

การออกแบบระบบควบคุมแบบชั้กตัวอย่างข้อมูลด้วยนอร์ม H_2 นัยทั่วไป



นาย อติวิรัช กาญจนหฤทัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

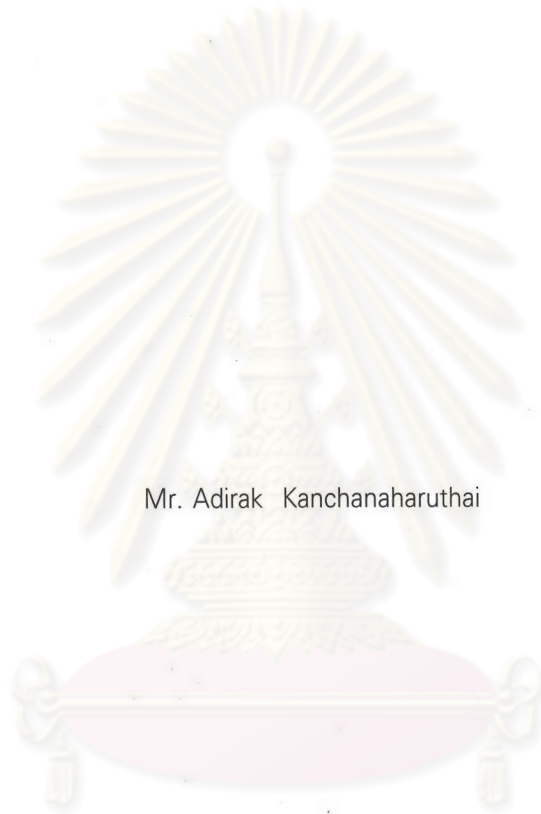
ISBN 974-636-534-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[17380868 .

SAMPLED-DATA CONTROL SYSTEM DESIGN

BY GENERALIZED H_2 -NORMS



Mr. Adirak Kanchanaharuthai

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1996

ISBN 974-636-534-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบระบบควบคุมแบบชັกดัดอย่างข้อมูลด้วยนอร์ม H_2
นัยทั่วไป

โดย

นาย อติรักษ์ กาญจนเหตุทัย

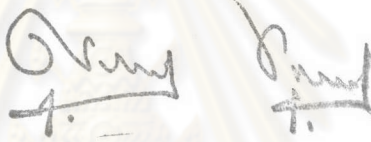
ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ

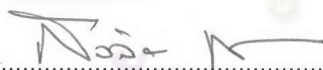
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยอนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

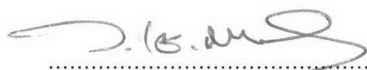


..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวลัย กลั่นความดี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ)



..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ เขาวินิชฐ)



พิมพ์ต้นฉบับบทความวิจัยวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

อดิศักดิ์ กาญจนเหตุภัย : การออกแบบระบบควบคุมแบบชັกดตัวอย่างข้อมูลด้วยนอร์ม H_2

นัยทั่วไป (SAMPLED-DATA CONTROL SYSTEM DESIGN BY GENERALIZED H_2 -NORMS)

อ.ที่ปรึกษา : ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ, 132 หน้า. ISBN 974-636-534-7.

งานวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการออกแบบระบบควบคุมแบบชັกดตัวอย่างด้วยนอร์ม H_2 นัยทั่วไปเป็นดัชนีสมรรถนะซึ่งประกอบด้วย นอร์ม H_2 ที่มีคุณลักษณะที่แปรผันตามเวลาและไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา นอร์ม H_2 ที่มีคุณลักษณะที่แปรผันตามเวลาสามารถพิจารณาเป็นการวางตำแหน่งโพลวงรอบปิดให้อยู่ภายในวงกลมขนาดใด ๆ นอร์ม H_2 ที่มีคุณลักษณะที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อพิจารณาผลการปรับค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างสัญญาณขณะชັกดตัวอย่างกับสัญญาณระหว่างคาบการชັกดตัวอย่าง เราสามารถใช้คุณลักษณะของนอร์ม H_2 นัยทั่วไปนี้ในการปรับเปลี่ยนผลตอบสนองในโดเมนเวลาได้ตามต้องการ สุดท้ายเป็นการนำการแปลงเดลต้ามาใช้ในการวิเคราะห์ผลของนอร์ม H_2 และพารามิเตอร์ของระบบเมื่อคาบการชັกดตัวอย่างเข้าใกล้ศูนย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา ระบบควบคุม

