

$$T_d s = \frac{T_d}{T_s} (1-q^{-1}) \quad (3.2.3)$$

$$\frac{1}{1 + \frac{T_d}{N} s} = \frac{1}{1 + \frac{T_d}{NT_s} (1-q^{-1})} = \frac{\frac{NT_s}{T_d + NT_s}}{1 - \frac{T_d}{T_d + NT_s} q^{-1}} \quad (3.2.4)$$

นำค่าต่างๆเหล่านี้แทนลงไปในสมการ 3.2.1 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของตัวควบคุมคิจิตอล PID1 ดังนี้

$$H_{PID1}(q^{-1}) = \frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})} = K \left[ 1 + \frac{T_s}{T_i} \frac{1}{1-q^{-1}} + \frac{\frac{NT_d}{T_d + NT_s} (1-q^{-1})}{1 - \frac{T_d}{T_d + NT_s} q^{-1}} \right] \quad (3.2.5)$$

ซึ่งอัตราส่วนข้างต้นนี้ได้จากการนำทั้งสามเทอมมารวมกัน และจะได้  $R(q^{-1}), S(q^{-1})$  อยู่ในรูปของ

$$R(q^{-1}) = r_0 + r_1 q^{-1} + r_2 q^{-2} \quad (3.2.6)$$

$$S(q^{-1}) = (1-q^{-1})(1+s_1 q^{-1}) \quad (3.2.7)$$

โดยที่มีค่าต่างๆ ดังนี้

$$s_1 = -\frac{T_d}{T_d + NT_s}$$

$$r_0 = K \left( 1 + \frac{T_s}{T_i} N s_1 \right)$$

$$r_1 = K \left[ s_1 \left( 1 + \frac{T_s}{T_i} + 2N \right) - 1 \right]$$

$$r_2 = -K s_1 (1 + N)$$

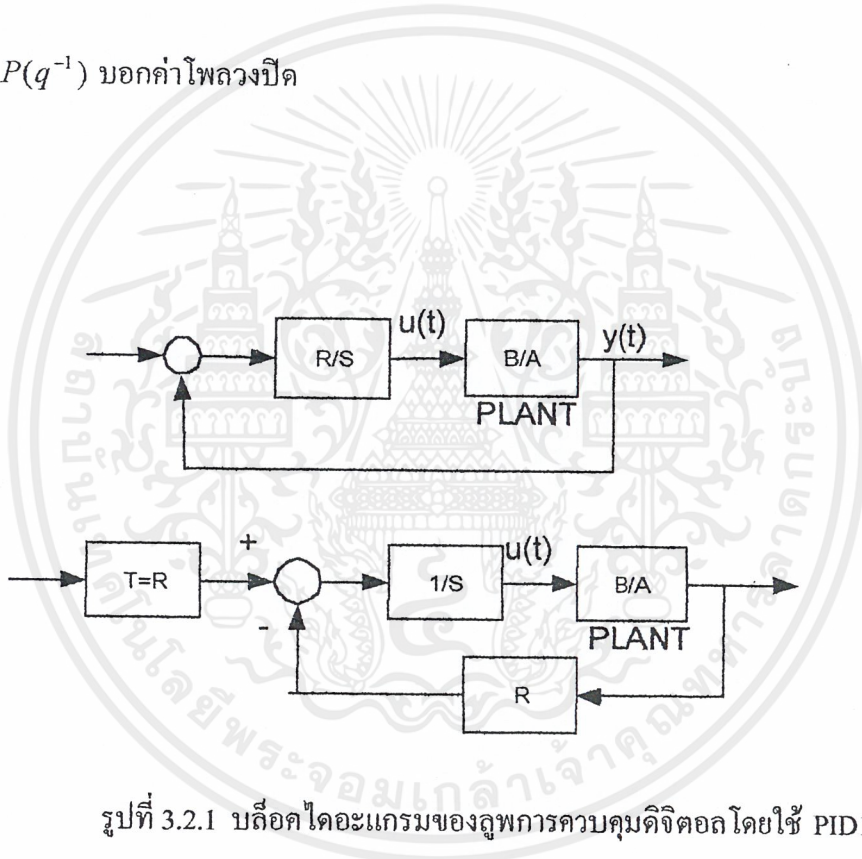
จะเห็นว่าตัวควบคุมคิจิตอลมีพารามิเตอร์ 4 ตัว เหมือนกับตัวควบคุมเวลาต่อเนื่อง และจากฟังก์ชันถ่ายโอนนี้จะมีตัวร่วมอยู่ในตัวส่วนคือเทอม  $(1-q^{-1})$  เป็นตัวที่แสดงถึงผลของการอินทิเกรตคิจิตอล นอกจากนี้ยังมีเทอม  $(1+s_1 q^{-1})$  เป็นตัวกรอง (filter) คิจิตอลซึ่งเหมือนกับเทอม  $(1+T_d s/N)$  ในตัวควบคุมเวลาต่อเนื่อง

เราสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูป 3.2.1(บน) โดยเลือก  $T(q^{-1}) = R(q^{-1})$  หรือเขียนในรูปโครงสร้างตามกึ่งดังรูป(ล่าง) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของสัญญาณอ้างอิง  $r(t)$  และเอาต์พุต  $y(t)$  เป็น

$$H_{CL}(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})R(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1})} \quad (3.2.8)$$

$$= \frac{B(q^{-1})R(q^{-1})}{P(q^{-1})}$$

โดยที่  $P(q^{-1})$  บอกราคาโพลวงปิด



รูปที่ 3.2.1 บล็อกไดอะแกรมของลูการควบคุมดิจิทัลโดยใช้ PID1

ผลคูณ  $B(q^{-1})R(q^{-1})$  บอกราคา ซีโรวงปิด โดยทั่วไปตัวควบคุมดิจิทัล PID1 ไม่มีซีโรของแพลนท์ที่สามารถตัดได้ (แม้ว่า  $B(q^{-1})$  จะมีค่าเป็นส่วนหนึ่งใน  $P(q^{-1})$ ) และตัวควบคุมดิจิทัล PID1 สามารถใช้ได้กับแพลนท์ที่แบบจำลองเวลา discrete time ซีโรที่ทำให้ระบบไม่เสถียร (อาจจะเกิดจากการที่เวลาหน่วงมากกว่าครึ่งหนึ่งของเวลาการสุ่ม)

ยิ่งกว่านั้น ตัวควบคุมดิจิทัล PID1 ยังเพิ่มซีโรเข้าไปด้วยในเทอมของ  $R(q^{-1})$

ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของ  $A(q^{-1}), B(q^{-1})$  และ  $P(q^{-1})$  ซีโรเหล่านี้จะทำให้เกิด โอเวอร์ชูต

(overshoots) ขึ้น ณ ช่วงเวลาผลตอบสนองชั่วขณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดิจิทัล PID

การคำนวณค่าพารามิเตอร์นั้นมีหลายขั้นตอน ดังนี้

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของแพลนท์ที่ที่คิสริตแล้ว

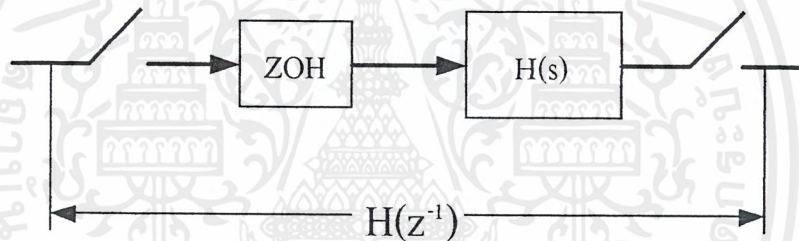
กำหนดค่าคุณลักษณะต่างๆ

คำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ( สัมประสิทธิ์ของ  $R(q^{-1}), S(q^{-1})$  )

คำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเวลาต่อเนื่อง PID ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของ  $R(q^{-1}), S(q^{-1})$

#### ฟังก์ชันถ่ายโอนของแพลนท์

ฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z^{-1})$  ของแบบจำลองการสุ่มเวลาของแพลนท์ที่มี ฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(s)$  และตัวควบคุมที่ต่อกับ zero order hold แสดงได้ดังรูปที่ 3.2.2



รูปที่ 3.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของแพลนท์

ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบเวลาต่อเนื่อง  $H(s)$  อาจมีรูปแบบดังนี้

$$H(s) = \frac{Ge^{-sr}}{1+sT} \quad (3.2.9)$$

$$H(s) = \frac{\omega_0^2 e^{-sr}}{\omega_0^2 + 2\zeta\omega_0 s + s^2} \quad (3.2.10)$$

และมีข้อกำหนด

$$\tau < T_s \quad (3.2.11)$$

สำหรับระบบอันดับหนึ่ง คาบเวลาการสุ่มต้องน้อยกว่าค่าเวลาคงที่  $T_s < T$  ดังนั้น ตัวควบคุมดิจิทัล PID จะประยุกต์ใช้ได้โดยตรงกับระบบอันดับหนึ่งที่เป็นไปตามเงื่อนไข  $\tau < T$  เท่านั้น สำหรับรูปแบบทั้งสองข้างต้น ( $H(s)$ ) เมื่อทำการคิสริตด้วยโฮลด์ ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จะอยู่ในรูป

$$H(q^{-1}) = \frac{b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2}}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2}} \quad (3.2.12)$$

การระบุค่าคุณสมบัติต่างๆ

โดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติของระบบวงปิดที่ต้องการสามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนี้

$$H_{CL}(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})R(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1})} = \frac{B_M(q^{-1})}{P(q^{-1})} \quad (3.2.13)$$

อย่างไรก็ตาม  $B_M(q^{-1})$  ไม่สามารถระบุค่าได้ก่อน เพราะว่าโดยทั่วไป  $B(q^{-1})$  ไม่ได้อยู่ในรูปอย่างง่าย (แม้ว่ามันจะเสถียร ในกรณีที่ไม่มีเวลาหน่วง) ยิ่งกว่านั้นตัวควบคุมเองก็มีซีโรอยู่แล้วในตัวของมันเองด้วยค่าของ  $R(q^{-1})$  ตัวพหุนามวงปิดสามารถระบุได้ในรูปของ

$$P(q^{-1}) = 1 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2} \quad (3.2.14)$$

ข้อเสนอแนะสำหรับการกำหนดค่า  $p_1$  และ  $p_2$  ให้พิจารณาจากแบบจำลองเวลาต่อเนื่องอันดับสองที่มีค่า rise time ( $t_R$ ) settling time ( $t_S$ ) maximum overshoot ( $M$ ) ซึ่งค่าเหล่านี้ได้จากระบบที่รู้ค่า  $\omega_0$  และ  $\zeta$  โดยที่คาบเวลาการสั่น ( $T_s$ ) และความถี่ธรรมชาติต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข

$$0.25 < \omega_0 T_s < 1.5 \quad 0.7 \leq \zeta \leq 1 \quad (3.2.15)$$

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดิจิทัล

จากสมการ (3.2.13) สมการในรูปของ  $S(q^{-1})$  และ  $R(q^{-1})$  ก็ได้โดย

$$P(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1}) \quad (3.2.16)$$

โดยที่  $P(q^{-1})$  หาได้จากสมการ (3.2.14) และ  $A(q^{-1}), B(q^{-1})$  หาได้จากสมการ(3.2.12) ส่วนรูปแบบของ  $S(q^{-1})$  และ  $R(q^{-1})$  ให้ไว้ในสมการ (3.2.6) และ(3.2.7)

วิธีการคำนวณและการแก้ปัญหาสรุปได้ในตารางที่ 3.2.1

ตารางการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดิจิทัล PID

$$P(q^{-1}) = 1 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2} = A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1})$$

$$= (1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2})(1 - q^{-1})(1 + s_1 q^{-1}) + (b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2})(r_0 + r_1 q^{-1} + r_2 q^{-2})$$

$$p_1 = b_1 r_0 + s_1 + a_1 - 1$$

$$p_2 = b_2 r_0 + b_1 r_1 + s_1(a_1 - 1) + a_2 - a_1$$

$$0 = b_2 r_1 + b_1 r_2 + s_1(a_2 - a_1) - a_2$$

$$0 = b_2 r_2 - a_2 s_1$$

$$D = (a_1 - 1)b_1 b_2^2 - b_2^3 - [a_2 - a_1]b_1^2 b_2 - a_2 b_1^3$$

$$D \neq 0 \quad \text{ถ้า } A(q^{-1}) \text{ และ } B(q^{-1}) \text{ ไม่มีตัวร่วม}$$

$$r_0 = \frac{1}{D} \left\{ \begin{array}{l} [p_1(a_1 - 1) - p_2 + a_1 - 1 - a_1^2 + a_2]b_2^2 + a_2(a_1 - 1 - p_1)b_1^2 + \\ [p_1(a_1 - a_2) + a_1 - a_1^2 + a_1 a_2]b_1 b_2 \end{array} \right\}$$

$$r_1 = \frac{1}{D} \left\{ \begin{array}{l} [p_2(a_1 - a_2) + p_1 a_2 + (a_1 + a_2)^2]b_1 b_2 + (-p_2 a_2 + a_2^2 - a_1 a_2)b_1^2 + \\ [p_1(a_2 - a_1) - a_1 - a_1 a_2 + a_1^2]b_2^2 \end{array} \right\}$$

$$r_2 = \frac{1}{D} \{ [a_2(a_1 + p_2 - a_2)]b_1 b_2 + [a_2(a_1 - p_1 - 1)]b_2^2 - a_2^2 b_1^2 \}$$

$$s_1 = \frac{1}{D} [(p_2 + a_1 - a_2)b_1 b_2^2 - (1 + p_1 - a_1)b_2^3 - a_2 b_1^2 b_2]$$

ตาราง 3.2.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดิจิทัล PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง PID โดยใช้สัมประสิทธิ์ของ  $R(q^{-1})$  และ  $S(q^{-1})$  สามารถกระทำได้โดยใช้ การประมาณค่าผลต่างแบบย้อนหลัง ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ค่าต่างๆ  $(r_0, r_1, r_2, s_1)$  ดังนี้

$$K = \frac{r_0 s_1 - r_1 - (2 + s_1) r_2}{(1 + s_1)^2} \quad (3.2.17)$$

$$T_i = T_s \frac{K(1 + s_1)}{r_0 + r_1 + r_2} \quad (3.2.18)$$

$$T_d = T_s \frac{s_1^2 r_0 - s_1 r_1 + r_2}{K(1 + s_1)^3} \quad (3.2.19)$$

$$\frac{T_d}{N} = \frac{-s_1 T_s}{1 + s_1} \quad (3.2.20)$$

สำหรับตัวควบคุมดิจิทัล PID ที่จะสมมูลกับตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง PID สัมประสิทธิ์  $s_1$  ต้องมีเงื่อนไขดังนี้

$$-1 < s_1 \leq 0 \quad (3.2.21)$$

ในกรณีตรงกันข้ามที่  $0 < s_1 < 1$  ตัวกรองดิจิทัลจะเป็นตัวกรองที่เสถียรแต่จะไม่มีตัวกรองที่สมมูลในแบบเวลาต่อเนื่อง ซึ่งในกรณีนี้ ตัวควบคุมดิจิทัล PID จะให้คุณลักษณะที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง แต่จะไม่มีตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง PID ที่สมมูลด้วย

### 3.2.3 ตัวควบคุมดิจิทัล PID2

ตัวควบคุมดิจิทัล PID2 จะไม่มีการเพิ่มซีโร่เข้าไปในระบบ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด (ระหว่างสัญญาณอ้างอิงและเอาต์พุต) อยู่ในรูปของ

$$H_{CL}(q^{-1}) = \frac{P(1) B(q^{-1})}{B(1) P(q^{-1})} \quad (3.2.22)$$

โดยที่  $B(q^{-1})$  เป็นซีโร่ของพหุนามที่ไม่เปลี่ยนแปลง  $P(q^{-1})$  คือค่าโพลวงปิด และเทอม  $P(1)/B(1)$  มีเพื่อให้ได้แกนในภาวะคงตัวระหว่างสัญญาณอ้างอิงและเอาต์พุตเป็นหนึ่ง ตัวควบคุมจะมีรูปแบบทั่วไป

$$S(q^{-1})u(t) + R(q^{-1})y(t) = T(q^{-1})r(t) \quad (3.2.23)$$

$S(q^{-1})$  และ  $R(q^{-1})$  จะได้จากสมการ (3.2.6) และ (3.2.7) ตามลำดับ

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดที่ใช้ตัวควบคุมที่ระบุในสมการ (3.2.23) จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{cl}(q^{-1}) = \frac{T(q^{-1})B(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1})}$$

$$= \frac{[P(1)/B(1)]B(q^{-1})}{P(q^{-1})} \quad (3.2.24)$$

สัมประสิทธิ์ของพหุนาม  $S(q^{-1})$  และ  $R(q^{-1})$  จะได้จากการแก้สมการ (3.2.16) เหมือนกับ PID1 ดังนั้นจาก (3.2.24) จะได้

$$T(q^{-1}) = \frac{P(1)}{B(1)} = \frac{B(1)R(1)}{B(1)} = R(1) \quad (3.2.25)$$

เพราะ  $S(1) = 0$  (ทำให้ได้  $P(1) = B(1)R(1)$ )

กล่าวโดยสรุปแล้ว ตัวควบคุมดิจิทัล PID2 มีพหุนาม  $S(q^{-1})$  และ  $R(q^{-1})$  เหมือนกับตัวควบคุมดิจิทัล PID1 แต่จะแตกต่างกันตรงที่มีการเปลี่ยนจาก  $T(q^{-1}) = R(q^{-1})$  มาเป็น  $T(q^{-1}) = R(1)$  แทน โดยที่มีเกนของระบบที่สถานะคงตัวเป็นหนึ่งโดยไม่มีผลจากซีโรของ  $R(q^{-1})$

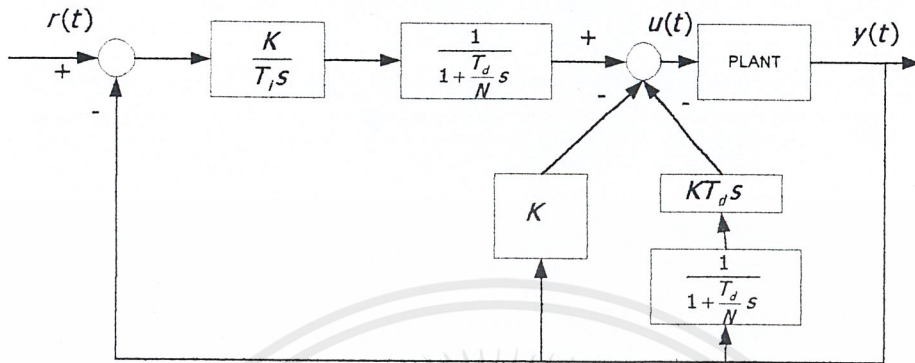
สำหรับตัวควบคุม PID2 แบบเวลาต่อเนื่องนี้จะได้จากการดิสครีตตัวควบคุมดิจิทัล PID2 ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 3.2.6 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$K = \frac{-(r_1 + 2r_2)}{1 + s_1} \quad (3.2.27)$$

$$T_i = T_s \frac{s_1 r_1 + (s_1 - 1)r_2}{(r_1 + 2r_2)(1 + s_1)} \quad (3.2.28)$$

$$T_d = T_s \frac{-(r_1 + 2r_2)}{r_0 + r_1 + r_2} \quad (3.2.29)$$

$$\frac{T_d}{N} = \frac{-s_1 T_s}{1 + s_1} \quad (3.2.20)$$



รูปที่ 3.2.3 ตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง PID ที่สอดคล้องกับตัวควบคุมดิจิทัล PID2

