

การออกแบบตัวควบคุมพลวัตสำหรับระบบสายพานลำเลียง
โดยวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ



นายกิตติพงษ์ เขียรจันทรวงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548
ISBN 974-17-5603-8
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DYNAMIC CONTROLLER DESIGN FOR BELT CONVEYOR SYSTEM
USING ITERATIVE FEEDBACK TUNING

Mr. Kittipong Teanjunwong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-5603-8

481811

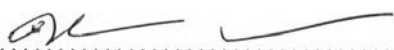
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบตัวควบคุมพลวัตสำหรับระบบสายพานลำเลียงโดยวิธีปรับจูนการ
ป้อนกลับวนซ้ำ

โดย นายกิตติพงษ์ เขียรจันทร์วงศ์


สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

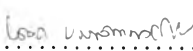
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรรเจ็ดพงศ์ชัย

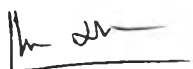
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรรเจ็ดพงศ์ชัย)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

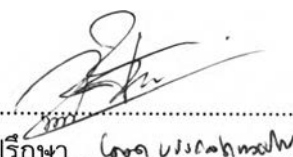
กิตติพงษ์ เขียรจันทรวงศ์: การออกแบบตัวควบคุมพลวัตสำหรับระบบสายพานลำเลียงโดยวิธีปรับ
 ลูการป้อนกลับวนซ้ำ (DYNAMIC CONTROLLER DESIGN FOR BELT CONVEYOR SYSTEM
 USING ITERATIVE FEEDBACK TUNING), อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร. เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย, 120
 หน้า, ISBN 974-17-5603-8

วิธีปรับลูการป้อนกลับวนซ้ำเป็นแนวทางหนึ่งที่รวมการหาเอกลักษณ์กับการสังเคราะห์ตัวควบคุม
 เข้าด้วยกัน กลไกการทำงานมีรูปแบบเหมือนกับการควบคุมแบบปรับตัว ที่เป็นระบบสัญญาณเข้าเดียว
 สัญญาณออกเดียวเวลาไม่ต่อเนื่อง พารามิเตอร์ของระบบไม่อาจทราบค่าล่วงหน้า และพลวัตของกระบวน
 การอาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีความไม่แน่นอน วิธีปรับลูการป้อนกลับวนซ้ำสามารถสังเคราะห์ตัวควบคุม
 สำหรับระบบพลวัต โดยคำนึงถึงตรรกะนิสมรรถนะของระบบวงปิด หลักการทั่วไปของวิธีนี้จะเป็นการหา
 ตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ที่มีรูปแบบปัญหาเป็นการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเกาส์เซียนกำลังสองเชิงเส้น เมื่อ
 ประยุกต์วิธีเกาส์-นิวตันทำให้พัฒนาระเบียบวิธีสังเคราะห์ตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด เรายังได้ประยุกต์วิธีปรับ
 ลูการป้อนกลับวนซ้ำกับระบบสายพานลำเลียง เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในกระบวนการ ระบบสาย
 พานลำเลียงเป็นระบบหนึ่งที่ใช้อย่างแพร่หลายในการลำเลียงผลิตภัณฑ์ แม้ว่าระบบนี้มีสัญญาณเข้าเดียว
 และสัญญาณออกเดียว แต่แบบจำลองของระบบมีความซับซ้อน อีกทั้งพารามิเตอร์บางตัวไม่อาจทราบค่า
 ได้ และพลวัตของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีความไม่แน่นอน ทำให้การออกแบบตัวควบคุม
 ที่ให้สมรรถนะสูงมีความยุ่งยาก วิทยานิพนธ์นำเสนอการพัฒนาวิธีปรับลูการป้อนกลับวนซ้ำ เพื่อออก
 แบบตัวควบคุมสำหรับระบบสายพานลำเลียงให้มีสมรรถนะสูง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาวะการทำงาน
 ต่อจากนั้นจะนำเอาวิธีคำนวณสัญญาณของสัญญาณออกและสัญญาณเข้ามาพัฒนาเป็นโปรแกรมที่ใช้
 สำหรับวัดสัญญาณออกและสัญญาณเข้า อีกทั้งอธิบายกรรมวิธีและเทคนิคในการเขียนโปรแกรม Lab-
 VIEW และ MATLAB เพื่อให้ได้สัญญาณออกและสัญญาณเข้าตามต้องการ

ผลการทดลองของวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วยผลจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และผลทดลองกับระบบจริง
 ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีปรับลูการป้อนกลับวนซ้ำ
 สามารถปรับตัวเองให้คงทนต่อการเปลี่ยนแปลงมวลภาระและความไม่แน่นอนของระบบได้ แม้ว่าจะเปลี่ยน
 แปลงค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุม ก็ยังคงสามารถปรับปรุงสมรรถนะการทำงานที่ยอมรับได้ ส่วน
 ผลการทดลองกับระบบจริงพบว่า สามารถสังเคราะห์ตัวควบคุมและปรับปรุงให้ระบบวงปิดมีสมรรถนะการ
 ทำงานที่สูงขึ้น ภายใต้การเปลี่ยนแปลงมวลภาระของระบบ จากผลการทดลองจริงเผยให้เห็นถึงศักยภาพ
 ของการประยุกต์ใช้วิธีปรับลูการป้อนกลับวนซ้ำ เพื่อการวิเคราะห์ตรรกะนิสมรรถนะและการสังเคราะห์
 ตัวควบคุมกับกระบวนการอุตสาหกรรมจริง

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
 ปีการศึกษา.....2548.....