ปีการศึกษา ๒๕๖๑

ลายมือชื่อนิสิต อดิศักดิ์ กาญจนเหตุภัย

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อดิศักดิ์ กาญจนเหตุภัย

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C815368 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: SAMPLED-DATA SYSTEMS / H_2 -NORMS / OPTIMAL CONTROL / POLE PLACEMENT IN SPECIFIC REGIONS

ADIRAK KANCHANAHARUTHAI : SAMPLED-DATA CONTROL SYSTEM DESIGN BY GENERALIZED H_2 -NORMS. THESIS ADVISOR : DR. MANOP WONGSAISUWAN, D.ENG.

132 pp. ISBN 974-636-534-7

In this thesis, we investigate the design of sampled-data control systems by generalized H_2 -norms which are generalized by two types of weighting functions: time-varying and time-invariant. Time-varying weighting function can be considered as pole placement in arbitrary circles while time-invariant weighting function are used in the analysis of the effect of weighting costs between the discrete-time and the continuous-time signals. We can use the characteristics of generalized H_2 -norms to adjust the system reponse in the time-domain. Finally, using the Delta transform, we give the analysis of H_2 -norms and parameters of both continuous-time plant and digital controller as the sampling period approaches zero.

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชา.....ระบบควบคุม.....

ปีการศึกษา.....2539.....

ลายมือชื่อนิต.....อดิศักดิ์ ฤกษ์เพชรทัย.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....มานพ ว่องสาสุวรรณ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....-.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ท่านได้ประสิทธิประสาทความรู้และช่วยเหลือด้าน คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยด้วยดีตลอดรวมทั้งให้กำลังใจในการทำงานวิจัยแก่ผู้เขียน เป็นอย่างมาก ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร. สุวลัย กลั่นความดี และรองศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ เชาววิศิษฏ์ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชา ระบบควบคุมที่ได้กรุณาให้คำแนะนำรวมทั้งข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อน ๆ และน้องทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จครั้งนี้

ท้ายนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้ กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
กิตติกรรมประกาศ.....		ฉ
สารบัญตาราง		ญ
สารบัญภาพ.....		ฐ
บทที่		
1	บทนำ	1
	1.1 กล่าวนำปัญหา.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
	1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	4
	1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้	5
	1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์	6
2	สัญญาณและระบบ	7
	2.1 สัญญาณ.....	7
	2.1.1 ขนาดของสัญญาณ.....	7
	2.1.2 สัญญาณในโดเมนความถี่.....	9
	2.2 ระบบ.....	9
	2.2.1 ระบบเชิงเส้น	10
	2.2.2 ขนาดของระบบ	11
	2.2.3 นอร์ม H_2 ของระบบในโดเมนเวลาต่อเนื่อง.....	11
	2.2.4 นอร์ม H_2 ของระบบเวลาเต็มหน่วย	13
	2.3 การออกแบบตัวควบคุม.....	14
	2.3.1 การออกแบบตัวควบคุมในโดเมนเวลาต่อเนื่อง.....	15
	2.3.2 การออกแบบตัวควบคุมในเวลาเต็มหน่วย	17