### 3.2.4 สรุปตัวควบคุมดิจิทัลแบบ PID

การวิเคราะห์ตัวควบคุม PID จะได้ตัวควบคุมดิจิทัลที่มีโครงสร้างแบบสามกึ่ง (R-S-T) ด้วยค่า  $T(q^{-1}) = R(q^{-1})$  [PID1] โดยขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ของ  $S(q^{-1})$  และ  $R(q^{-1})$  นอกจากนี้สัมประสิทธิ์ของ PID แบบเวลาต่อเนื่อง จะคำนวณได้เมื่อ

$$S(q^{-1}) = 1 + s_1 q^{-1}$$

มีค่า  $s_1 \in [-1, 0]$  ตัวควบคุมดิจิทัล PID สามารถใช้กับระบบอันดับหนึ่งหรืออันดับสองที่มีเวลานวนน้อยกว่าเวลาการสุ่ม

ถ้า  $\tau > 0.25T$  ตัวควบคุม PID จะให้ผลตอบสนองในวงปิดช้ากว่าผลตอบสนองในวงเปิด โอเวอร์ชูตที่เกิดขึ้นในระบบวงปิด (สำหรับค่า  $\zeta > 0.707$ ) สามารถกำจัดได้โดยการแทนที่  $T(q^{-1}) = R(q^{-1})$  [PID1] ด้วย  $T(q^{-1}) = R(1)$  [PID2]

### 3.3 การวางตำแหน่งโพล (POLES PLACEMENT)

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมดิจิทัล PID (รวมถึง PID2) เป็นการใช้วิธีการวางตำแหน่งโพล (poles placement) อีกวิธีหนึ่ง ซึ่งวิธีนี้สามารถใช้ออกแบบได้ทั้งกับระบบที่เสถียรและไม่เสถียร โดย

- อันดับของ  $A(q^{-1})$  และ  $B(q^{-1})$  ในฟังก์ชันถ่ายโอน (แต่ต้องไม่มีตัวร่วม) เป็นอันดับใดก็ได้
- สามารถใช้กับระบบที่มีเวลาหน่วง (time delay) ได้
- ซีโรของแพลนท์ จะเสถียรหรือไม่เสถียรก็ได้

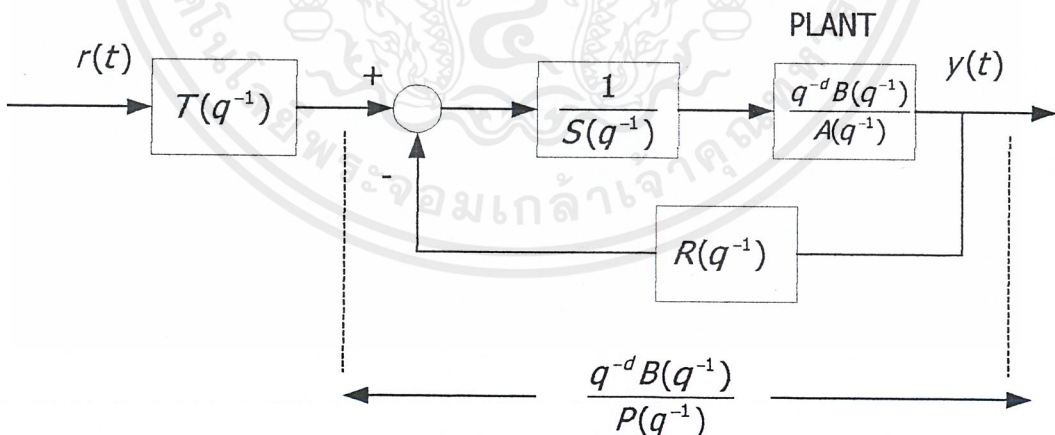
วิธีนี้ไม่สามารถตัดซีโรของระบบทิ้งได้ (ซึ่งทำให้ระบบอาจจะไม่เสถียรได้) ข้อจำกัดเพียงข้อเดียวเป็นไปได้คือ ตัวร่วมของ  $A(q^{-1})$  และ  $B(q^{-1})$  ต้องถูกตัดทิ้งไปก่อนจะคำนวณ

#### 3.3.1 โครงสร้าง

โครงสร้างของระบบวงปิดเป็นดังรูป 3.3.1 และแพลนท์ที่จะควบคุมมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$H(q^{-1}) = \frac{q^{-d} B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad (3.3.1)$$

โดยที่  $d$  คือ จำนวนเต็มของคาบเวลาการสุ่มในเวลาหน่วง (time delay)



รูปที่ 3.3.1 การวางตำแหน่งโพลด้วยตัวควบคุมแบบ R-S-T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \quad (3.3.2)$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_mq^{-m} = q^{-1}B^*(q^{-1}) \quad (3.3.3)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นดังสมการ

$$\begin{aligned} H_{CL}(q^{-1}) &= \frac{q^{-d}T(q^{-1})B(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})R(q^{-1})} \\ &= \frac{q^{-d}T(q^{-1})B(q^{-1})}{P(q^{-1})} \end{aligned} \quad (3.3.4)$$

โดยที่

$$P(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1}) = 1 + p_1q^{-1} + p_2q^{-2} + \dots \quad (3.3.5)$$

### 3.3.2 การกำจัดสัญญาณรบกวน (การคำนวณค่า $R(q^{-1})$ และ $S(q^{-1})$ )

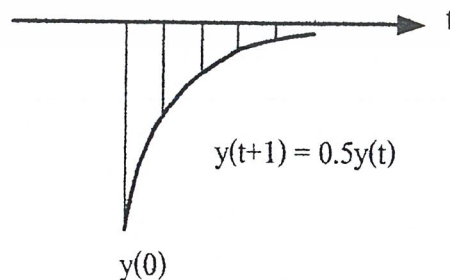
โพลวงปิดซึ่งหาได้จากค่ารากของ  $P(q^{-1})$  จะเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะ regulation จะเห็นได้ว่าในกรณีของตัวควบคุม PID นั้น เราสามารถกำหนด  $P(q^{-1})$  ได้ โดยการกำหนดโพลวงปิดจากระบบเวลาต่อเนื่องอันดับสองที่มี  $\zeta, \omega_0$  เพื่อให้เข้าใจมากขึ้น พิจารณาตัวอย่างนี้

$$P(q^{-1}) = 1 + p_1q^{-1}$$

ด้วยค่า  $p_1 = -0.5$  สำหรับสัญญาณอ้างอิงคงที่ จะเกิดเอาต์พุตในวงปิด อธิบายได้ด้วยสมการ

$$y(t+1) = -p_1y(t) = 0.5y(t)$$

จะได้เอาต์พุตลดลง 50% ที่ทุกๆเวลาการสุ่ม ดังรูปที่ 3.3.2



รูปที่ 3.3.2 ผลตอบสนองสำหรับ  $P(q^{-1}) = 1 - 0.5q^{-1}$

การเลือกค่า  $p_1$  อยู่ระหว่าง  $-0.2$  และ  $-0.8$  จะทำให้เราสามารถควบคุมความเร็วในการกำจัดสัญญาณรบกวนได้

แต่กระนั้น โดยทั่วไปการเลือกค่า  $P(q^{-1})$  จะเลือกจากการวิเคราะห์ระบบเวลาต่อเนื่องอันดับสองที่ระบุค่า  $\zeta, \omega_0$  และ  $T_s$  และต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข

$$0.25 < \omega_0 T_s \leq 1.5 \quad 0.7 \leq \zeta \leq 1$$

เมื่อค่า  $P(q^{-1})$  ได้ถูกกำหนดแล้ว เพื่อที่จะคำนวณหาค่า  $R(q^{-1})$  และ  $S(q^{-1})$  เราจะต้องแก้สมการ Bezout Identity ข้างล่างนี้

$$A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})R(q^{-1}) = P(q^{-1}) \quad (3.3.6)$$

และนิยามให้

$$r = \max \deg(n, m + d) \quad (3.3.7)$$

สมการพหุนามนี้มีวิธีเฉพาะที่ใช้สำหรับแก้สมการ (เมื่อ  $A(q^{-1})$  และ  $B(q^{-1})$  ไม่มีตัวร่วม) คือ

$$\deg P(q^{-1}) \leq 2r - 1; \quad \deg S(q^{-1}) = \deg R(q^{-1}) = r - 1 \quad (3.3.8)$$

โดยที่

$$S(q^{-1}) = 1 + s_1 q^{-1} + \dots + s_{r-1} q^{-(r-1)} = 1 + q^{-1} s^*(q^{-1}) \quad (3.3.9)$$

$$R(q^{-1}) = r_0 + r_1 q^{-1} + \dots + r_{r-1} q^{-(r-1)} \quad (2.3.10)$$

ในการแก้สมการ(3.3.6)นิยมจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ดังนี้

$$Mx = p \quad (3.3.11)$$

โดยมี

$$x^T = [1, s_1, \dots, s_{r-1}, r_0, \dots, r_{r-1}] \quad (3.3.12)$$

$$p^T = [1, p_1, \dots, p_{r-1}, \dots, p_{2r-1}] \quad (3.3.13)$$

และเมตริกซ์  $M$  มีรูปแบบ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & b'_1 & \dots & 0 & \cdot \\ \vdots & \cdot & \cdot & 0 & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{r-1} & \dots & a_1 & 1 & b'_{r-1} & \dots & b'_{r-1} & 0 \\ a_r & \dots & \cdot & a_1 & b_r, b_{r-1} & \dots & \cdot & b'_1 \\ 0 & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \dots \\ \vdots & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & b'_{r-1} \\ 0 & \cdot & 0 & a_r & 0 & \cdot & 0 & b'_r \end{bmatrix}$$

$$b'_i = 0 \text{ สำหรับ } i = 0, 1, \dots, d \quad b'_i = b_{i-d} \text{ สำหรับ } i \geq d+1$$

$$a_i = 0 \text{ สำหรับ } i > n \quad \text{และ} \quad b_i = 0 \text{ สำหรับ } i > m$$

เวกเตอร์  $x$  ซึ่งประกอบไปด้วยสัมประสิทธิ์ของ  $R(q^{-1})$  และ  $S(q^{-1})$  จะหาได้เมื่อทำการหาอินเวอร์สเมตริกซ์ของ  $M$

$$x = M^{-1} p \quad (3.3.14)$$

### ความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (steady-state error)

เมื่อทำการป้อนสแต็ปอินพุตหรือ เมื่อมีสัญญาณรบกวน แต่เราต้องการให้ได้ค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวเป็นศูนย์ สามารถทำได้โดยที่ส่วนของการป้อนไปข้างหน้า (feedforward channel) ต้องมีตัวอินทิเกรตคิติดอล หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า พหุนาม  $S(q^{-1})$  จะถูกแทนที่ด้วย

$$S'(q^{-1}) = S(q^{-1})(1 - q^{-1}) = S(q^{-1})H_2(q^{-1}) \quad (3.3.15)$$

แม้กระนั้น โดยทั่วไปจะมีการต่อฟิลเตอร์  $H_1(q^{-1})$  โดยต่อกับ  $R(q^{-1})$

$$H_1(q^{-1}) = \frac{1}{1 - \alpha} (1 - \alpha q^{-1}) \quad 0 < \alpha \ll 1 \quad (3.3.16)$$

ด้วยข้อกำหนดที่ว่า  $A(q^{-1})$  และ  $H_1(q^{-1})$  ต้องไม่มีตัวร่วม จะได้พหุนาม  $R(q^{-1})$  เป็น

$$R'(q^{-1}) = R(q^{-1})H_1(q^{-1}) \quad (3.3.17)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดเป็น

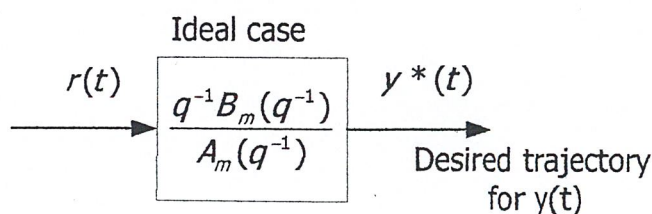
$$\begin{aligned} H_{CL}(q^{-1}) &= \frac{q^{-d}T(q^{-1})B(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1})H_2(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})R(q^{-1})H_1(q^{-1})} \\ &= \frac{q^{-d}T(q^{-1})B(q^{-1})}{P(q^{-1})} \end{aligned} \quad (3.3.18)$$

ดังนั้นเราต้องแก้สมการใหม่ซึ่งจะเปลี่ยนจาก(3.3.6) เป็น

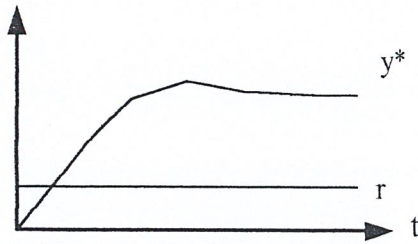
$$A(q^{-1})H_2(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})H_1(q^{-1})R(q^{-1}) = P(q^{-1}) \quad (3.3.19)$$

### 3.3.3 การติดตามสัญญาณ (การคำนวณค่า $T(q^{-1})$ )

ในทางอุดมคติ เมื่อสัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนไป เอาท์พุทของระบบ  $y(t)$  จะต้องเปลี่ยนไปตามเส้นทาง  $y^*(t)$  ที่ต้องการ ซึ่งเส้นทางนี้จะถูกเก็บหรือถูกสร้าง ในเวลาที่สัญญาณอ้างอิงเปลี่ยน โดยใช้แบบจำลองการอ้างอิง ดังรูปที่ 3.3.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3.3 เส้นทาง  $y^*$  ที่ต้องการ

ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองการอ้างอิง คือ

$$H_m(q^{-1}) = \frac{q^{-1}B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})} \quad (3.3.20)$$

โดยทั่วไปจะพิจารณาจากคุณสมบัติที่ต้องการ ( $t_R, t_S, overshoot$ ) ตัวอย่างเช่น เมื่อรู้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเวลาต่อเนื่องและรู้คาบเวลาการสุ่ม ( $T_S$ ) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองการอ้างอิงจากการดิสครีต ซึ่งอยู่ในรูป

$$\frac{q^{-1}B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})} = \frac{q^{-1}(b_{m0} + b_{m1}q^{-1})}{1 + a_{m1}q^{-1} + a_{m2}q^{-2}} \quad (3.3.21)$$

ตัวควบคุมจะต้องมีฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณอ้างอิง  $r$  และเอาต์พุต  $y$  ดังข้างต้นนี้ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของการวางตำแหน่งโพล ไม่อาจจะกระทำได้เพราะ

- ซีโรของระบบยังคงมีอยู่ (พหุนาม  $B(q^{-1})$ )
- เวลาหน่วงไม่สามารถขจัดหายได้

ดังนั้น การจะเข้าใกล้เส้นทางของสัญญาณอ้างอิง กำหนดโดย

$$y^*(t) = \frac{q^{-(d+1)}B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})} r(t) \quad (3.3.22)$$

$y^*(t+d+1)$  ถูกสร้างจาก  $r(t)$

$$y^*(t+d+1) = \frac{B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})} r(t) \quad (3.3.23)$$

และการเลือก  $T(q^{-1})$  ต้องให้แน่ใจว่า

- ได้เกินระหว่าง  $y^*$  และ  $y$  ที่สถานะคงตัวเป็นหนึ่ง
- การขจัดซีโรการกำจัดสัญญาณรบกวน  $P(q^{-1})$  (เพราะการกำจัดสัญญาณรบกวนอยู่ในรูปแบบที่แตกต่างจากการติดตามสัญญาณ  $A_m(q^{-1})$ )

ทำให้ได้ข้อกำหนด ดังนี้

$$T(q^{-1}) = GP(q^{-1}) \tag{3.3.24}$$

และ 
$$G = \begin{cases} 1/B(1) & \text{if } B(1) \neq 0 \\ 1 & \text{if } B(1) = 0 \end{cases} \tag{3.3.25}$$

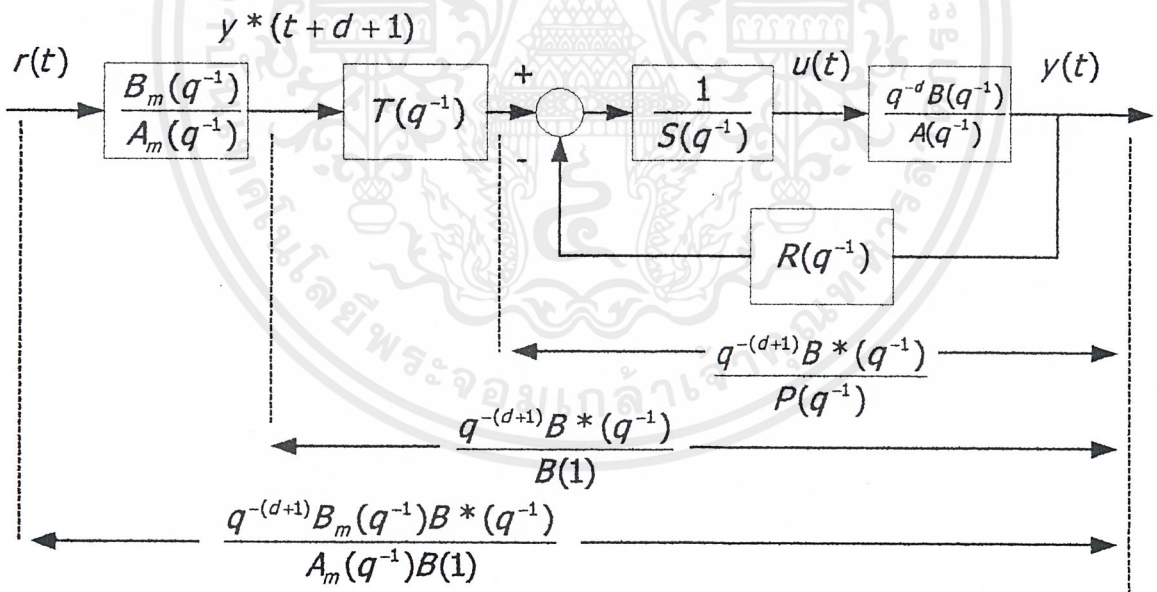
สมการของกฎการควบคุมจะกลายเป็น

$$S(q^{-1})u(t) + R(q^{-1})y(t) = T(q^{-1})y^*(t+d+1) \tag{3.3.26a}$$

ย้ายเทอม  $R(q^{-1})y(t)$  ไปทางขวาแล้วหารด้วย  $S(q^{-1})$  จะได้  $u(t)$

$$u(t) = \frac{T(q^{-1})y^*(t+d+1) - R(q^{-1})y(t)}{S(q^{-1})} \tag{3.3.26b}$$

ซึ่งจะได้ไคอะแกรมการวางตำแหน่งโพลดังรูปที่ 3.3.4



รูปที่ 3.3.4 การวางตำแหน่งโพล : การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวน

ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณอ้างอิง และเอาต์พุตเป็น

$$H_{cl}(q^{-1}) = \frac{q^{-(d+1)} B_m(q^{-1}) B^*(q^{-1})}{A_m(q^{-1}) B(1)} \tag{3.3.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณหาค่า  $u(t)$  จากสมการ (3.3.26a) ให้ใส่ค่าของพหุนาม  $S(q^{-1})$  ที่ให้ไว้ในสมการ (3.3.9) ทำให้เขียนได้เป็น

$$u(t) = GP(q^{-1})y^*(t+d+1) - R(q^{-1})y(t) - s^*(q^{-1})u(t-1) \quad (3.3.28)$$

โดยที่  $y^*(t+d+1)$  และ  $G$  ได้จากสมการ (3.3.23) และ (3.3.25) ตามลำดับ สมการของตัวควบคุมสำหรับการวางตำแหน่งโพลภายใต้รูปแบบต่างๆกันสรุปในตารางที่ 3.3.1

### สมการกฎการควบคุม ของวิธีการวางตำแหน่งโพล

$$u(t) = \frac{T(q^{-1})y^*(t+d+1) - R(q^{-1})y(t)}{S(q^{-1})}$$

$$S(q^{-1})u(t) + R(q^{-1})y(t) = GP(q^{-1})y^*(t+d+1) = T(q^{-1})y^*(t+d+1)$$

$$S(q^{-1}) = 1 + q^{-1}s^*(q^{-1})$$

$$u(t) = GP(q^{-1})y^*(t+d+1) - R(q^{-1})y(t) - s^*(q^{-1})u(t-1)$$

$$y^*(t+d+1) = \frac{B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})} r(t)$$

$$A_m(q^{-1}) = 1 + q^{-1}A_m^*(q^{-1})$$

$$y^*(t+d+1) = -A_m^*(q^{-1})y(t+d) + B_m(q^{-1})r(t)$$

$$B_m(q^{-1}) = b_{m0} + b_{m1}q^{-1} + \dots$$

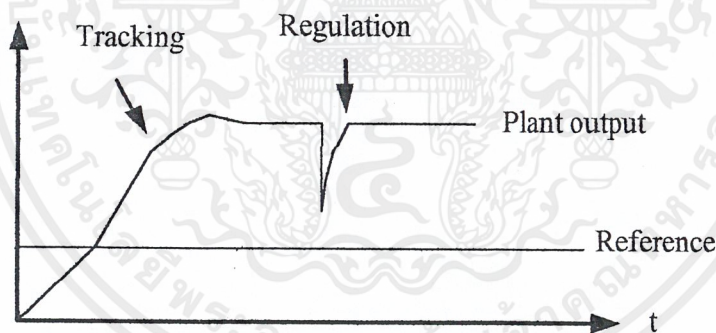
$$A_m(q^{-1}) = 1 + a_{m1}q^{-1} + a_{m2}q^{-2} + \dots$$

ตาราง 3.3.1 สมการกฎการควบคุม ของวิธีการวางตำแหน่งโพล

### 3.4 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระ ( tracking and regulation with independent objective )

การออกแบบด้วยวิธีนี้จะทำให้การติดตามสัญญาณที่ต้องการ(เมื่อเปลี่ยนสัญญาณอ้างอิง)เป็นอิสระ ไม่ขึ้นกับการกำจัดสัญญาณรบกวน คุณสมบัติดังรูปที่ 3.4.1 เป็นสถานการณ์ที่เวลาของผลตอบสนองในการกำจัดสัญญาณรบกวนมีความสำคัญหรือมีผลน้อยกว่าเวลาของผลตอบสนองเมื่อเปลี่ยนสัญญาณอ้างอิง แต่ในภาวะตรงกันข้ามก็อาจนำมาพิจารณาได้

วิธีนี้ทำให้ซีโรของแบบจำลองเวลา discrete ของแพลนท์ที่ไม่มีผลต่อระบบมาก ซึ่งไม่เหมือนวิธีการวางตำแหน่งโพล และวิธีนี้ทำให้การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยไม่ต้องมีการประมาณ



รูปที่ 3.4.1 การติดตามและการกำจัดสัญญาณรบกวน

วิธีนี้สามารถใช้ได้กับการออกแบบทั้งระบบที่เสถียรและไม่เสถียร โดย

- อันดับของพหุนาม  $A(q^{-1})$  และ  $B(q^{-1})$  ของฟังก์ชันถ่ายโอนของแพลนท์ เป็นอันดับใดก็ได้
- สามารถใช้กับระบบที่มีเวลาหน่วงได้

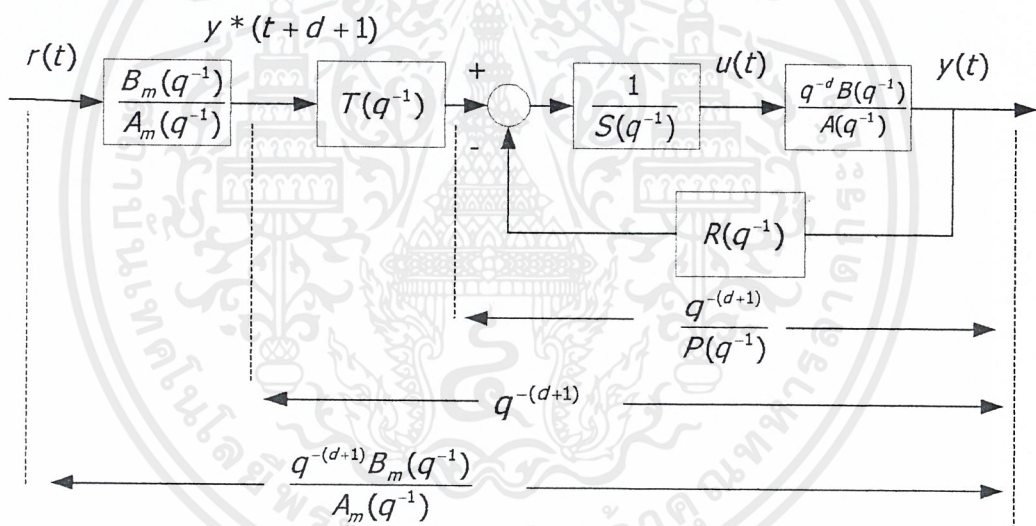
แม้ว่าซีโรจะไม่มีผลต่อระบบมากนัก แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ประยุกต์ใช้กับแบบจำลองเวลา discrete ที่มีซีโรที่ทำให้ระบบเสถียรเท่านั้น ซึ่งเรียกว่า minimum phase systems ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่สามารถใช้เวลามากกว่าครึ่งหนึ่งของเวลาการสุ่ม ( $0.5T_s$ )

สิ่งที่ควรรู้เกี่ยวกับซีโรที่ไม่เสถียรอาจเกิดขึ้นได้จากการสุ่มระบบเวลาต่อเนื่องที่ฟังก์ชันถ่ายโอนมีผลต่างของอันดับของตัวเศษและตัวส่วนมากกว่าอันดับสอง ด้วยการสุ่มเวลาที่เร็วเกินไป

### 3.4.1 โครงสร้าง

โครงสร้างของระบบวงปิดแสดงได้ดังรูปที่ 3.4.2 โพลวงปิดบอกได้ด้วยพหุนาม  $P(q^{-1})$  ซึ่งจะเป็นตัวระบุพฤติกรรมกรรมการกำจัดสัญญาณรบกวน

ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณอ้างอิง  $r(t)$  กับเอาต์พุตของระบบ  $y(t)$  ซึ่งเป็นตัวบอกพฤติกรรมกรรมการติดตามสัญญาณ คือ  $\frac{q^{-(d+1)}B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})}$  และจะได้เอาต์พุตของแบบจำลองการติดตามสัญญาณที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น  $B_m(q^{-1})/A_m(q^{-1})$  เป็นเส้นทางที่ต้องการ  $y^*$  เมื่อมีการแปลงแล้วจะเลื่อนไป  $d+1$  ชั้น



รูปที่ 3.4.2 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณด้วยวิธีอิสระ

แพลนที่ที่จะควบคุมมีฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการ(3.3.1) พหุนาม  $A(q^{-1})$  และ  $B(q^{-1})$  เป็นดังสมการ (3.3.2)และ (3.3.3) ในกรณีนี้พหุนาม  $A(q^{-1})$  และ  $B(q^{-1})$  สามารถมีตัวร่วมได้

การคำนวณค่า  $R(q^{-1}), S(q^{-1})$  และ  $T(q^{-1})$  มี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรก กำหนดค่าโพลวงปิดที่ต้องการซึ่งระบุค่าโดยพหุนาม  $P(q^{-1})$  และซีโรของแบบจำลองเวลา discrete สามารถละทิ้งได้ เราจะได้ค่า  $R(q^{-1}), S(q^{-1})$  ขึ้นต่อไป พิจารณาหา  $T(q^{-1})$  เพื่อกำหนดให้เอาต์พุตของแพลนที่เป็นดังที่ต้องการ  $y^*$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การกำจัดสัญญาณรบกวน (การคำนวณค่า $R(q^{-1}), S(q^{-1})$ )

เมื่อไม่คิด  $T(q^{-1})$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดเป็น

$$\begin{aligned} H_{CL}(q^{-1}) &= \frac{q^{-(d+1)} B^*(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-(d+1)} B^*(q^{-1})R(q^{-1})} \\ &= \frac{q^{-(d+1)}}{P(q^{-1})} = \frac{q^{-(d+1)} B^*(q^{-1})}{B^*(q^{-1})P(q^{-1})} \end{aligned} \quad (3.4.1)$$

พลควรกำหนดด้วยค่าของ  $P(q^{-1})$  และซีโรของระบบสามารถหาได้ จากสมการ (3.4.1) โพลวงปิดต้องมีซีโรของแพลนท์ด้วย และจากสมการนี้สามารถคำนวณหาค่า  $R(q^{-1}), S(q^{-1})$  ได้ โดยการแก้สมการ

$$A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-(d+1)} B^*(q^{-1})R(q^{-1}) = B^*(q^{-1})P(q^{-1}) \quad (3.4.2)$$

อย่างไรก็ตาม เพื่อสะดวก  $B^*(q^{-1})$  แล้ว  $S(q^{-1})$  ควรมี  $B^*(q^{-1})$  เป็นตัวร่วม ดังนี้

$$\begin{aligned} S(q^{-1}) &= s_0 + s_1 q^{-1} + \dots + s_{m+d} q^{-m-d} \\ &= B^*(q^{-1})S'(q^{-1}) \end{aligned} \quad (3.4.3)$$

โดยที่ 
$$S'(q^{-1}) = 1 + s'_1 q^{-1} + \dots + s'_d q^{-d} \quad (3.4.4)$$

นำค่า  $S(q^{-1})$  ในสมการ (3.4.3) แทนลงในสมการ (3.4.2) และจัดรูปจะได้

$$A(q^{-1})S'(q^{-1}) + q^{-(d+1)} R(q^{-1}) = P(q^{-1}) \quad (3.4.5)$$

สมการพหุนามนี้มีวิธีแก้พิเศษ โดยกำหนด

$$\deg P(q^{-1}) \leq n+d \quad \deg S'(q^{-1}) = d \quad \deg R(q^{-1}) = n-1 \quad (3.4.6)$$

และ

$$R(q^{-1}) = r_0 + r_1 q^{-1} + \dots + r_{n-1} q^{-n+1} \quad (3.4.7)$$

ภายใต้เงื่อนไขของสมการ (3.4.6) จะได้สมการ (3.4.5) เป็นสมการเชิงเส้นมีอันดับ  $(n+d+1)$  ซึ่งจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$Mx = p \quad (3.4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### การกรองสัญญาณ

ถ้าต้องการใส่ตัวกรองเข้าไปในย่านความถี่หนึ่ง (อาจจะเป็นการลดสัญญาณรบกวนหรือปรับค่าสัญญาณควบคุมให้น้อยลง) โพลที่เกิดจากการเพิ่มตัวกรองเข้าไปกำหนดโดย  $F(q^{-1})$  และต้องเป็นโพลของระบบวงปิดด้วย ในกรณีนี้ สมการ(3.4.1),(3.4.2),(3.4.5) และ(3.4.12) จะถูกแทนที่ด้วย  $P(q^{-1})F(q^{-1})$  ตัวอย่างเช่น  $P(q^{-1})$  กำหนดเป็นพหุนามอันดับหนึ่ง และ  $F(q^{-1}) = 1 + f_1 q^{-1}$  โดยที่  $-0.3 < f_1 < 0$  ใส่เข้าไปเพื่อลดค่าของสัญญาณควบคุม  $u(t)$  ระหว่างการเปลี่ยนสัญญาณเสถียรของสัญญาณรบกวน

### 3.4.3 การติดตามสัญญาณ (การคำนวณค่า $T(q^{-1})$ )

$T(q^{-1})$  จะถูกใส่เข้าไปเพื่อให้ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณอ้างอิง  $r(t)$  และเอาต์พุตระบบ  $y(t)$  เป็น

$$H_{CL}(q^{-1}) = \frac{q^{-(d+1)} B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})} = \frac{B_m(q^{-1})T(q^{-1})q^{-(d+1)}}{A_m(q^{-1})P(q^{-1})} \quad (3.4.13)$$

จากสมการ(3.4.13)จะได้

$$T(q^{-1}) = P(q^{-1}) \quad (3.4.14)$$

เมื่ออินพุตของ  $T(q^{-1})$  เปลี่ยนไป  $(d+1)$  จัน ค่าของ  $y^*(t)$  จะได้จากการป้อน  $r(t)$  ผ่านแบบจำลองการอ้างอิง  $(B_m(q^{-1})/A_m(q^{-1}))$  ดังนี้

$$y^*(t+d+1) = \frac{B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})} r(t) \quad (3.4.15)$$

สมการการควบคุมจะกลายเป็น

$$S(q^{-1})u(t) + R(q^{-1})y(t) = P(q^{-1})y^*(t+d+1) \quad (3.4.16)$$

หรืออยู่ในรูป

$$u(t) = \frac{P(q^{-1})y^*(t+d+1) - R(q^{-1})y(t)}{S(q^{-1})} \quad (3.4.17)$$

นำค่า  $S(q^{-1})$  ซึ่งอยู่ในรูป

$$\begin{aligned} S(q^{-1}) &= s_0 + s_1 q^{-1} + \dots + s_{m+d} q^{-m-d} = s_0 + q^{-1} S^*(q^{-1}) \\ &= B^*(q^{-1}) S'(q^{-1}) \end{aligned} \quad (3.4.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณา  $B^*(q^{-1})$  และ  $S'(q^{-1})$  จะได้

$$s_0 = b_1 \quad (3.4.19)$$

ดังนั้น สมการ(3.4.16)สามารถจัดให้อยู่ในรูป

$$u(t) = \frac{1}{b_1} [P(q^{-1})y^*(t+d+1) - S^*(q^{-1})u(t-1) - R(q^{-1})y(t)] \quad (3.4.20)$$

### 3.5 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการเพิ่มอินพุตน้ำหนัก ( tracking and regulation with weighted input )

วิธีนี้พัฒนามาจาก การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระเพื่อใช้กับระบบที่แบบจำลองเวลาติดครีตของแพลนท์มีพหุนาม  $B(q^{-1})$  ซึ่งมีซีโรที่เสถียรหรือไม่เสถียร กระทำได้โดยเพิ่มค่าน้ำหนักให้กับสัญญาณควบคุมซึ่งได้จากการใช้วิธีการออกแบบ การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระผลของการเพิ่มค่าน้ำหนักโดยการปรับปรุง  $S(q^{-1})$  ของตัวควบคุม ไม่เพียงแต่ใช้กับระบบที่ซีโรมีผลกับระบบ(ไม่สามารถละทิ้งได้)แต่ยังใช้กับโพลวงปิดที่มีการแก้ไขด้วย

วิธีนี้ประยุกต์ใช้ได้ง่ายสำหรับแพลนท์ที่มีซีโรซึ่งไม่เสถียร แต่โพลของระบบเสถียร การออกแบบวิธีนี้สามารถ

- ลดพลังงานการควบคุมด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์เพียงตัวเดียว
- ควบคุมแพลนท์ที่แบบจำลองเวลาติดครีตมีซีโรซึ่งไม่เสถียร

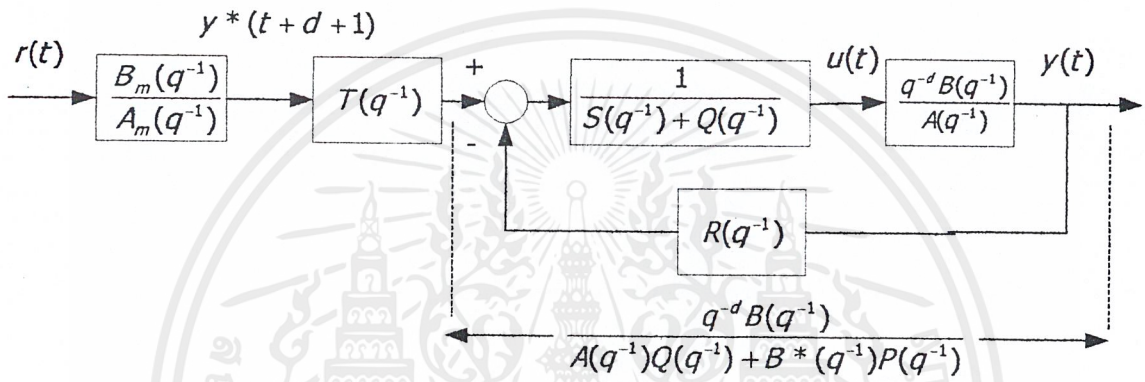
#### 3.5.1 โครงสร้าง

โครงสร้างของระบบวงปิดแสดงได้ดังรูปที่ 3.5.1 พหุนาม  $S(q^{-1})$  ซึ่งเกิดจากวิธีการติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระถูกแทนที่ด้วย  $S(q^{-1}) + Q(q^{-1})$  ในความเป็นจริงแล้ว ถ้า  $Q(q^{-1}) = 0$  ก็จะเหมือนวิธีการติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระนั่นเอง พหุนามน้ำหนักของอินพุตมีรูปแบบ ดังนี้

$$Q(q^{-1}) = \frac{\lambda(1-q^{-1})}{1+\alpha q^{-1}}; \quad \lambda \geq 0 \quad (3.5.1)$$

โดยที่  $\lambda$  เป็นค่าน้ำหนักของอินพุตของแพลนท์ (สัญญาณควบคุม) และ  $(1+\alpha q^{-1})$  เป็นผลของการใส่ตัวกรองเพิ่มเข้าไป

การเพิ่มพหุนามนำหน้า  $Q(q^{-1})$  จะช่วยปรับปรุงโพลวงปิดที่กำหนดโดยพหุนาม  $P(q^{-1})$  ดังนั้น แต่ละค่าของ  $\lambda$  จะต้องทำให้ระบบวงปิดเสถียรอยู่และมีความเพี้ยนของสัญญาณที่ยอมรับได้ (คือให้ใกล้เคียงกับลักษณะที่กำหนด)