ลายมือชื่อนิสิต
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....



##4770217121: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: ITERATIVE FEEDBACK TUNING/ DYNAMIC CONTROLER DESIGN/ OPTIMAL CONTROL/ BELT CONVEYOR SYSTEM

KITTIPONG TEANJUNWONG: DYNAMIC CONTROLLER DESIGN FOR BELT CONVEYOR SYSTEM USING ITERATIVE FEEDBACK TUNING. THESIS ADVISOR: DAVID BANJERDPONGCHAI, Ph.D., 120 pp., ISBN 974-17-5603-8

The iterative feedback tuning method is an approach that integrates the techniques of identification and controller synthesis. Its mechanism is akin to that of adaptive control for single-input single-output (SISO) continuous systems with unknown parameters and uncertainty in process dynamics. The iterative feedback tuning method is capable of synthesizing controller for dynamical systems with regard to a certain closed-loop performance index. The general principle of this tuning method is to find the optimal controller with respect to the Linear Quadratic Gaussian (LQG) performance objective. The Gauss-Newton method is used in the algorithm to synthesis such optimal controller. To exhibit its effectiveness in process control, the iterative feedback tuning method is applied to the belt conveyor system, which is ubiquitous in product transporting in factories. Even though the belt conveyor system is a SISO system, its mathematical model is complicate, and some parameters are either not available, changing over the time, or having uncertainties. Accordingly, it is challenging to adopt the iterative feedback tuning method to this system. This thesis aims to design such a controller for the belt conveyor system that yields high performance under changing operating conditions. The computations of output and input signals are developed to measure output and input signals. Furthermore, LabVIEW and MATLAB programming for measurement and computation are presented.

The thesis results are twofold. The first portion, which is computer simulation, reveals that the controller design via the iterative feedback tuning is capable of adapting itself according to changes in load mass and system uncertainties. Even though the initial parameters of the controller are varied, the designed controller still yields the acceptable operating performance. The second portion, which is implementation on an actual plant, indicates that the synthesized controller can improve the performance of the closed-loop system under changes of load mass. The implementation results show the potential of applying the iterative tuning method to analyze performances and synthesize controllers for actual industrial processes.

DepartmentElectrical Engineering.....
Field of study.....Electrical Engineering.....
Academic year2005.....

Student's signature*Kittipong Teanjunwong*.....
Advisor's signature*David Banjerdpongchai*.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรรเจ็ดพงศ์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำแนะนำต่างๆ ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาตรวจสอบเพื่อปรับปรุงให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในสาขาระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้พื้นฐานในวิชาทางระบบควบคุม อันเป็นพื้นฐานในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง สำหรับทุนสนับสนุนการสร้างนักวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง และญาติผู้เป็นกำลังใจและกำลังใจทรัพย์ตลอดเวลา รวมทั้งให้โอกาสผู้วิจัยได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทมาบัดนี้

ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อนๆ และรุ่นน้องในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมที่ให้กำลังใจและคำปรึกษาจนผู้วิจัยได้ทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทรัพยากรต่างๆ ในการศึกษา ค้นคว้าและวิจัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	2
1.3 วัตถุประสงค์	3
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	4
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์	5
2 วิธีปรับปรุงการป้อนกลับวนซ้ำ	7
2.1 บทนำ	7
2.2 รูปแบบปัญหาการออกแบบ	7
2.3 คำตอบของปัญหาการหาค่าต่ำสุด	10
2.3.1 ความสัมพันธ์ของสัญญาณออก	11
2.3.2 ความสัมพันธ์ของสัญญาณเข้า	12
2.4 เฮสเซียนเมทริกซ์และขนาดความยาวของการค้นหา	14
2.4.1 การประมาณเฮสเซียนเมทริกซ์ด้วยวิธีนิวตัน-เสมือน	14
2.4.2 การหาช่วงก้าวของการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการตามรอยถอยหลัง	16
2.5 การลู่อู่เข้าของคำตอบ	18
2.6 สรุป	19
3 การประดิษฐ์อุปกรณ์สำหรับระบบสายพานลำเลียง	20
3.1 บทนำ	20
3.2 การประดิษฐ์อุปกรณ์ทางด้านกลศาสตร์	20
3.3 การประดิษฐ์อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์	22