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3	ระบบควบคุมแบบชั้กตัวอย่างข้อมูล..... 19
3.1	ความนำ..... 19
3.2	ระบบชั้กตัวอย่างข้อมูล 21
3.3	แบบจำลองระบบลูกผสม 22
3.4	ตัวอย่างของระบบลูกผสม 26
3.5	คุณสมบัติโดยทั่วไปของระบบลูกผสม..... 27
3.5.1	พฤติกรรมระหว่างคาบการชั้กตัวอย่าง (Intersampling behavior) 27
3.5.2	เสถียรภาพ (Stability) 28
3.5.3	การเข้าถึงได้ (Reachability) 29
3.5.4	การสังเกตได้ (Observability) 30
3.6	นอร์ม H_2 ของระบบชั้กตัวอย่างข้อมูล 31
3.6.1	ทฤษฎีการวิเคราะห์นอร์ม H_2 32
3.6.2	ทฤษฎีการสังเคราะห์นอร์ม H_2 35
3.7	ตัวอย่าง 43
4	ทฤษฎีการวิเคราะห์และการสังเคราะห์ระบบชั้กตัวอย่างข้อมูล โดยใช้นอร์ม H_2 นัยทั่วไป 60
4.1	นอร์ม H_2 ของระบบชั้กตัวอย่างข้อมูล เมื่อมีฟังก์ชัน ตัวถ่วงน้ำหนักที่มีคุณลักษณะแปรผันตามเวลา..... 60
4.1.1	ทฤษฎีการวิเคราะห์นอร์ม H_2 61
4.1.2	ทฤษฎีการสังเคราะห์นอร์ม H_2 64
4.2	นอร์ม H_2 ของระบบชั้กตัวอย่างข้อมูล เมื่อมีฟังก์ชัน ตัวถ่วงน้ำหนักที่มีคุณลักษณะไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา 67
4.2.1	ทฤษฎีการวิเคราะห์นอร์ม H_2 67
4.2.2	ทฤษฎีการสังเคราะห์นอร์ม H_2 69

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์ม H_2 ของระบบในโดเมนเวลาต่อเนื่อง และระบบชักตัวอย่างข้อมูล.....	71
4.4 การพิจารณาระบบชักตัวอย่างข้อมูลด้วยผลการแปลงเดลต้า.....	75
5 การคำนวณค่านอร์ม H_2 ของระบบชักตัวอย่างข้อมูล	80
5.1 การคำนวณนอร์ม H_2 ของระบบชักตัวอย่างข้อมูล	80
5.1.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์.....	80
5.1.2 ทฤษฎีการสังเคราะห์.....	81
5.2 การคำนวณนอร์ม H_2 ของระบบชักตัวอย่างข้อมูล เมื่อมีฟังก์ชันตัวถ่วงน้ำหนักแปรผันตามเวลา.....	82
5.2.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์.....	82
5.2.2 ทฤษฎีการสังเคราะห์.....	83
5.3 การคำนวณนอร์ม H_2 ของระบบชักตัวอย่างข้อมูล เมื่อมีฟังก์ชันตัวถ่วงน้ำหนักไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา	84
5.3.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์.....	84
5.3.2 ทฤษฎีการสังเคราะห์	85
5.4 ตัวอย่าง.....	86
6 บทสรุปของวิทยานิพนธ์.....	114
6.1 ข้อดีและข้อด้อยของการออกแบบระบบควบคุมแบบ ชักตัวอย่างข้อมูลด้วยนอร์ม H_2 นัยทั่วไป.....	114
6.2 ข้อเสนอแนะ	115
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก	119
ภาคผนวก ก แบบจำลองที่ใช้แก้ปัญหาระบบชักตัวอย่างข้อมูล	
1. แบบจำลองฟังก์ชันสเตป	120
2. แบบจำลองดิสคริตจัมพ์.....	121

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ข. การคำนวณเมตริกซ์เลขชี้กำลัง	123
ภาคผนวก ค. โปรแกรมที่ใช้	124
ประวัติผู้วิจัย	132