รูปที่ 3.5.1 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีเพิ่มอินพุตนำหน้า

3.5.2 การออกแบบตัวควบคุม

วิธีการออกแบบตัวควบคุมมี 2 ขั้นตอน โดยในขั้นแรกคำนวณพหุนาม  $R(q^{-1}), S(q^{-1})$  และ  $T(q^{-1})$  โดยให้  $Q(q^{-1}) = 0$  แล้วใช้วิธีการติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระแม้ว่า  $B(q^{-1})$  จะมีซีโรที่ไม่เสถียรก็ตาม ขั้นต่อไปเพิ่มพหุนาม  $Q(q^{-1})$  ที่นิยามด้วยสมการ (3.5.1) ด้วยค่า  $\lambda > 0$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดที่ไม่คิดค่าของ  $T(q^{-1})$  เป็น

$$H_{cl}(q^{-1}) = \frac{q^{-d} B(q^{-1})}{A(q^{-1})[S(q^{-1}) + Q(q^{-1})] + q^{-(d+1)} B^*(q^{-1}) R(q^{-1})} = \frac{q^{-d} B(q^{-1})}{A(q^{-1})Q(q^{-1}) + B^*(q^{-1})P(q^{-1})} \tag{3.5.2}$$

เนื่องมาจาก สมการที่ (3.4.2)

$$A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-(d+1)} B^*(q^{-1}) R(q^{-1}) = B^*(q^{-1})P(q^{-1}) \tag{3.5.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ  $Q(q^{-1}) = 0$  จะได้  $H_{CL}(q^{-1}) = q^{-(d+1)}/P(q^{-1})$  โดยทั่วไป  $\lambda$  จะเลือกให้มีค่าน้อยกว่า 1 และพหุนาม  $[A(q^{-1})Q(q^{-1}) + B^*(q^{-1})P(q^{-1})]$  จะบอกถึงค่าโพลวงปิด และเมื่อกำหนดค่าต่างแล้ว จะได้ระบบเสถียรแบบอะซิมโทติก (asymptotically stable) ถ้าไม่ได้ผลเช่นนี้แล้ว ต้องทำการเปลี่ยนค่า  $\lambda$  นอกจากนี้ การเพิ่มค่านำหนักด้วย  $Q(q^{-1})$  (ต้องแน่ใจว่าจะได้ระบบวงปิดที่เสถียรอยู่) จะมีผลต่อการปรับปรุงโพลวงปิดที่นิยามด้วย  $P(q^{-1})$  ดังนั้นจึงควรเลือกค่า  $\lambda$  ที่น้อยที่สุดที่ทำให้ระบบวงปิดยังเสถียรอยู่

ถ้า  $B^*(q^{-1})$  ไม่เสถียร ให้ทำการเลือกค่า  $\lambda$  ที่น้อยที่สุด จะทำให้ได้ค่า  $S(q^{-1}) + Q(q^{-1})$  ที่เสถียร สำหรับค่า  $\alpha = 0$  (เพราะ  $S(q^{-1}) = B^*(q^{-1})S'(q^{-1})$  ไม่เสถียร)

### ตัวอย่าง

พิจารณา

$$S(q^{-1}) = B^*(q^{-1}) = b_1 + b_2 q^{-1} \quad \text{ด้วยข้อกำหนด } \left| \frac{b_2}{b_1} \right| > 1$$

ทำการเลือก

$$Q(q^{-1}) = \lambda(1 - q^{-1}); \quad \alpha > 0; \quad \lambda > 0$$

จะได้

$$S(q^{-1}) + Q(q^{-1}) = (b_1 + \lambda) + (b_2 - \lambda)q^{-1}$$

และจะทำการเลือกค่า  $\lambda$  ที่ทำให้ซีโรของพหุนามนี้อยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วย คือ

$$\left| \frac{b_2 - \lambda}{b_1 + \lambda} \right| < 1$$

หลังจากนั้น เสถียรภาพของระบบต้องถูกทดสอบ

สมการกฎการควบคุมเขียนได้เป็น

$$S(q^{-1})u(t) + R(q^{-1})y(t) + Q(q^{-1})u(t) = T(q^{-1})y^*(t+d+1) \quad (3.5.4)$$

ด้วยข้อกำหนด

$$T(q^{-1}) = P(q^{-1}) \quad (3.5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $y^*(t+d+1)$  จะถูกสร้างด้วยแบบจำลองการติดตามสัญญาณ (ดูจากสมการ(3.4.15))

สมการ (3.5.4) สามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่ง คือ

$$u(t) = \frac{P(q^{-1})y^*(t+d+1) - R(q^{-1})y(t)}{S(q^{-1}) + Q(q^{-1})} \quad (3.5.6)$$

### 3.5.3 การอธิบายกฎการควบคุม

กฎการควบคุม (3.5.6) ทำให้สมการกำลังสองนี้มีค่าน้อยสุด

$$J(t+d+1) = \left\{ P(q^{-1})[y(t+d+1) - y^*(t+d+1)]^2 + b_1 \lambda \left[ \frac{Q(q^{-1})}{\lambda} u(t) \right]^2 \right\} \quad (3.5.7)$$

หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่า มันจะทำการลดผลรวมของกำลังสองของการติดตามสัญญาณและกำลังสองของอินพุตน้ำหนักให้น้อยที่สุด

การจะลดค่าสมการกำลังสอง(3.5.7)ให้น้อยที่สุดได้ ต้องหา  $u(t)$  เพราะ  $\partial J(t+d+1)/\partial u(t) = 0$  เพื่อให้การคำนวณสำเร็จได้  $u(t)$  ควรจะอยู่ในรูปของ  $P(q^{-1})y(t+d+1)$  นำไปแทนในสมการ (3.5.3)จะได้

$$P(q^{-1})y(t+d+1) = [A(q^{-1})S'(q^{-1}) + q^{-(d+1)}R(q^{-1})]y(t+d+1) \quad (3.5.8)$$

อีกวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้ จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของแพลนท์(2.3.1) จะได้

$$A(q^{-1})y(t+d+1) = B^*(q^{-1})u(t) \quad (3.5.9)$$

นำสมการนี้แทนลงในสมการ(3.5.8) และนำสมการ(3.4.3)มาคิดด้วย จะได้

$$P(q^{-1})y(t+d+1) = S(q^{-1})u(t) + R(q^{-1})y(t) \quad (3.5.10)$$

โดย  $S(q^{-1}) = B^*(q^{-1})S'(q^{-1}) = b_1 + s_1q^{-1} + \dots + s_{m+d}q^{-m+d-1}$

$$= b_1 + q^{-1}S^*(q^{-1}) \quad (3.5.11)$$

นำสมการ(3.5.10)แทนลงในสมการ(3.5.7) จะได้  $J(t+d+1)$  อยู่ในรูปของ

$$J(t+d+1) = [b_1u(t) + S^*(q^{-1})u(t-1) + R(q^{-1})y(t) - P(q^{-1})y^*(t+d+1)]^2 + b_1 \lambda \left[ \frac{Q(q^{-1})}{\lambda} u(t) \right]^2 \quad (3.5.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{2} \frac{\partial J(t+d+1)}{\partial u(t)} = b_1[S(q^{-1})u(t) + R(q^{-1})y(t) - P(q^{-1})y^*(t+d+1)] + b_1Q(q^{-1})u(t) = 0 \quad (3.5.13)$$

ซึ่งจะทำให้ได้ค่าออปติมัลของ  $u(t)$  ดังนี้

$$u(t) = \frac{P(q^{-1})y^*(t+d+1) - R(q^{-1})y(t)}{S(q^{-1}) + Q(q^{-1})} \quad (3.5.14)$$

ซึ่งก็คือสมการของสัญญาณควบคุมที่ได้ในสมการ (3.5.6) ถ้าเราแทนที่เกณฑ์ที่นำมาพิจารณาจาก (3.5.7) เป็นเกณฑ์ใหม่ ดังนี้

$$J(t+d+1) = \{P(q^{-1})[y(t+d+1) - y^*(t+d+1)]^2 + Q(q^{-1})u(t)\}^2 \quad (3.5.15)$$

ก็จะได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกัน

### 3.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัลในภาวะต่างๆ หลายวิธี และตัวควบคุมดิจิทัลทุกตัวจะมีโครงสร้างสามกิ่งเหมือนกันที่เรียกว่า R-S-T

กฎการควบคุมมีสมการอยู่ในรูป

$$S(q^{-1})u(t) + R(q^{-1})y(t) = T(q^{-1})y^*(t+d+1)$$

หรือ

$$u(t) = \frac{T(q^{-1})y^*(t+d+1) - R(q^{-1})y(t)}{S(q^{-1})}$$

โดยมี  $u$  เป็นสัญญาณควบคุม

$y$  เป็นเอาต์พุตของแพลนท์

$y^*$  เป็นเส้นทางการติดตามสัญญาณ

และ  $d$  เป็นเวลาหน่วง

โดยทั่วไป การออกแบบตัวควบคุมมี 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. กำหนดพหุนาม  $S(q^{-1})$  และ  $R(q^{-1})$  ให้ตรงกับการกำจัดสัญญาณรบกวน
2. กำหนดพหุนาม  $T(q^{-1})$  เพื่อให้เอาต์พุตใกล้เคียงกับอินพุตเป็นคุณลักษณะการติดตามสัญญาณ

ตัวควบคุมดิจิทัลเหมาะสำหรับการควบคุมแพลนท์ที่มีเวลาหน่วง

ความซับซ้อนของตัวควบคุม (อันดับของพหุนาม  $S(q^{-1})$   $R(q^{-1})$  และ  $T(q^{-1})$ ) จะไม่ขึ้นกับวิธีการออกแบบแต่จะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของฟังก์ชันถ่ายโอนของแพลนท์เท่านั้น แบบจำลองเวลา discrete ของแพลนท์ที่ใช้ในการออกแบบ จะหาได้จากการคำนวณแบบจำลองเวลาต่อเนื่อง

สำหรับแพลนท์ที่มีอันดับต่ำๆ ( น้อยกว่าหรือเท่ากับสอง ) และมีเวลาหน่วงน้อยๆ ตัวควบคุมดิจิทัล PID ที่ได้จากการ discret ตัวควบคุมอนาล็อก PID สามารถนำมาใช้ได้

ตัวควบคุมดิจิทัล PID ที่ถูกออกแบบในระบบเวลา discrete จะต้องใช้แบบจำลองเวลา discrete ของแพลนท์ที่จะถูกควบคุม ในที่นี้ แสดงอยู่ 2 โครงสร้าง ซึ่งแตกต่างกันตรงพหุนาม  $T(q^{-1})$  เท่านั้น และการเลือก  $T(q^{-1}) = R(1)[PID2]$  จะให้คุณลักษณะการติดตามสัญญาณที่ดีกว่า

วิธีการติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระจะทำให้การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนได้ตรงกับที่ต้องการ แต่แบบจำลองเวลา discrete ของแพลนท์จะต้องมีซีโรที่เสถียรเท่านั้น

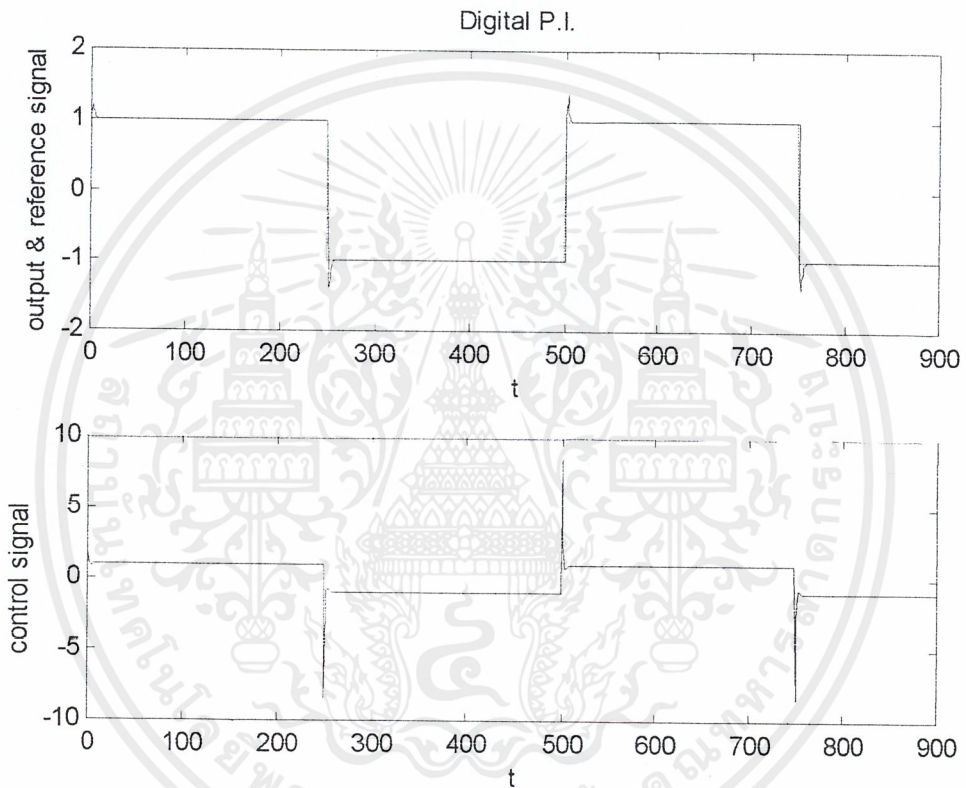
วิธีการติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีเพิ่มอินพุตน้ำหนัก เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจากวิธีการติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระ เพื่อใช้ในกรณีที่เป็นแบบจำลองเวลา discrete ของแพลนท์มีซีโรที่ไม่เสถียร อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ทำให้ได้คุณลักษณะวงปิดที่ไม่ดีนัก

วิธีการวางตำแหน่ง โพล ทำให้ได้คุณลักษณะการกำจัดสัญญาณรบกวนสำหรับแบบจำลองเวลา discrete ของแพลนท์ที่มีซีโรที่เสถียรและไม่เสถียร และได้คุณลักษณะการติดตามสัญญาณที่มีตัวกรองผ่านซีโรของแพลนท์

## บทที่ 4

## ตัวอย่างการทดลอง

## 4.1 ตัวควบคุมดิจิทัล PI



รูปที่ 4.1.1 ตัวควบคุมดิจิทัล PI

กำหนดแพลนที่อันดับหนึ่งที่มีเกน = 1 ค่าคงที่เวลา =  $4 T_s = 1$ ,  $\omega_0 = 1$ ,  $\zeta = 0.9$  ทำการดิสครีตจะ  
ได้  $B(q^{-1}) = 0.2122q^{-1}$ ,  $A(q^{-1}) = 1 - 0.7788q^{-1}$  ทำการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัลจะ  
ได้

$$S(q^{-1}) = (1 - q^{-1})$$

$$R(q^{-1}) = 4.7093 - 2.7735q^{-1}$$

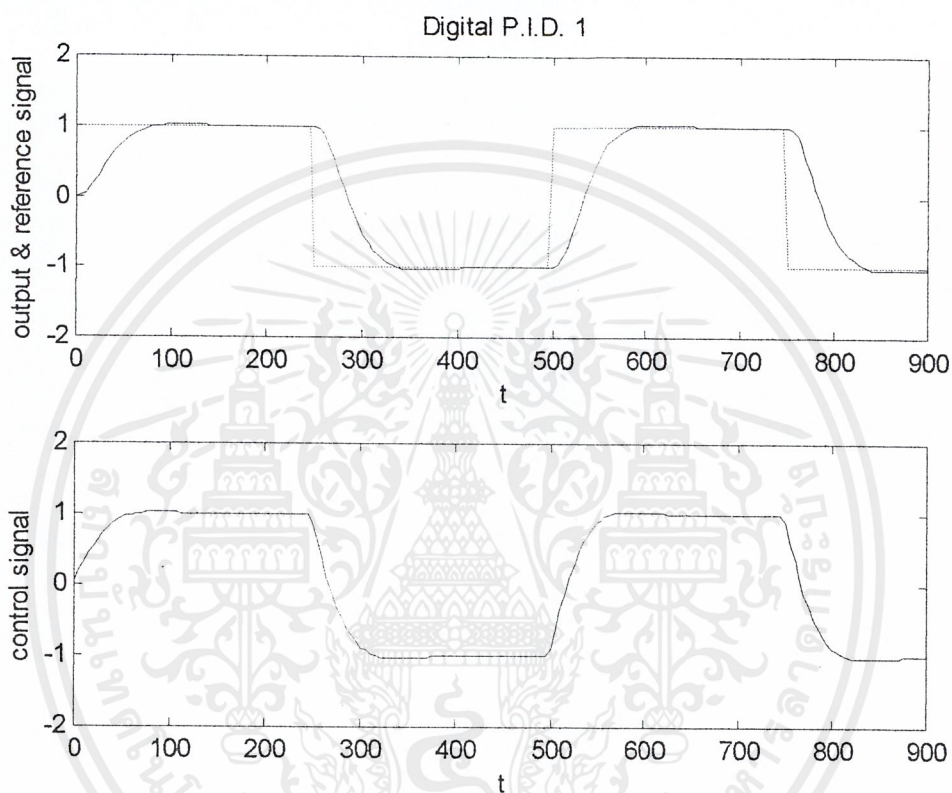
$$k = 2.7735, T_i = 1.4327, T_d = 0, T_d/N = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ตัวควบคุมดิจิทัล PID

### 4.2.1 ตัวควบคุมดิจิทัล PID1

-ระบบอันดับหนึ่ง



รูปที่ 4.2.1 ตัวควบคุมดิจิทัล PID1 เมื่อ  $\zeta = 0.8, \omega_0 = 0.05$

กำหนดพลนที่อันดับหนึ่งที่มี เกน=1 ค่าคงที่เวลา=10 เวลาห้วง=3 คาบเวลาการสุ่ม=5

$$G(s) = \frac{e^{-3s}}{10s + 1}$$

กรณีที่ 1

เลือก  $\zeta = 0.8, \omega_0 = 0.05$  ทำการดิสครีตพลนที่ได้

$$B(q^{-1}) = q^{-1}(0.1813 + 0.2122q^{-1})$$

$$A(q^{-1}) = 1 - 0.6065q^{-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