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 5.1	แสดงตำแหน่งโพลของระบบป้อนกลับวงรอบปิดโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิด.....	90
ตารางที่ 5.2	แสดงค่านอร์ม H_2 ของการวางตำแหน่งโพลของระบบป้อนกลับวงรอบปิดโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิด.....	90
ตารางที่ 5.3	แสดงค่านอร์ม H_2 ของการวางตำแหน่งโพลของระบบป้อนกลับวงรอบปิดโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิดเมื่อกระบวนการมีโพลและซีโรทางด้านขวาของระนาบ s	94
ตารางที่ 5.4	แสดงตำแหน่งโพลของระบบป้อนกลับวงรอบปิด โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิด เมื่อกระบวนการมีทั้งโพลและซีโรทางด้านขวาของระนาบ s	95
ตารางที่ 5.5	แสดงค่านอร์ม H_2 ของการวางตำแหน่งโพลของระบบป้อนกลับวงรอบปิดโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิด เมื่อมีฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา	99
ตารางที่ 5.6	แสดงตำแหน่งโพลของระบบป้อนกลับวงรอบปิดภายในวงกลมหนึ่งหน่วย เมื่อฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา	99

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	แสดงระบบเชิงเส้นที่ประกอบด้วยสัญญาณเข้า $w(t)$ และ สัญญาณออก $z(t)$	10
รูปที่ 2.2	แสดงระบบในโดเมนเวลาต่อเนื่อง	15
รูปที่ 2.3	แสดงระบบในเวลาเต็มหน่วย	17
รูปที่ 3.1	แสดงวิธีการออกแบบตัวควบคุมเชิงเลขแบบต่าง ๆ	20
รูปที่ 3.2	แสดงระบบชั้กตัวอย่างข้อมูล	21
รูปที่ 3.3	แสดงระบบควบคุมแบบชั้กตัวอย่างข้อมูลชนิดป้อนกลับ	22
รูปที่ 3.4	แสดงตัวดำเนินการของสัญญาณลูกผสม	25
รูปที่ 3.5	แสดงระบบวงรอบเปิดของระบบชั้กตัวอย่างข้อมูล	27
รูปที่ 3.6	แสดงลักษณะของระบบชั้กตัวอย่างข้อมูลโดยทั่วไป	35
รูปที่ 3.7	แสดงระบบในเวลาเต็มหน่วยที่สมมูลกับระบบชั้กตัว อย่างข้อมูล	39
รูปที่ 3.8	แสดงกรอบการทำงานของกระแ้กหระหัดตัวควบคุมเชิงเลข สำหรับระบบชั้กตัวอย่างข้อมูล	40
รูปที่ 3.9	แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วครู่ของ $y(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS เมื่อคาบการชั้กตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที	43
รูปที่ 3.10	แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าควบคุมของ $u(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS เมื่อคาบการชั้กตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที	44
รูปที่ 3.11	แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วครู่ของ $y(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS เมื่อคาบการชั้กตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที	44
รูปที่ 3.12	แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าควบคุมของ $u(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS เมื่อคาบการชั้กตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.13	แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วคราวของ $y(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS เมื่อคาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที.....	45
รูปที่ 3.14	แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าควบคุมของ $u(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS เมื่อคาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที.....	46
รูปที่ 3.15	แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วคราวของ $y(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (unstable plant) เมื่อคาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที.....	47
รูปที่ 3.16	แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าควบคุมของ $u(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (unstable plant) เมื่อคาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที.....	48
รูปที่ 3.17	แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วคราวของ $y(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (unstable plant) เมื่อคาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที.....	48
รูปที่ 3.18	แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าควบคุมของ $u(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (unstable plant) เมื่อคาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที.....	49
รูปที่ 3.19	แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วคราวของ $y(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (unstable plant) เมื่อคาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที.....	49
รูปที่ 3.20	แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าควบคุมของ $u(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (unstable plant) เมื่อคาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที.....	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.21	
แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วคราวของ $y(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (non-minimum phase stable) ทั้งโพลและซีโรอยู่ ทางด้านขวาของระนาบ s เมื่อคาบการซึกตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที	51
รูปที่ 3.22	
แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าควบคุม $u(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (non-minimum phase stable) ทั้งโพลและซีโรอยู่ ทางด้านขวาของระนาบ s เมื่อคาบการซึกตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที	52
รูปที่ 3.23	
แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วคราวของ $y(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (non-minimum phase stable) ทั้งโพลและซีโรอยู่ ทางด้านขวาของระนาบ s เมื่อคาบการซึกตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที	52
รูปที่ 3.24	
แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วคราวของ $u(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (non-minimum phase stable) ทั้งโพลและซีโรอยู่ ทางด้านขวาของระนาบ s เมื่อคาบการซึกตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที	53
รูปที่ 3.25	
แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วคราวของ $y(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (non-minimum phase stable) ทั้งโพลและซีโรอยู่ ทางด้านขวาของระนาบ s เมื่อคาบการซึกตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.26	แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าควบคุมของ $u(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (non-minimum phase stable) ทั้งโพลและซีโรอยู่ทางด้านขวาของระนาบ s เมื่อคาบการซັกดัวอย่างเป็น 0.8 วินาที.....	54
รูปที่ 3.27	แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วครู่ของ $y(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (unstable plant) เมื่อคาบการซັกดัวอย่างเป็น 0.02 วินาที	55
รูปที่ 3.28	แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าควบคุมของ $u(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (unstable plant) เมื่อคาบการซັกดัวอย่างเป็น 0.02 วินาที.....	56
รูปที่ 3.29	แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วครู่ของ $y(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (unstable plant) เมื่อคาบการซັกดัวอย่างเป็น 0.2 วินาที.....	56
รูปที่ 3.30	แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าควบคุมของ $u(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (unstable plant) เมื่อคาบการซັกดัวอย่างเป็น 0.2 วินาที.....	57
รูปที่ 3.31	แสดงผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองชั่วครู่ของ $y(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (unstable plant) เมื่อคาบการซັกดัวอย่างเป็น 0.8 วินาที.....	57
รูปที่ 3.32	แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าควบคุมของ $u(t)$ ระหว่างการออกแบบด้วยวิธีการ Cont.-design, CBS, DTS และ SDS (unstable plant) เมื่อคาบการซັกดัวอย่างเป็น 0.8 วินาที.....	58
รูปที่ 5.1	แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักที่แปรผันตามเวลาโดย α เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 ที่ คาบการซັกดัวอย่างเป็น 0.02 วินาที.....	86

สารบัญญภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 5.2	แสดงผลของสัญญาณเข้าควบคุมของระบบเมื่อมีฟังก์ชัน ถ่วงน้ำหนักที่ไม่แปรผันตามเวลา โดยค่า α เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 ที่คาบการชักตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที.....	87
รูปที่ 5.3	แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่แปรผันตามเวลาโดย α เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 ที่ คาบการชักตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที	87
รูปที่ 5.4	แสดงผลของสัญญาณเข้าควบคุมของระบบเมื่อมีฟังก์ชัน ถ่วงน้ำหนักที่ไม่แปรผันตามเวลา โดยค่า α เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 ที่คาบการชักตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที	88
รูปที่ 5.5	แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่แปรผันตามเวลาโดยค่า α เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 ที่ คาบการชักตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที	88
รูปที่ 5.6	แสดงผลของสัญญาณเข้าควบคุมของระบบเมื่อมีฟังก์ชัน ถ่วงน้ำหนักที่ไม่แปรผันตามเวลา โดยค่า α เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 ที่คาบการชักตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที	89
รูปที่ 5.7	แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่แปรผันตามเวลา โดยค่า α เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 ที่มีโพลและซีโรทางด้านขวาของระนาบ s และคาบการชัก ตัวอย่างเท่ากับ 0.02 วินาที.....	91
รูปที่ 5.8	แสดงผลของสัญญาณเข้าควบคุมของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่แปรผันตามเวลา โดยค่า α เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 ที่มีโพลและซีโรทางด้านขวาของระนาบ s และคาบการชัก ตัวอย่างเท่ากับ 0.02 วินาที.....	92
รูปที่ 5.9	แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่แปรผันตามเวลา โดยค่า α เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 ที่มีโพลและซีโรทางด้านขวาของระนาบ s และคาบการชัก	