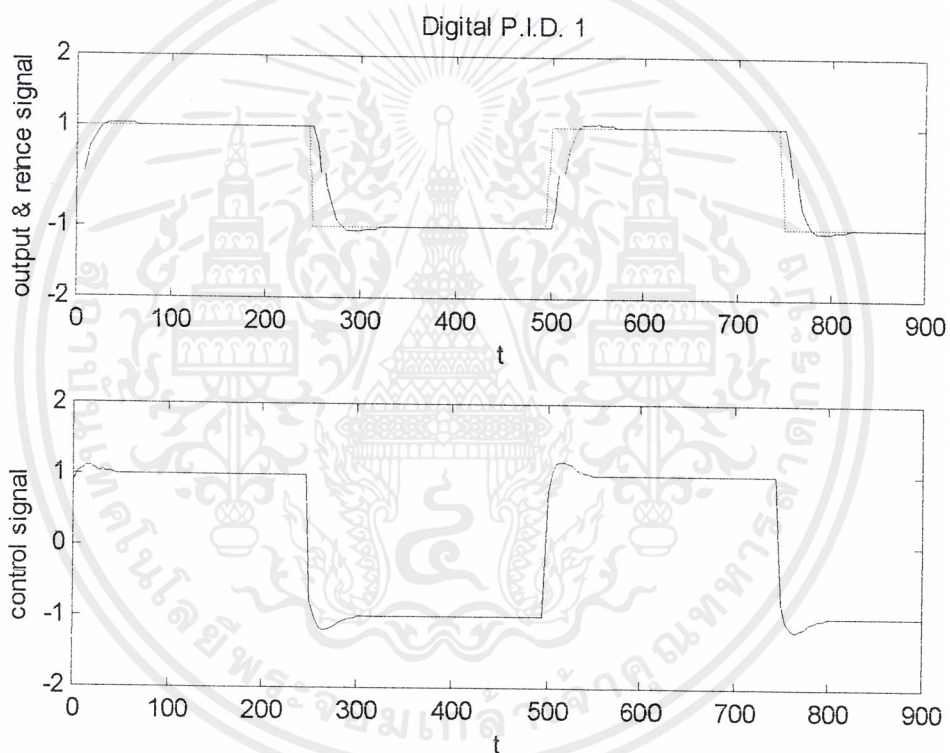
ทำการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัลได้

$$S(q^{-1}) = (1 - q^{-1})(1 - 0.0238q^{-1})$$

$$R(q^{-1}) = 0.0621 + 0.0681q^{-1}$$

$$k = 0.0730, T_i = -2.7375, T_d = -0.1220, T_d/N = 0.1220$$

กรณีที่ 2



รูปที่ 4.2.2 ตัวควบคุมดิจิทัล PID1 เมื่อ  $\omega_0 = 0.1$

เลือก  $\omega_0 = 0.1$  จะได้

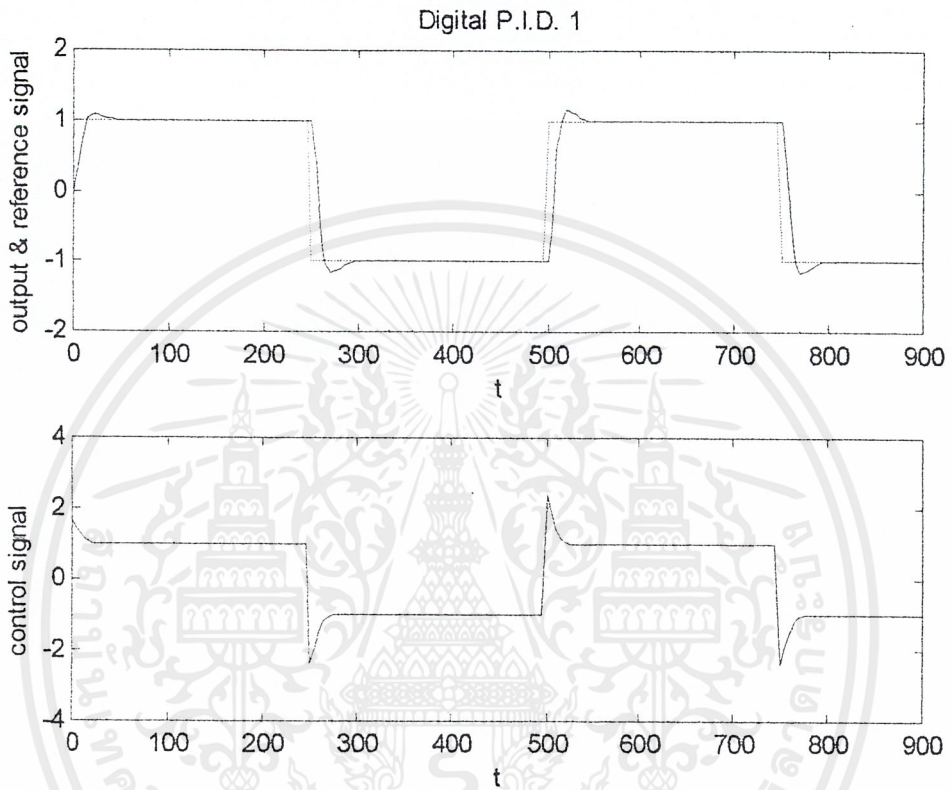
$$S(q^{-1}) = (1 - q^{-1})(1 + 0.1634q^{-1})$$

$$R(q^{-1}) = 0.8954 - 0.4670q^{-1}$$

$$k = 0.4531, T_i = 6.1533, T_d = -0.7022, T_d/N = 0.7022$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณี 3

รูปที่ 4.2.3 ตัวควบคุมดิจิทัล PID1 เมื่อ  $\omega_0 = 0.15$ 

เลือก  $\omega_0 = 0.15$  จะได้

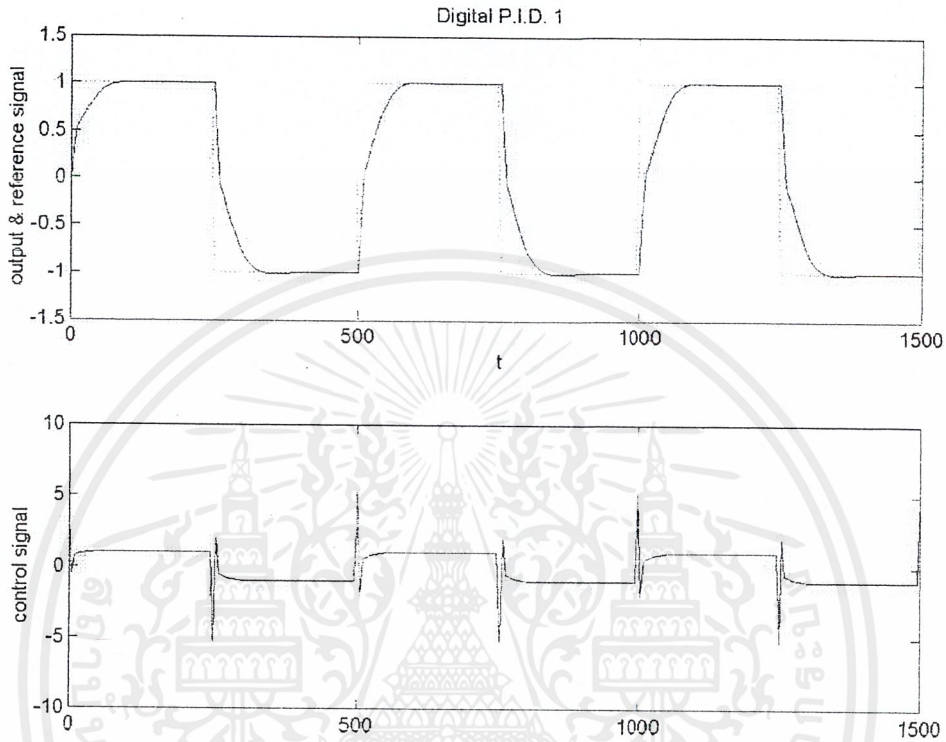
$$S(q^{-1}) = (1 - q^{-1})(1 + 0.3122q^{-1})$$

$$R(q^{-1}) = 1.6874 - 0.8924q^{-1}$$

$$k = 0.8242, T_i = 6.8019, T_d = 1.1896, T_d/N = -1.1896$$

จะสังเกตเห็นได้ว่า อัตราเร่งของผลตอบสนองจะเพิ่มขึ้น แต่ overshoot ก็จะมีสูงขึ้นด้วย

## -ระบบอันดับสอง

รูปที่ 4.2.4 ตัวควบคุมดิจิทัล PID1 เมื่อ  $\zeta = 0.8, \omega_0 = 0.05$ กำหนดพลาตที่อันดับสองที่มี  $\zeta = 0.9, \omega_0 = 0.1, T_s = 5, d = 0$ 

กรณีที่ 1

เลือก  $\zeta = 0.8, \omega_0 = 0.05$  ทำการดิสครีตพลาตที่ได้

$$B(q^{-1}) = q^{-1}(0.0928 + 0.0687q^{-1})$$

$$A(q^{-1}) = 1 - 1.2451q^{-1} + 0.4066q^{-2}$$

ทำการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัลได้

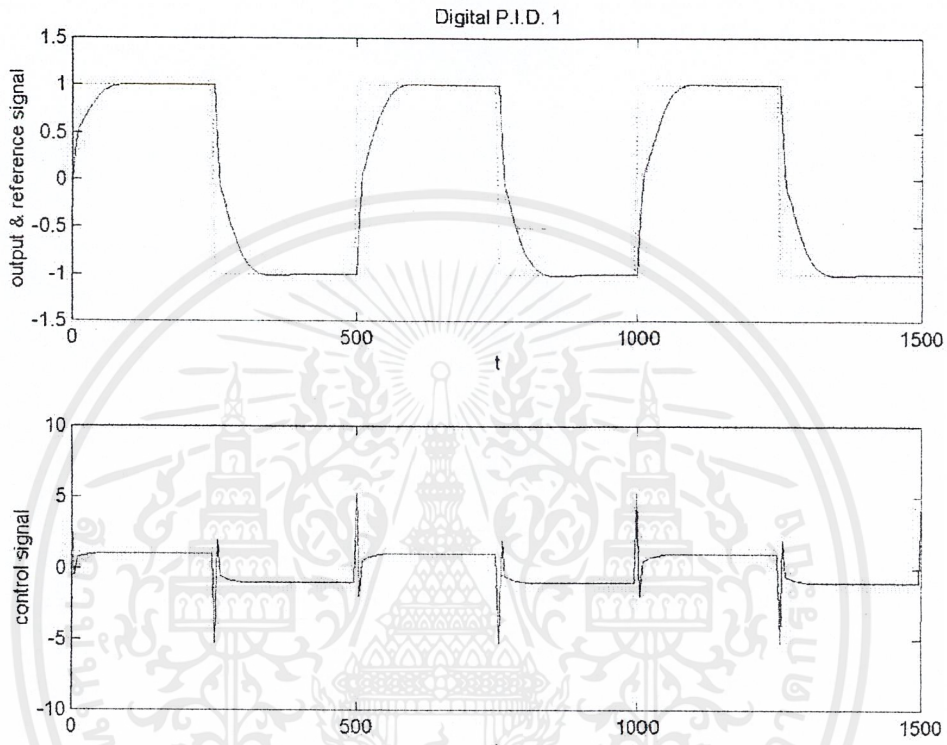
$$S(q^{-1}) = 1 - 0.6653q^{-1} - 0.3347q^{-2}$$

$$R(q^{-1}) = 3.1400 - 4.8034q^{-1} + 1.9807q^{-2}$$

$$k = 0.6905, T_i = 14.5191, T_d = 12.0009, T_d / N = -1.2537$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีศึกษาที่ 2

รูปที่ 4.2.5 ตัวควบคุมดิจิทัล PID1 เมื่อ  $\omega_0 = 0.1$ เลือก  $\omega_0 = 0.1$ 

ทำการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัลได้

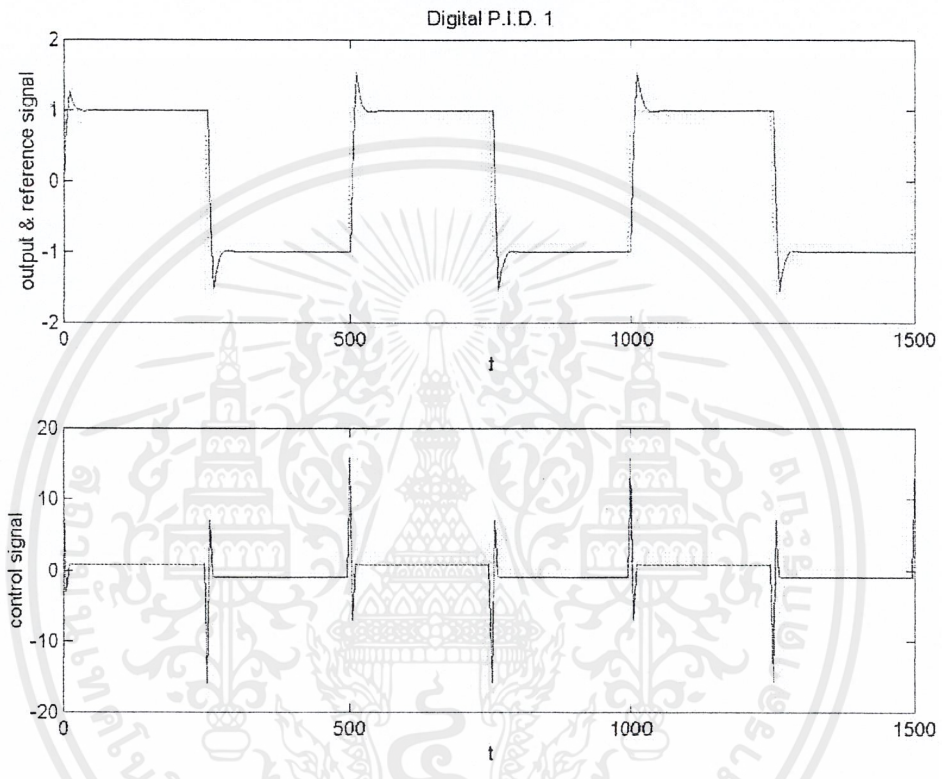
$$S(q^{-1}) = 1 - 0.5862q^{-1} - 0.4138q^{-2}$$

$$R(q^{-1}) = 5.9333 - 7.3385q^{-1} + 2.4490q^{-2}$$

$$k = 1.9423, T_i = 13.1525, T_d = 5.9228, T_d/N = -1.4634$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีที่ 3

รูปที่ 4.2.6 ตัวควบคุมคิติดอล PID1 เมื่อ  $\omega_0 = 0.15$ 

เลือก  $\omega_0 = 0.15$

ทำการออกแบบตัวควบคุมคิติดอลได้

$$S(q^{-1}) = 1 - 0.5250q^{-1} - 0.4750q^{-2}$$

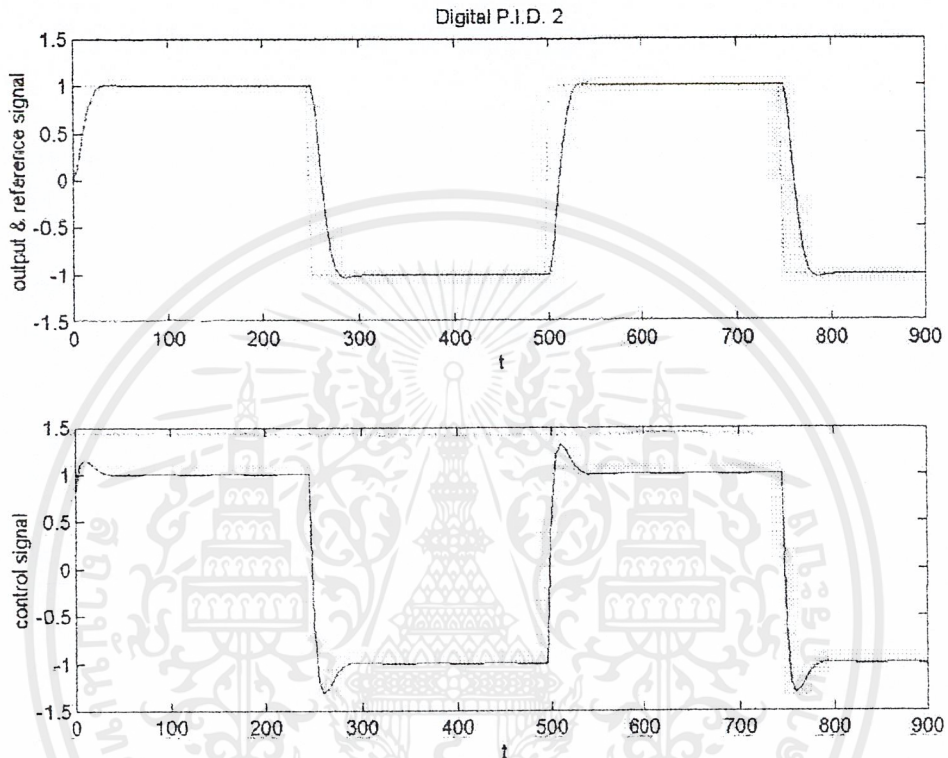
$$R(q^{-1}) = 8.4252 - 9.2991q^{-1} + 2.8112q^{-2}$$

$$k = 2.9156, T_i = 11.0990, T_d = 4.8786, T_d/N = -1.6101$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ตัวควบคุมดิจิทัล PID2

-ระบบอันดับหนึ่ง



รูปที่ 4.2.7 ตัวควบคุมดิจิทัล PID2 เมื่อ  $\omega_0 = 0.15$

กำหนดพารามิเตอร์เหมือน PID1 และ  $\zeta = 0.8, \omega_0 = 0.15$  จะได้

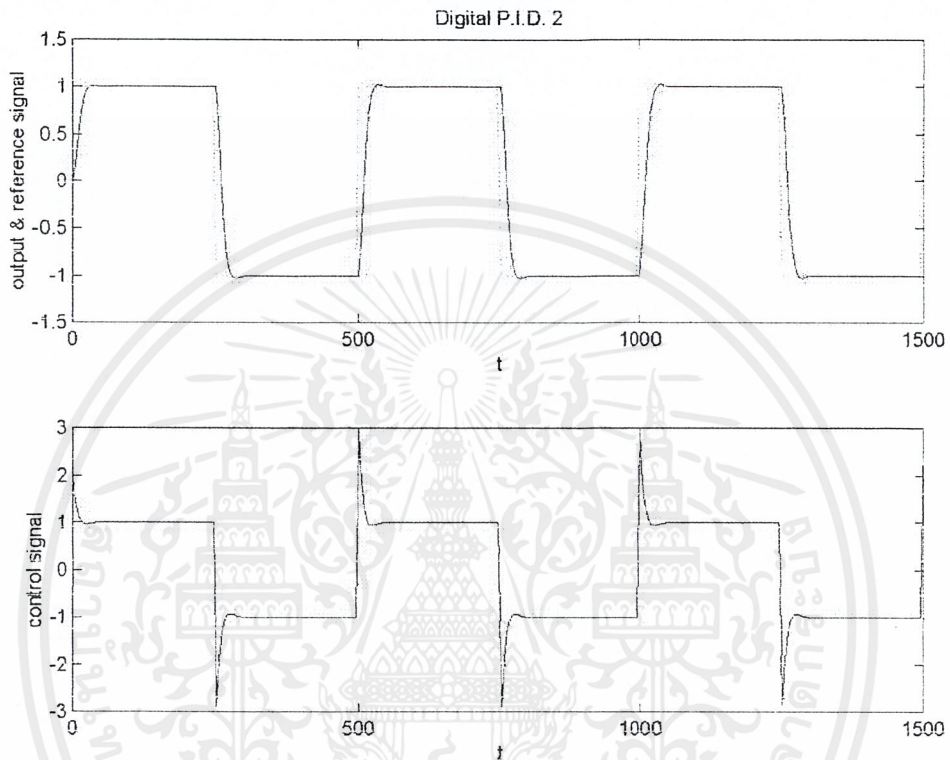
$$S(q^{-1}) = (1 - q^{-1})(1 + 0.3122q^{-1})$$

$$R(q^{-1}) = 1.6874 - 0.8924q^{-1}$$

$$k = 0.68002, T_i = 5.6122, T_d = 1.1896, T_d/N = -1.1896$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## -ระบบอันดับสอง