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ตัวอย่างเท่ากับ 0.2 วินาที.....	92
รูปที่ 5.10 แสดงผลของสัญญาณเข้าควบคุมของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่แปรผันตามเวลา โดยค่า α เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 ที่มีโพลและซีโรทางด้านขวาของระนาบ s และคาบการชัก	
ตัวอย่างเท่ากับ 0.2 วินาที.....	93
รูปที่ 5.11 แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่แปรผันตามเวลา โดยค่า α เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 ที่มีโพลและซีโรทางด้านขวาของระนาบ s และคาบการชัก	
ตัวอย่างเท่ากับ 0.8 วินาที.....	93
รูปที่ 5.12 แสดงผลของสัญญาณเข้าควบคุมของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่แปรผันตามเวลา โดยค่า α เท่ากับ 0, 1, 5 และ 10 ที่มีโพลและซีโรทางด้านขวาของระนาบ s และคาบการชัก	
ตัวอย่างเท่ากับ 0.8 วินาที.....	94
รูปที่ 5.13 แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาโดย γ เท่ากับ 0.5, 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่คาบการชักตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที.....	96
รูปที่ 5.14 แสดงผลของสัญญาณเข้าควบคุมของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาโดย γ เท่ากับ 0.5, 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่คาบการชักตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที.....	96
รูปที่ 5.15 แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา โดย γ เท่ากับ 0.5, 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่คาบการชักตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที.....	97
รูปที่ 5.16 แสดงผลของสัญญาณเข้าควบคุมของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาโดย γ เท่ากับ 0.5, 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่คาบการชักตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที.....	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.17	แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาโดย γ เท่ากับ 0.5, 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่คาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที 98
รูปที่ 5.18	แสดงผลของสัญญาณเข้าควบคุมของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาโดย γ เท่ากับ 0.5, 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่คาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที..... 98
รูปที่ 5.19	แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะ $y(t)$ ของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาโดย γ เท่ากับ 0.5, 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่คาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที..... 100
รูปที่ 5.20	แสดงผลของสัญญาณเข้าควบคุมของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาโดย γ เท่ากับ 0.5, 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่คาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที..... 100
รูปที่ 5.21	แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะ $y(t)$ ของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาโดย γ เท่ากับ 0.5, 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่คาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที..... 101
รูปที่ 5.22	แสดงผลของสัญญาณเข้าควบคุมของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาโดย γ เท่ากับ 0.5, 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่คาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที..... 101
รูปที่ 5.23	แสดงผลการตอบสนองชั่วขณะ $y(t)$ ของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาโดย γ เท่ากับ 0.5, 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่คาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที..... 102
รูปที่ 5.24	แสดงผลของสัญญาณเข้าควบคุมของระบบเมื่อมีฟังก์ชันถ่วง น้ำหนักที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาโดย γ เท่ากับ 0.5, 1, 5 และ 10 ตามลำดับ ที่คาบการซັกดตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที..... 102
รูปที่ 5.25	แสดงสัญญาณออกในโดเมนเวลาต่อเนื่องที่คาบการซັก ตัวอย่าง 0.02 วินาที เมื่อมีฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักไม่แปร เปลี่ยนตามเวลา 104

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.26	แสดงสัญญาณออกในเวลาเต็มหน่วยที่คาบการซักร ตัวอย่าง 0.02 วินาที เมื่อมีฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักไม่แปร เปลี่ยนตามเวลา 104
รูปที่ 5.27	แสดงสัญญาณเข้าควบคุมในโดเมนเวลาต่อเรื่องที่คาบการซักร ตัวอย่าง 0.02 วินาที เมื่อมีฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักไม่แปร เปลี่ยนตามเวลา 105
รูปที่ 5.28	แสดงสัญญาณเข้าควบคุมในเวลาเต็มหน่วยที่คาบการซักร ตัวอย่าง 0.02 วินาที เมื่อมีฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักไม่แปร เปลี่ยนตามเวลา 105
รูปที่ 5.29	แสดงสัญญาณออกในโดเมนเวลาต่อเรื่องที่คาบการซักร ตัวอย่าง 0.2 วินาที เมื่อมีฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักไม่แปร เปลี่ยนตามเวลา 106
รูปที่ 5.30	แสดงสัญญาณออกในเวลาเต็มหน่วยที่คาบการซักร ตัวอย่าง 0.2 วินาที เมื่อมีฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักไม่แปร เปลี่ยนตามเวลา 106
รูปที่ 5.31	แสดงสัญญาณเข้าควบคุมในโดเมนเวลาต่อเรื่องที่คาบการซักร ตัวอย่าง 0.2 วินาที เมื่อมีฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักไม่แปร เปลี่ยนตามเวลา 107
รูปที่ 5.32	แสดงสัญญาณเข้าควบคุมในเวลาเต็มหน่วยที่คาบการซักร ตัวอย่าง 0.2 วินาที เมื่อมีฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักไม่แปร เปลี่ยนตามเวลา 107
รูปที่ 5.33	แสดงผลการเปรียบเทียบการออกแบบโดยใช้การแปลงเดลต้า และการแปลง Z เมื่อใช้คาบการซักรตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที 108
รูปที่ 5.34	แสดงผลการเปรียบเทียบของสัญญาณเข้าควบคุมในการออก แบบโดยใช้การแปลงเดลต้าและการแปลง Z เมื่อใช้คาบ การซักรตัวอย่างเป็น 0.02 วินาที 109

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.35	แสดงผลการเปรียบเทียบการออกแบบโดยใช้การแปลงเดลต้าและการแปลง Z เมื่อใช้คาบการซีกตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที 109
รูปที่ 5.36	แสดงผลการเปรียบเทียบของสัญญาณเข้าควบคุมในการออกแบบโดยใช้การแปลงเดลต้าและการแปลง Z เมื่อใช้คาบการซีกตัวอย่างเป็น 0.2 วินาที 110
รูปที่ 5.37	แสดงผลการเปรียบเทียบการออกแบบโดยใช้การแปลงเดลต้าและการแปลง Z เมื่อใช้คาบการซีกตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที 110
รูปที่ 5.38	แสดงผลการเปรียบเทียบของสัญญาณเข้าควบคุมในการออกแบบโดยใช้การแปลงเดลต้าและการแปลง Z เมื่อใช้คาบการซีกตัวอย่างเป็น 0.8 วินาที 111
รูปที่ 5.39	แสดงผลการเปรียบเทียบการออกแบบด้วยการแปลงเดลต้าที่คาบการซีกตัวอย่างต่าง ๆ 111
รูปที่ 5.40	แสดงผลการเปรียบเทียบการออกแบบด้วยการแปลง Z ที่คาบการซีกตัวอย่างต่าง ๆ กับการออกแบบด้วยการแปลงเดลต้าที่คาบการซีกตัวอย่างเป็นศูนย์ (Cont.-design) 112
รูปที่ 5.41	แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมของการแปลงเดลต้าที่คาบการซีกตัวอย่างต่าง ๆ 112
รูปที่ 5.42	แสดงผลการเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมของการแปลง Z ที่คาบการซีกตัวอย่างต่าง ๆ กับการออกแบบด้วยการแปลงเดลต้าที่คาบการซีกตัวอย่างเป็นศูนย์ 113