รูปที่ 4.2.8 ตัวควบคุมดิจิทัล PID2 เมื่อ  $\omega_0 = 0.15$ 

กำหนดแพลนท์อันดับสองเหมือน PID1 (กรณีที่3) จะได้

$$S(q^{-1}) = 1 - 0.5250q^{-1} - 0.4750q^{-2}$$

$$R(q^{-1}) = 8.4252 - 9.2991q^{-1} + 2.8112q^{-2}$$

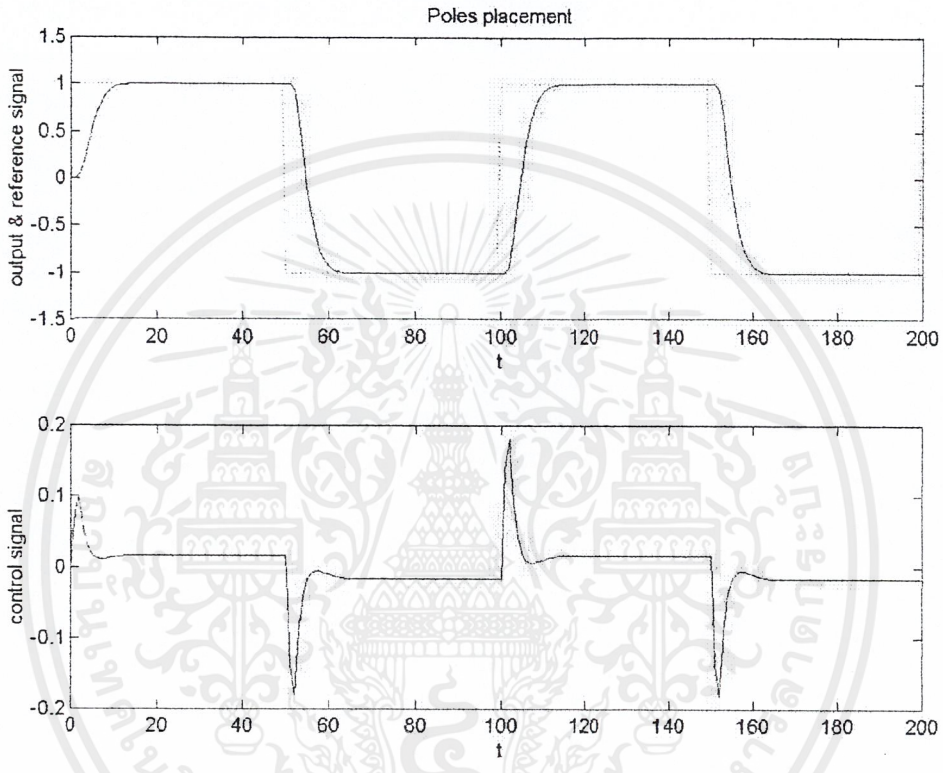
$$k = 2.4927, T_i = 9.4889, T_d = 5.4332, T_d/N = -1.6101$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การวางตำแหน่งโพล

#### (Poles Placement)

-ระบบอันดับสอง



รูปที่ 4.3.1 การวางตำแหน่งโพล

กำหนดแพลนที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$B(q^{-1}) = 0.4q^{-1} + 0.8q^{-2}$$

$$A(q^{-1}) = 1 - 1.7q^{-1} + 0.72q^{-2}$$

และ  $T_s = 1, \omega_n = 1, \zeta = 0.9$  สำหรับการกำจัดสัญญาณ

และ  $T_s = 1, \omega_n = 0.5, \zeta = 0.9$  สำหรับการติดตามสัญญาณ

และมีตัวอินทิเกรตคิติดอล 
$$I(q^{-1}) = \frac{1}{(1 - q^{-1})}$$

ฟิลเตอร์ 
$$H_1(q^{-1}) = \frac{1}{0.9}(1 - 0.1q^{-1})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

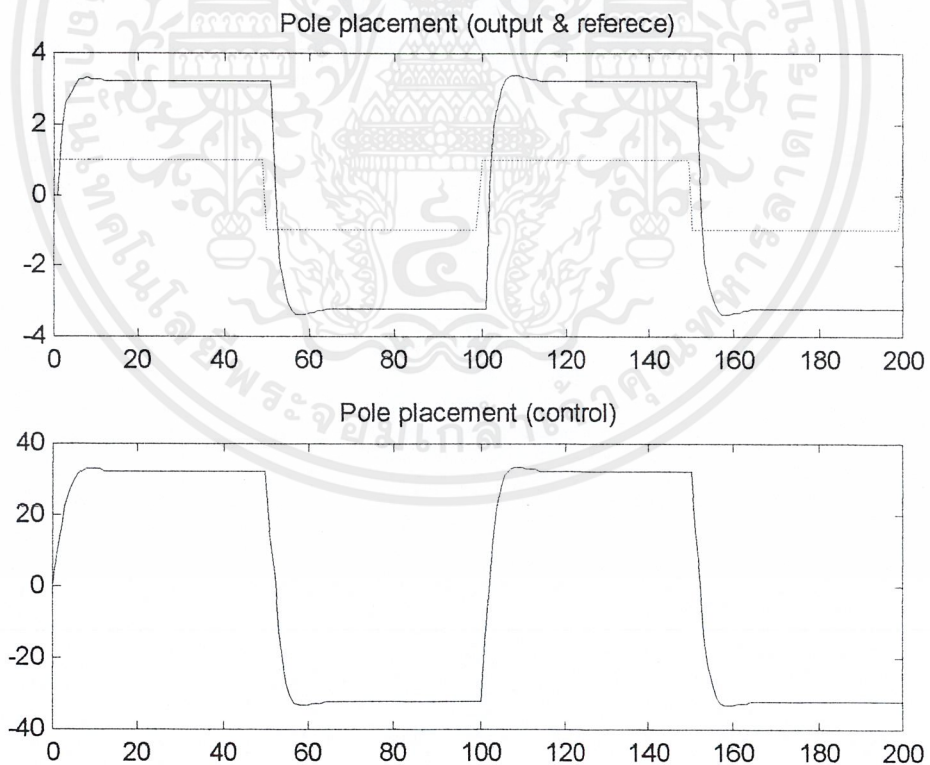
จะได้

$$S(q^{-1}) = 1 + 0.0181q^{-1} - 1.1297q^{-2} + 0.1115q^{-3}$$

$$R(q^{-1}) = 2.3615 - 3.2083q^{-1} + 1.3042q^{-2} - 0.1007q^{-3}$$

กำหนดให้ระบบมีค่า zero ที่ไม่เสถียร การเคลื่อนที่ของการติดตามสัญญาณ (พหุนามของ  $Am(q^{-1})$  และ  $Bm(q^{-1})$ ) จะได้มาจาก การคิดสครีตรบบอันดับสองของแบบจำลองเวลาต่อเนื่อง โดยใช้ค่า  $\omega_0 = 0.5$  รอบต่อวินาที และ  $\zeta = 0.9$  โดยให้การทำจัดสัญญาณรบกวนของระบบเร็วเป็นสองเท่าของการเคลื่อนที่ของการติดตามสัญญาณตัวควบคุม

-ระบบอันดับสูง



รูปที่ 4.3.2 การวางตำแหน่งโพล (สำหรับอันดับสูงๆ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดเพลาที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน ดังนี้

$$G(s) = \frac{s+1}{s^3 + 4s^2 + 6s + 10}$$

และกำหนด  $\zeta = 0.8, \omega = 0.05, T_s = 1$  สำหรับการติดตามสัญญาณ

และกำหนด  $\zeta = 0.8, \omega = 0.1, T_s = 1$  สำหรับการกำจัดสัญญาณรบกวน

และมีตัวอินทิเกรตคิติดอล  $I(q^{-1}) = \frac{1}{(1-q^{-1})}$

$$\text{ฟิลเตอร์ } H_1(q^{-1}) = \frac{1}{0.9}(1 - 0.1q^{-1})$$

จะได้

$$S(q^{-1}) = 1 - 1.1295q^{-1} - 0.002q^{-2} + 0.1449q^{-3} - 0.0134q^{-4}$$

$$R(q^{-1}) = 0.7633 - 0.3039q^{-1} + 1.9091q^{-2} - 0.2829q^{-3} + 0.0088q^{-4}$$

$$T(q^{-1}) = 6.4576 - 5.3754q^{-1} + 1.7383q^{-2} - 0.1183q^{-3}$$

#### 4.4 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระ ( tracking and regulation with independent objective )

กรณีที่ 1

กำหนดเพลาที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$B(q^{-1}) = 0.8q^{-1} + 0.4q^{-2}$$

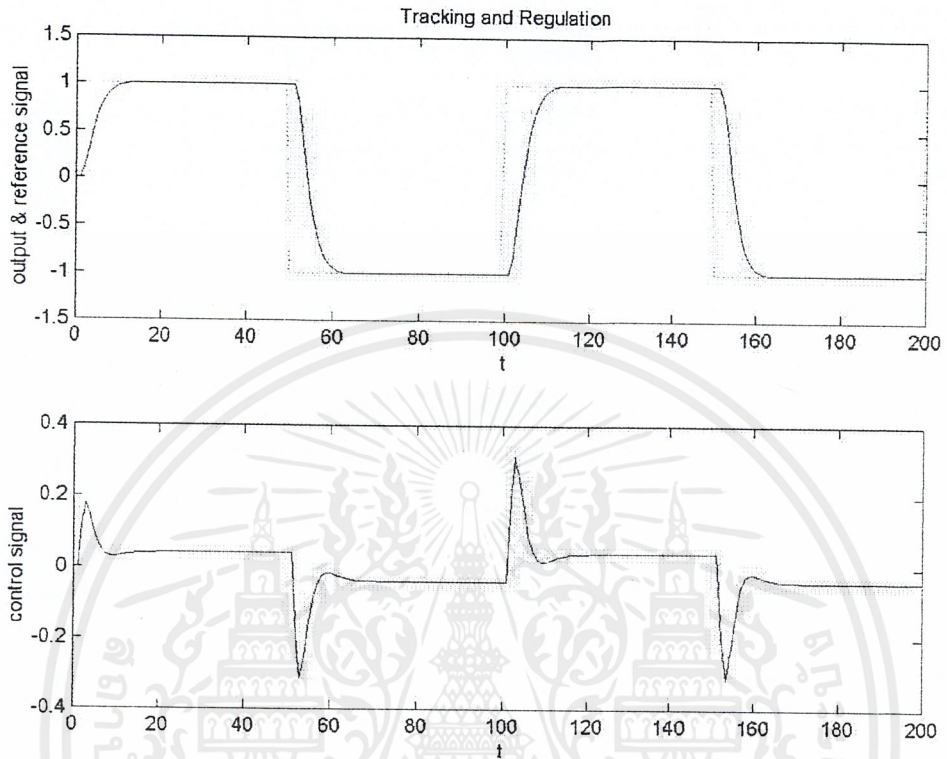
$$A(q^{-1}) = 1 - 1.7q^{-1} + 0.72q^{-2}$$

และ  $T_s = 1, \omega_n = 1, \zeta = 0.9$  สำหรับการกำจัดสัญญาณ

และ  $T_s = 1, \omega_n = 0.5, \zeta = 0.9$  สำหรับการติดตามสัญญาณ

และมีตัวอินทิเกรตคิติดอล  $I(q^{-1}) = \frac{1}{(1-q^{-1})}$

$$\text{ฟิลเตอร์ } F(q^{-1}) = 1$$



รูปที่ 4.4.1 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระ

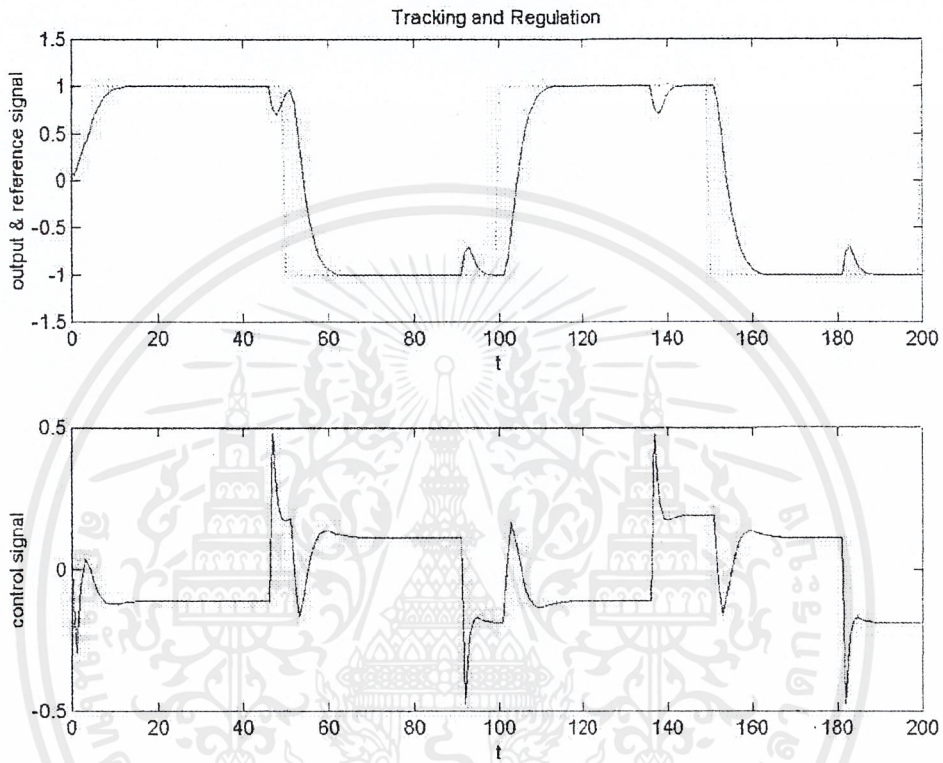
จะได้

$$S(q^{-1}) = 0.8 - 0.4q^{-1} - 0.4q^{-2}$$

$$R(q^{-1}) = 1.9629 - 2.2547q^{-1} + 0.72q^{-2}$$

## กรณีที่ 2

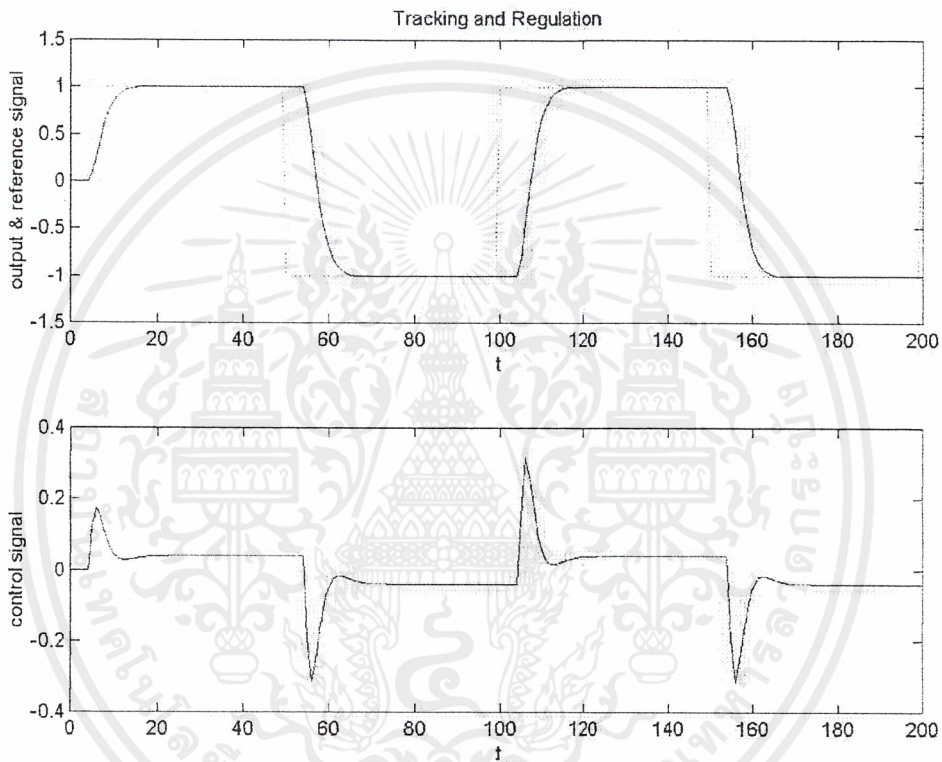
กำหนดเหมือนเดิมทุกอย่าง แต่เพิ่มสัญญาณรบกวนมีแอมกนิจูด = 0.15



รูปที่ 4.4.2 เมื่อมีสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กรณีที่ 3



รูปที่ 4.4.3 เมื่อมีเวลาหน่วงเป็น 3

กำหนดเพลาหน้เดิม และค่าในส่วนของการติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนเหมือนเดิม แต่มีการเพิ่มเวลาหน่วง  $d = 3$

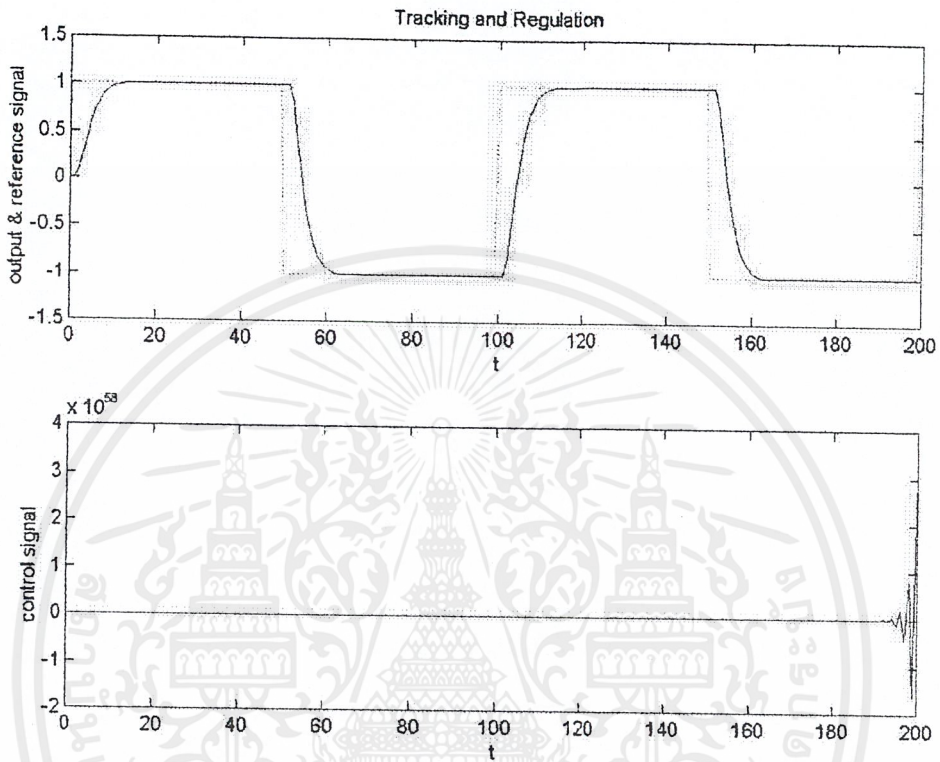
$$S(q^{-1}) = 0.8 - 1.1703q^{-1} + 1.2509q^{-2} + 1.3501q^{-3} - 2.8947q^{-4} - 1.6767q^{-5}$$

$$R(q^{-1}) = 5.3615 - 7.9513q^{-1} + 3.0180q^{-2}$$

รูปกราฟ แสดงถึงระบบที่มีการเคลื่อนที่เหมือนเดิมแต่มี เวลาหน่วง ( $d$ ) เป็น 3 โดยสังเกตเห็นว่าผลตอบสนองจะเหมือนกับเมื่อ เวลาหน่วง เป็น 0 เพียงแต่จะถูกเลื่อนไป  $d$  ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กรณีแพลนที่มีซีโรที่ไม่เสถียร



รูปที่ 4.4.4 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีอิสระ  
(เมื่อแพลนที่มีซีโรที่ไม่เสถียร)

กำหนดแพลนที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$B(q^{-1}) = 0.4q^{-1} + 0.8q^{-2}$$

$$A(q^{-1}) = 1 - 1.7q^{-1} + 0.72q^{-2}$$

และ  $T_s = 1, \omega_n = 1, \zeta = 0.9$  สำหรับการกำจัดสัญญาณ

และ  $T_s = 1, \omega_n = 0.5, \zeta = 0.9$  สำหรับการติดตามสัญญาณ

และมีตัวอินทิเกรตดิจิทัล  $I(q^{-1}) = \frac{1}{(1 - q^{-1})}$

$$\text{ฟิลเตอร์ } H_1(q^{-1}) = \frac{1}{0.9}(1 - 0.1q^{-1})$$

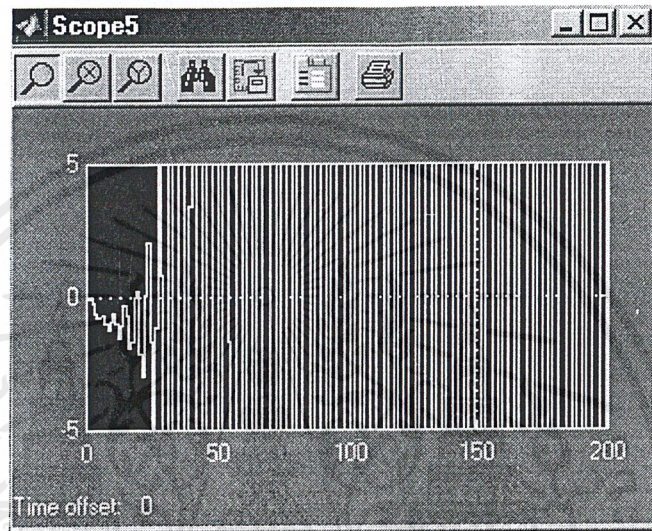
จะได้

$$S(q^{-1}) = 0.4 + 0.4q^{-1} - 0.8q^{-2}$$

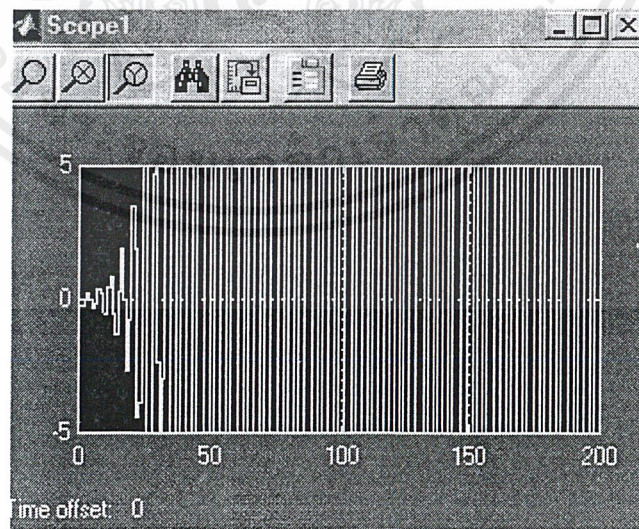
$$R(q^{-1}) = 1.9629 - 2.2547q^{-1} + 0.72q^{-2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสังเกตได้ว่าแพลนที่ไม่เสถียร ทำให้วิธีนี้ไม่สามารถใช้ได้ แต่ที่สัญญาณเอาต์พุตในกราฟยังเสถียรอยู่ เนื่องจากการประมาณค่าทอมบางทอมและทำการตัดทอนกัน ทำให้เมื่อนำฟังก์ชันถ่ายโอนไปสร้างเป็นกราฟ จึงยังได้รูปกราฟที่ยังเสถียรอยู่ ซึ่งจริงๆ แล้วกราฟที่ได้ควรจะเป็นคังรูปข้างล่าง ที่มาจากการใช้โปรแกรม simulink



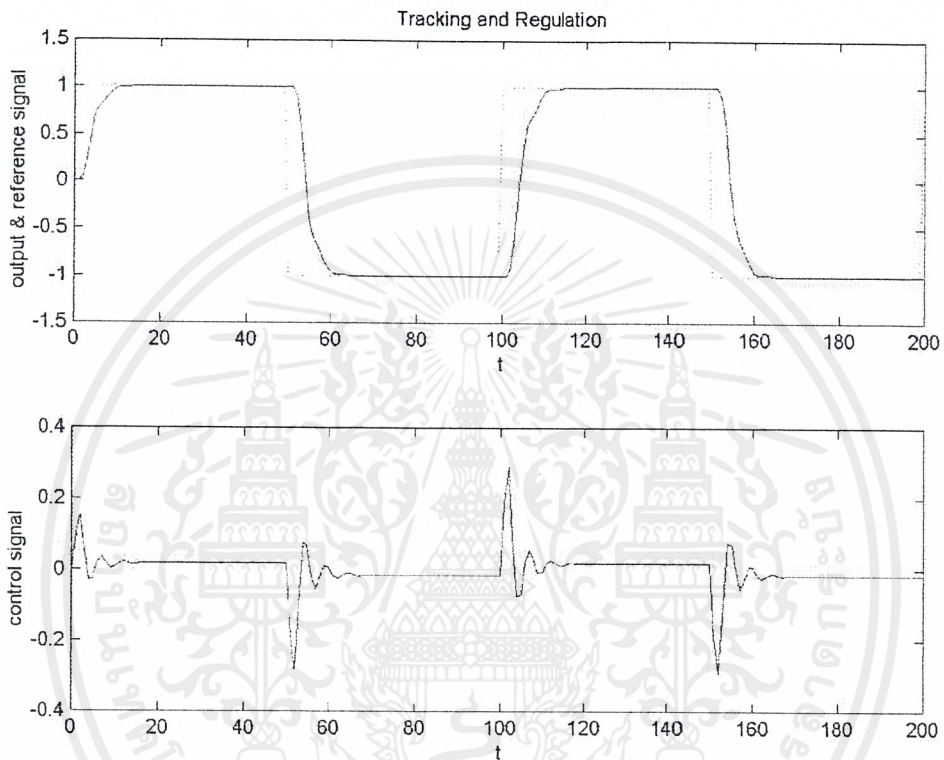
รูปที่ 4.4.5 กราฟแสดงสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 4.4.6 กราฟแสดงสัญญาณควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการเพิ่มอินพุตน้ำหนัก ( tracking and regulation with weighted input )



รูปที่ 4.5.1 การติดตามสัญญาณและการกำจัดสัญญาณรบกวน  
ด้วยวิธีการเพิ่มอินพุตน้ำหนัก

กำหนดพลาตที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$B(q^{-1}) = 0.4q^{-1} + 0.8q^{-2}$$

$$A(q^{-1}) = 1 - 1.7q^{-1} + 0.72q^{-2}$$

และ  $T_s = 1, \omega_n = 1, \zeta = 0.9$  สำหรับการกำจัดสัญญาณ

และ  $T_s = 1, \omega_n = 0.5, \zeta = 0.9$  สำหรับการติดตามสัญญาณ

และมีตัวอินทิเกรตดิจิทัล  $I(q^{-1}) = \frac{1}{(1 - q^{-1})}$

ฟิลเตอร์  $F(q^{-1}) = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มอินพุตน้ำหนัก  $Q(q^{-1}) = \frac{0.5(1 - q^{-1})}{1 + \alpha q^{-1}}$

จะได้

$$S(q^{-1}) = 0.4 - 0.4q^{-1} - 0.8q^{-2}$$

$$R(q^{-1}) = 1.9629 - 2.2547q^{-1} + 0.72q^{-2}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผล

แสดงคุณสมบัติและข้อจำกัดของแต่ละวิธีที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

PI	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้ได้กับแพลนท์ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นระบบอันดับหนึ่ง</li> </ul>
PID1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้ได้กับแพลนท์ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนไม่เกินระบบอันดับสอง</li> <li>- ใช้ได้กับแพลนท์ที่มีเวลาหน่วงเล็กน้อยหรือไม่มีก็ได้</li> <li>- หากแพลนท์มีเวลาหน่วง ต้องน้อยกว่าคาบเวลาการสุ่ม</li> </ul>
PID2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ข้อจำกัดเช่นเดียวกับ PID1</li> <li>- ใช้เพื่อลดการแกว่งของสัญญาณ ( overshoot )</li> </ul>
Poles Placement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีข้อกำหนดในเรื่องอันดับของฟังก์ชันถ่ายโอนของแพลนท์ ( อันดับของ <math>A(q^{-1})</math> และ <math>B(q^{-1})</math> ) แต่ต้องไม่มีตัวร่วม ( common factor )</li> <li>- ไม่มีข้อกำหนดในเรื่องเวลาหน่วง</li> <li>- ไม่มีข้อกำหนดในเรื่องของซีโรของแพลนท์ ( เสถียรหรือไม่เสถียร )</li> </ul>
Tracking and Regulation with independent objective	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีข้อกำหนดในเรื่องอันดับของฟังก์ชันถ่ายโอนของแพลนท์ ( อันดับของ <math>A(q^{-1})</math> และ <math>B(q^{-1})</math> ) แต่ต้องไม่มีตัวร่วม</li> <li>- ไม่สามารถใช้กับแพลนท์ที่เวลาหน่วงมากกว่าครึ่งหนึ่งของคาบเวลาการสุ่ม</li> <li>- ใช้ไม่ได้กับแพลนท์ดิสครีตที่ซีโรทำให้ระบบไม่เสถียร</li> </ul>
Tracking and Regulation with weighted input	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ลดพลังงานการควบคุมด้วยการปรับพารามิเตอร์เพียงตัวเดียว ( <math>\lambda</math> )</li> <li>- ใช้ได้กับแพลนท์ดิสครีตที่ซีโรทำให้ระบบไม่เสถียร</li> </ul>

ตาราง 5.1 คุณสมบัติและข้อจำกัดของวิธีการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบด้วยการใช้โครงสร้างแบบ 3 กิ่ง (R-S-T) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมในระบบเวลา discrete นอกเหนือจากการออกแบบตัวควบคุมในระบบเวลาต่อเนื่องและการออกแบบในระนาบ  $w$  ซึ่งทำให้ผู้ออกแบบมีทางเลือกในการออกแบบตัวควบคุมมากขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปปรับใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่จะใช้ออกแบบตัวควบคุม ในส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในตัวอย่างเพื่อใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการและเพื่อใช้ในการพล็อตกราฟ สามารถดูได้จากภาคผนวก ซึ่งจะแสดงถึงซอร์สโค้ด (source code) ของตัวโปรแกรมและอัลกอริทึม (algorithms) ที่ใช้ในการเขียน โดยสามารถใช้เป็นแนวทางเพื่อใช้ในการพัฒนาตัวโปรแกรมให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

function [num,den]=fTran(G,T,Ts,d)
%program convert first-order continuous plant to discrete plant
%G=gain,T=time constant,Ts=sampling time,d=delay time

Hs=tf(G,[T 1],'inputdelay',d);
Hd=c2d(Hs,Ts);
[n1,d1]=tfdata(Hd,'v');
Hf=filt(n1,d1,Ts);
[num,den]=tfdata(Hf,'v');

```



```

function [num,den]=sTran(spec,d)
%program convert second-order continuous plant to discrete plant
%%spec(1,1)=damping,spec(1,2)=natural frequency,spec(1,3)=sampling time
%d=delay time

n1=[spec(1,2)^2];
d1=[1,2.*spec(1,1).*spec(1,2),spec(1,2)^2];
Ts=spec(1,3);
sys=tf(n1,d1,'inputdelay',d);
sysd=c2d(sys,Ts);
[n2,d2]=tfdata(sysd,'v');
sysf=filt(n2,d2,Ts);
[num,den]=tfdata(sysf,'v');

```



```

function [P,R,K,Ti]=aPI(spec,num,den,Tr,f)
%spec(1,1)=damping,spec(1,2)=natural frequency,spec(1,3)=sampling time
%Tr=time range ,f=frequency
%TN=Td/N

B=num;
A=den;
%computing p1,p2
n1=[spec(1,2)^2];
d1=[1,2.*spec(1,1).*spec(1,2),spec(1,2)^2];
Ts=spec(1,3);
sys1=tf(n1,d1);
sysd=c2d(sys1,Ts);
[n2,d2]=tfdata(sysd,'v');
sysf=filt(n2,d2,Ts);
[n3,d3]=tfdata(sysf,'v');
p1=d3(1,2);
p2=d3(1,3);
P=[1 p1 p2];

%computing R,S
b1=num(1,2);
a1=den(1,2);

r1=(p2+a1)/b1;
r0=(p1-a1+1)/b1;
R=[r0 r1];

%computing transfer function of r(t)&y(t)
Bm=conv(B,R);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Hclr=filt(Bm,P,Ts);

%computing transfer function of u(t)&r(t)
AR=conv(A,R);
Hclu=filt(AR,P,Ts);

%computing parameter of controller
K=-r1;
Ti=-r1/(r0+r1);

%plot graph
t=0:Ts:Tr;
u=square(2*pi*f*t);
[yy,tt,xx]=lsim(Hclr,u,t);
[yy1,tt1,xx1]=lsim(Hclu,u,t);
subplot(2,1,1);
plot(t,u,'r',tt,yy,'b')
title('Digital P.I.')
xlabel('t')
ylabel('output & reference signal')
subplot(2,1,2);
plot(tt1,yy1,'b')
xlabel('t')
ylabel('control signal')

```

```

function [P,S,R,K,Ti,Td,TN]=aPID1(spec,num,den,Tr,f)
%spec(1,1)=damping,spec(1,2)=natural frequency,spec(1,3)=sampling time
%Tr=time range,f=frequency
%TN=Td/N

%computing p1,p2
n1=[spec(1,2)^2];
d1=[1,2.*spec(1,1).*spec(1,2),spec(1,2)^2];
Ts=spec(1,3);
sys1=tf(n1,d1);
sysd=c2d(sys1,Ts);
[n2,d2]=tfdata(sysd,'v');
sysf=filt(n2,d2,Ts);
[n3,d3]=tfdata(sysf,'v');
p1=d3(1,2);
p2=d3(1,3);
P=[1 p1 p2];

%computing R,S
if length(num)==3
    b1=num(1,2);
    b2=num(1,3);
else
    b1=num(1,2);
    b2=0;
end
if length(num)==3
    a1=den(1,2);
    a2=den(1,3);
else

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

a1=den(1,2);
a2=0;
end

D=(a1-1).*b1.*b2^2-b2^3-(a2-a1).*b1^2.*b2-a2.*b1^3;
r0=(1/D).*((p1.*(a1-1)-p2+a1-1-a1^2+a2).*b2^2+a2.*(a1-1-p1).*b1^2+(p1.*(a1-a2)+a1-
a1^2+a1.*a2).*b1.*b2);
r1=(1/D).*((p2.*(a1-a2)+p1.*a2+(a1-a2)^2).*b1.*b2+(-p2.*a2+a2^2-a1.*a2).*b1^2+(p1.*(a2-
a1)-a1-a2.*a1+a1^2).*b2^2);
r2=(1/D).*((a2.*(a1+p2-a2)).*b1.*b2+(a2.*(a1-p1-1)).*b2^2-a2^2.*b1^2);
s1=(1/D).*((p2+a1-a2).*b1.*b2^2-(1+p1-a1).*b2^3-a2.*b1^2.*b2);

R=[r0 r1 r2];
I=[1 -1];
Sd=[1 s1];
S=conv(I,Sd);
R=[r0 r1 r2];
B=num;
A=den;

%computing transfer function of r(t)&y(t)
Bm=conv(B,R);
Hclr=filt(Bm,P,Ts);

%computing transfer function of u(t)&r(t)
AR=conv(A,R);
Hclu=filt(AR,P,Ts);

%computing parameter of controller
K=(r0*s1-r1-(2+s1)*r2)/(1+s1)^2;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

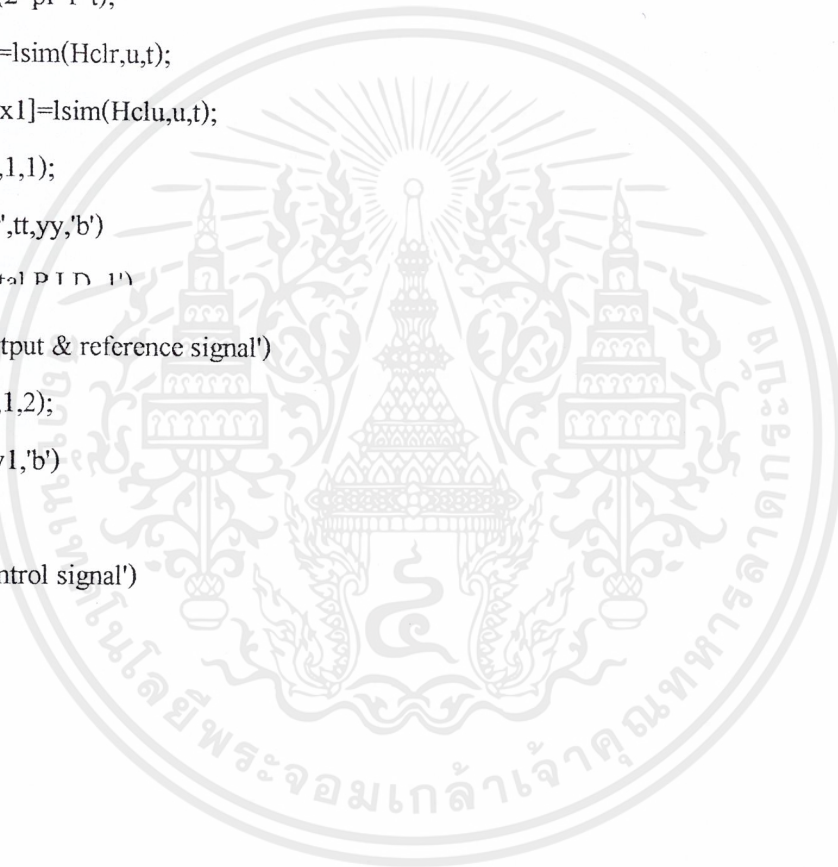
Ti=Ts*(K*(1+s1))/(r0+r1+r2);
Td=Ts*(s1^2*r0-s1*r1+r2)/(K*(1+s1)^3);
TN=(-s1*Ts)/(1+s1);

```

```

%plot graph
t=0:Ts:Tr;
u=square(2*pi*f*t);
[yy,tt,xx]=lsim(Hclr,u,t);
[yy1,tt1,xx1]=lsim(Hclu,u,t);
subplot(2,1,1);
plot(t,u,'r',tt,yy,'b')
xlabel('Digital PID 1')
ylabel('output & reference signal')
subplot(2,1,2);
plot(tt1,yy1,'b')
xlabel('t')
ylabel('control signal')

```



```

function [P,S,R,K,Ti,Td,TN]=aPID2(spec,num,den,Tr,f)
%spec(1,1)=damping,spec(1,2)=natural frequency,spec(1,3)=sampling time
%Tr=time range ,f=frequency
%TN=Td/N

%computing p1,p2
n1=[spec(1,2)^2];
d1=[1,2.*spec(1,1).*spec(1,2),spec(1,2)^2];
Ts=spec(1,3);
sys=tf(n1,d1);
sysd=c2d(sys,Ts);
[n2,d2]=tfdata(sysd,'v');
sysf=filt(n2,d2,Ts);
[n3,d3]=tfdata(sysf,'v');
p1=d3(1,2);
p2=d3(1,3);
P=[1 p1 p2];

%computing R,S
if length(num)==3
    b1=num(1,2);
    b2=num(1,3);
else
    b1=num(1,2);
    b2=0;
end
if length(num)==3
    a1=den(1,2);
    a2=den(1,3);
else

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

a1=den(1,2);
a2=0;
end

D=(a1-1).*b1.*b2^2-b2^3-(a2-a1).*b1^2.*b2-a2.*b1^3;
r0=(1/D).*((p1.*(a1-1)-p2+a1-1-a1^2+a2).*b2^2+a2.*(a1-1-p1).*b1^2+(p1.*(a1-a2)+a1-
a1^2+a1.*a2).*b1.*b2);
r1=(1/D).*((p2.*(a1-a2)+p1.*a2+(a1-a2)^2).*b1.*b2+(-p2.*a2+a2^2-a1.*a2).*b1^2+(p1.*(a2-
a1)-a1-a2.*a1+a1^2).*b2^2);
r2=(1/D).*((a2.*(a1+p2-a2)).*b1.*b2+(a2.*(a1-p1-1)).*b2^2-a2^2.*b1^2);
s1=(1/D).*((p2+a1-a2).*b1.*b2^2-(1+p1-a1).*b2^3-a2.*b1^2.*b2);

I=[1 -1];
Sd=[1 s1];
S=conv(I,Sd);
R=[r0,r1,r2];
R1=r0+r1+r2;
B=num;
A=den;

%computing transfer function of r(t)&y(t)
Bm=R1.*B;
Hclr=filt(Bm,P,Ts);

%computing transfer function of u(t)&r(t)
AR=R1.*A;
Hclu=filt(AR,P,Ts);

%computing parameter of controller
K=-(r1+2*r2)/(1+s1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_i = T_s * -(r_1 + 2 * r_2) / (r_0 + r_1 + r_2);$$

$$T_d = T_s * (s_1 * r_1 + (s_1 - 1) * r_2) / ((r_1 + 2 * r_2) * (1 + s_1));$$

$$T_N = -(s_1 * T_s) / (1 + s_1);$$

```
%plot graph
```

```
t=0:Ts:Tr;
```

```
u=square(2*pi*f*t);
```

```
[yy,tt,xx]=lsim(Hclr,u,t);
```

```
[yy1,tt1,xx1]=lsim(Hclu,u,t);
```

```
subplot(2,1,1);
```

```
plot(t,u,'r',tt,yy,'b')
```

```
title('Digital P.I.D. 2')
```

```
xlabel('t')
```

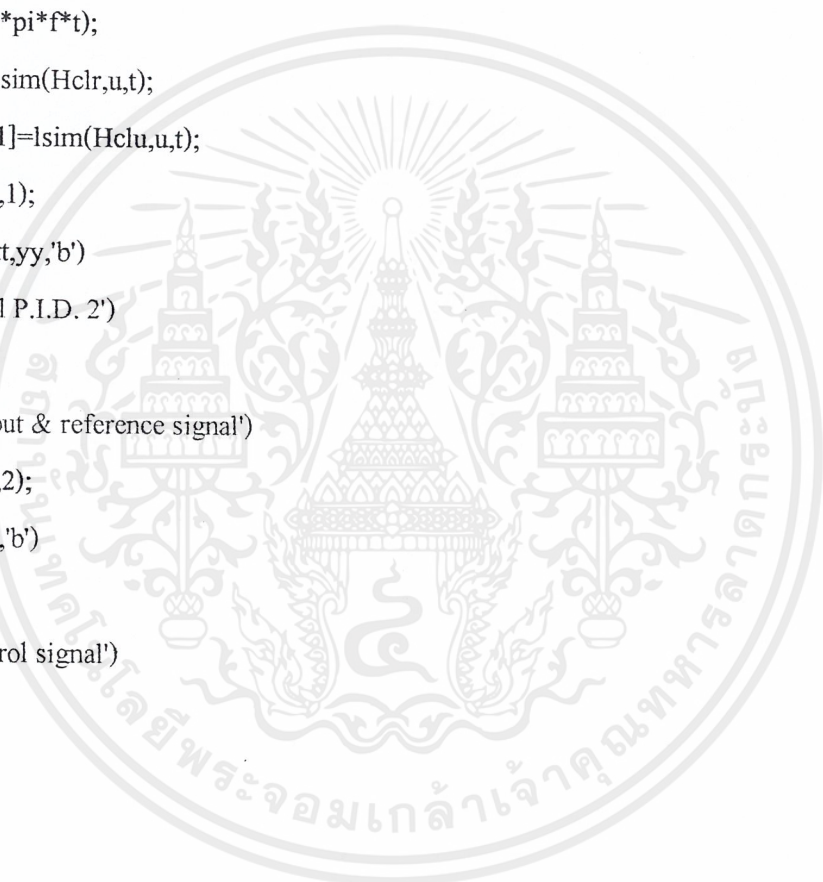
```
ylabel('output & reference signal')
```

```
subplot(2,1,2);
```

```
plot(tt1,yy1,'b')
```

```
xlabel('t')
```

```
ylabel('control signal')
```



```

function [G,T,R,S]=PP(num,den,P,Bm,Am,al,d,Ts,Tr,f)
%al=alpha,d=delay,Ts=sampling time,Tr=time range,f=frequency

B=num;
A=den;

%check zero term and delete if B have (last term)
g=length(B);
b1=[];
g1=1;
for i=1:g
    if B(1,g1) ~= 0
        b1(1,g1)=B(1,g1);
    end
    g1=g1+1;
end

%check zero term and delete if A have (last term)
h=length(A);
a1=[];
h1=1;
for i1=1:h
    if A(1,h1) ~= 0
        a1(1,h1)=A(1,h1);
    end
    h1=h1+1;
end

%with integrator
H1=[1/(1-al) -al/(1-al)];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

H2=[1 -1];
b=conv(b1,H1);
a=conv(a1,H2);

%computing B(1),G & T(q^-1) & BS
n1=length(b);
B1=0;
for i6=1:n1
    B1=B1+b(1,i6);
end

G=1/B1
T=G.*P;

n2=length(b)-1;
e1=2;
for i7=1:n2
    BS(1,i7)=b(1,e1);
    e1=e1+1;
end

% computing r degree
m = length(b)-1;
n = length(a)-1;
md=m+d;
if n>md
    r=n;
else
    r=md;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end

%computing P
le=(2*r)-1;
P(1,1+le)=0;
PT=P';

%create matrix
D=zeros(2*r,2*r);

%in case of delay
x=1;
for i3=1:d+1
    bd(1,i3)=b(1,i3);
    x=x+1;
end
for i4=1:m-d
    bd(1,x)=b(1,i4+1);
    x=x+1;
end

%add zero to make equal length of matrix a and b
if m>n
    mn=m-n;
    bd(1,(m+r+d))=0;
    a(1,(n+r+d+mn))=0;
elseif m<n
    nm=n-m;
    bd(1,(m+r+d+nm))=0;
    a(1,(n+r+d))=0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else
    bd(1,(m+r+d))=0;
    a(1,(n+r+d))=0;
end

%fill matrix
    k=2;
for i2=1:2*r
    for j=1:r
        if (k-(j))>0
            D(i2,j)=a(1,k-(j));
        end
    end
    k=k+1;
end

    k1=r+2;
for i5=1:2*r
    for j1=r+1:2*r
        if (k1-(j1))>0
            D(i5,j1)=bd(1,k1-(j1));
        end
    end
    k1=k1+1;
end

%computing R,S
DI=inv(D);
X=DI*PT;
XT=X';

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%computing  $S(q^{-1})$ 
le1=r-1;
Sd=[];
for i8=1:le1+1
    Sd(1,i8)=XT(1,i8);
end
S=conv(Sd,H2);

%computing  $R(q^{-1})$ 
Rd=[];
e2=1;
for i9=le1+2:le1+(le1+2)
    Rd(1,e2)=XT(1,i9);
    e2=e2+1;

```



```
u=square(2*pi*f*t);  
[yy2,tt2,xx2]=lsim(Hclr,u,t);  
[yy3,tt3,xx3]=lsim(Hclu,u,t);  
subplot(2,1,1);  
plot(t,u,':r',tt2,yy2,'b')  
title('Poles placement')  
xlabel('t')  
ylabel('output & reference signal')  
subplot(2,1,2);  
plot(tt3,yy3,'b')  
xlabel('t')  
ylabel('control signal')
```



```
function [R,S]=TRI(num,den,P,Bm,Am,d,Ts,Tr,f)
```

```
%P=desired pole,d=delay
```

```
%Ts=sampling time,Tr=time range,f=frequency
```

```
B=num;
```

```
A=den;
```

```
%computing A*integrator
```

```
I=[1 -1];
```

```
AI=conv(A,I);
```

```
%check zero term and delete if B have (last term)
```

```
h=length(AI);
```

```
a=[];
```

```
h1=1;
```

```
for i=1:h
```

```
    if AI(1,h1) ~= 0
```

```
        a(1,h1)=AI(1,h1);
```

```
    end
```

```
    h1=h1+1;
```

```
end
```

```
n=length(a)-1;
```

```
l=n+d+1;
```

```
l1=n+1;
```

```
l2=n+d;
```

```
M=eye(l);
```

```
%add delay
```

```
if d>0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

a(1,1)=0;
end

%fill matrix M
d1=0;
e=1;
for i1=1:l
    for i2=1:l-d1
        M(i2+d1,e)=a(1,i2);
    end
    d1=d1+1;
    e=e+1;
end

%computing B*
n1=length(B)-1;
e1=2;
for i3=1:n1
    BS(1,i3)=B(1,e1);
    e1=e1+1;
end

%computing BS*integrator
BSI=conv(BS,I);

%computing P
P(1,1+12)=0;
PT=P';

%computing R,S

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MI=inv(M);
X=MI*PT;
XT=X';

%computing S(q^-1)
Sd=[];
for i4=1:d+1
    Sd(1,i4)=XT(1,i4);
end
S=conv(BSI,Sd);

%computing R(q^-1)
R=[];
e2=1;
for i5=d+2:(n-1)+(d+2)
    R(1,e2)=XT(1,i5);
    e2=e2+1;
end

Hm=filt(Bm,Am,Ts);
%computing transfer function of r(t)&y(t)
Hclr=filt(Bm,Am,Ts,'inputdelay',d+1);

%computing transfer function of r(t)&u(t)
BSP=conv(BS,P);
Hclu1=filt(A,BSP,Ts,'inputdelay',d+1);
Hclu=Hclu1*Hm;

%plot graph

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
t=0:Ts:Tr;  
u=square(2*pi*f*t);  
  
[yy,tt,xx]=lsim(Hclr,u,t);  
[yy1,tt1,xx1]=lsim(Hclu,u,t);
```

```
subplot(2,1,1);  
plot(t,u,'r',t,yy,'b')  
title('Tracking and Regulation')  
xlabel('t')  
ylabel('output & reference signal')  
subplot(2,1,2);  
plot(tt1,yy1,'b')  
xlabel('t')  
ylabel('control signal')
```



```

function [R,S]=dTR(num,den,P,Bm,Am,d,Ts,Tr,f)
%P=desired pole,d=delay
%Ts=sampling time,Tr=time range,f=frequency

B=num;
A=den;

%computing A*integrator
I=[1 -1];
AI=conv(A,I);

n=length(AI)-1;
l=n+d+1;
l1=n+1;
l2=n+d;
M=eye(l);

%add delay
if d>0
    AI(1,l)=0;
end

%fill matrix M
d1=0;
e=1;
for i1=l1:l
    for i2=1:l-d1
        M(i2+d1,e)=AI(1,i2);
    end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

d1=d1+1;
e=e+1;
end

%computing B*
n1=length(B)-1;
e1=2;
for i3=1:n1
    BS(1,i3)=B(1,e1);
    e1=e1+1;
end

%computing BS*integrator
BSI=conv(BS,I);

%computing P
P(1,1+I2)=0;
PT=P';

%computing R,S
MI=inv(M);
X=MI*PT;
XT=X';

%computing S(q^-1)
Sd=[];
for i4=1:d+1
    Sd(1,i4)=XT(1,i4);
end
S=conv(BSI,Sd);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%computing R(q^-1)
R=[];
e2=1;
for i5=d+2:(n-1)+(d+2)
    R(1,e2)=XT(1,i5);
    e2=e2+1;
end

Hm=filt(Bm,Am,Ts);
%computing transfer function of r(t)&y(t)
Hmd=filt(Bm,Am,Ts,'inputdelay',d+1);

%computing transfer function of y(t) with disturbance
Hd=filt(S,P,Ts,'inputdelay',d+1)

%computing transfer function of u(t) with disturbance

BR=conv(B,R);
AS=conv(A,S);
Hd1=filt(BR,AS,1,'inputdelay',d);
Hdu0=feedback(Hd1,1,-1);
[nh,dh]=tfdata(Hdu0,'v');
Hdu1=filt(nh,dh,Ts);

BSP=conv(BS,P);
Hclu1=filt(A,BSP,Ts,'inputdelay',d+1);
Hclu=Hclu1*Hm;

```

```

%plot graph
t=0:Ts:Tr;
u=square(2*pi*f*t);
u1=0.15*square(2*pi*0.01111*t);
u2=-0.15*square(2*pi*0.01111*t);
[yy0,tt0,xx0]=lsim(Hclu,u,t);
[yy,tt,xx]=lsim(Hmd,u,t);
[yy1,tt1,xx1]=lsim(Hdu1,u2,t);
[yy2,tt2,xx2]=lsim(Hd,u1,t);
yy3=yy+yy2;
yy4=yy0+yy1;
subplot(2,1,1);
plot(t,u,':r',t,yy3,'b')
title('Tracking and Regulation')
xlabel('t')
ylabel('output & reference signal')
subplot(2,1,2);
plot(t,yy4,'b')
xlabel('t')
ylabel('control signal')

```

```

function [R,S]=wTR(num,den,P,Bm,Am,d,Ld,al,Ts,Tr,f)
%P=desired pole,Ld=lampda,al=alpha,d=delay
%Ts=sampling time,Tr=time range,f=frequency

B=num;
A=den;

%computing AS*integrator
I=[1 -1];
AI=conv(A,I);

n=length(AI)-1;
l=n+d+1;
l1=n+1;
l2=n+d;
M=eye(l);

%add delay
if d>0
    AI(1,l)=0;
end

%fill matrix M
d1=0;
e=1;
for i1=1:l
    for i2=1:l-d1
        M(i2+d1,e)=AI(1,i2);
    end
    d1=d1+1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    e=e+1;
end

%computing B*
n1=length(B)-1;
e1=2;
for i3=1:n1
    BS(1,i3)=B(1,e1);
    e1=e1+1;
end

%computing BS*integrator
BSI=conv(BS,I);

%computing P
P(1,1+12)=0;
PT=P';

%computing R,S
MI=inv(M);
X=MI*PT;
XT=X';

%computing S(q^-1)
Sd=[];
for i4=1:d+1
    Sd(1,i4)=XT(1,i4);
end
S=conv(BSI,Sd);

```

```

%computing  $R(q^{-1})$ 
R=[];
e2=1;
for i5=d+2:(n-1)+(d+2)
    R(1,e2)=XT(1,i5);
    e2=e2+1;
end

```

```

%computing transfer function of  $r(t)$  &  $y(t)$ 

```

```

nQ=[Ld -Ld];
dQ=[1 al];
AQ=conv(A,nQ);
BSQ=conv(BS,dQ);
BSQP=conv(BSQ,P);

```

```

lng1=length(AQ);
lng2=length(BSQP);
lng3=abs(lng1-lng2);
if lng1>lng2
    BSQP(1,lng2+lng3)=0;
elseif lng1<lng2
    AQ(1,lng1+lng3)=0;
end

```

```

AQBP=AQ+BSQP;
BQ=conv(B,dQ);
Hcl1=filt(BQ,AQBP,1,'inputdelay',d);
BmP=conv(Bm,P);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Hmt=filt(BmP,Am,1);
Hclr=Hmt*Hcl1;

%find tf of u(t)&r(t)
AQ1=conv(A,dQ);
Hclul=filt(AQ1,AQBP,1,'inputdelay',d);
Hclu=Hmt*Hclul;

%plot graph
t=0:Ts:Tr;
u=square(2*pi*f*t);

[yy,tt,xx]=lsim(Hclr,u,t);
[yy1,tt1,xx1]=lsim(Hclu,u,t);

subplot(2,1,1);
plot(t,u,'r',t,yy,'b')
title('Tracking and Regulation')
xlabel('t')
ylabel('output & reference signal')
subplot(2,1,2);
plot(tt1,yy1,'b')
xlabel('t')
ylabel('control signal')

```

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ.วิพันธ์  
 ปรีชาพานิช (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์), อาจารย์ถาวร เบญจนาสุทธิ ผู้ให้คำปรึกษาในส่วน  
 ของเนื้อหา, นายเกียรติพงศ์ กมลรัตน์ เพื่อนผู้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการ  
 พ่อ แม่และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกคนที่มีได้เอ่ยถึงที่คอยเป็นกำลังใจ จนโครงการสำเร็จ จึงขอ  
 ขอบคุณไว้ ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1]. Ioan Dore I.LANDAU ,System Identification and Control Design Using P.I.M.+Software, Prentice-Hall ,Inc.(1990)
- [2]. W.Forsythe and R.M. Goodal ,Digital Control Fundamentals,Theory and Practice , McGraw-Hill,Inc.(1991)
- [3]. Katsuhiko Ogata,Modern Control Engineering ,Prentice-Hall ,Inc.(1990)
- [4]. รศ. วิพันธ์ ปรีชาพานิช ,การวิเคราะห์ระบบควบคุมเวลาติดสกริต ,วศ.สจธ. 137 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2541)
- [5]. J.R.Leigh ,Applied Control (Theory,Design and Implementation ) ,Hartnolls Limited Bodmin ,Cornwall.