3.4	สรุป	27
4	การสังเคราะห์ตัวควบคุมพลวัตสำหรับระบบสายพานลำเลียง	28
4.1	บทนำ	28
4.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบสายพานลำเลียง	30
4.2.1	พลวัตของระบบสายพานลำเลียง	30
4.2.2	แบบจำลองเชิงเส้นเชิงเส้นของระบบสายพานลำเลียง	32
4.3	ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวควบคุมพลวัต	33
4.4	ตัวอย่างเชิงเลข	34
4.4.1	แบบจำลองไม่พิจารณาแรงเสียดทานไม่เชิงเส้น	36
4.4.2	แบบจำลองพิจารณาแรงเสียดทานไม่เชิงเส้น	43
4.4.3	สภาวะทำงานที่มีความไม่แน่นอนของระบบ	50
4.4.4	ช่วงเวลาเก็บข้อมูล	53
4.4.5	สัญญาณเข้าอ้างอิงแบบสี่เหลี่ยมคางหมู	57
4.5	สรุป	60
5	การทดลองกับระบบสายพานลำเลียง	61
5.1	บทนำ	61
5.2	ขั้นตอนการประยุกต์ใช้งาน	61
5.3	ผลการทดลอง	62
5.3.1	สภาวะที่ไม่มีมวลภาระ	62
5.3.2	สภาวะการทำงานที่มีมวลภาระหนัก 300 กรัม	66
5.3.3	สภาวะการทำงานที่มีมวลภาระหนัก 600 กรัม	72
5.3.4	สภาวะการทำงานที่มีมวลภาระหนัก 900 กรัม	74
5.4	วิเคราะห์ผลการทดลอง	76
6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	79
6.1	บทสรุป	79
6.2	ข้อเสนอแนะในงานวิจัย	80
	รายการอ้างอิง	81
	ภาคผนวก	84
ก	การพัฒนาโปรแกรมสำหรับระบบสายพานลำเลียง	85
ก.1	โปรแกรม LabVIEW	85
ก.2	เครื่องมือในการออกแบบแผงด้านหน้า	87
ก.3	การพัฒนาโปรแกรม	88
ก.4	สถาปัตยกรรมการเขียนโปรแกรม	98

ก.5 การรับข้อมูลกับ LabVIEW	102
ก.6 การควบคุมเครื่องมือด้วย LabVIEW	103
ก.7 การใช้งานอื่นๆ	104
ข โปรแกรมสำหรับตรวจจับตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรง.....	106
ค แบบแปลนและลายทองแดงของวงจรสำหรับระบบสายพานลำเลียง	110
ง โครงสร้างของชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางกลศาสตร์ของระบบสายพานลำเลียง	112
จ ค่าพารามิเตอร์จากการวนซ้ำในการทดลอง	116
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	120

สารบัญตาราง

4.1	ค่าพารามิเตอร์ของระบบสายพานลำเลียง	29
5.1	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมในสถานะที่ไม่มีมวลภาระ เมื่อ $\rho_0 = [0.01 \ 0.001 \ 0.001]^T$	63
5.2	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมในสถานะที่ไม่มีมวลภาระ เมื่อ $\rho_0 = [0.01 \ 0.002 \ 0.002]^T$	65
5.3	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีมวลภาระหนัก 300 กรัม เมื่อ $\rho_0 = [0.012 \ 0.0017 \ 0.0018]^T$	66
5.4	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีมวลภาระหนัก 300 กรัม เมื่อ $\rho_0 = [0.01 \ 0.0009 \ 0.0008]^T$	68
5.5	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีมวลภาระหนัก 600 กรัม เมื่อ $\rho_0 = [0.015 \ 0.008 \ 0.005]^T$	70
5.6	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีมวลภาระหนัก 600 กรัม เมื่อ $\rho_0 = [0.019 \ 0.003 \ 0.002]^T$	72
5.7	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีมวลภาระหนัก 900 กรัม เมื่อ $\rho_0 = [0.01 \ 0.002 \ 0.002]^T$	74
5.8	พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีมวลภาระหนัก 900 กรัม เมื่อ $\rho_0 = [0.02 \ 0.0001 \ 0.0001]^T$	76
จ.1	สถานะที่ไม่มีมวลภาระ เมื่อ $\rho_0 = [0.01 \ 0.001 \ 0.001]^T$	116
จ.2	สถานะที่ไม่มีมวลภาระ เมื่อ $\rho_0 = [0.01 \ 0.002 \ 0.002]^T$	117
จ.3	สถานะที่มีมวลภาระหนัก 300 กรัม เมื่อ $\rho_0 = [0.012 \ 0.0017 \ 0.0018]^T$	117
จ.4	สถานะที่มีมวลภาระหนัก 300 กรัม เมื่อ $\rho_0 = [0.01 \ 0.0009 \ 0.0008]^T$	118
จ.5	สถานะที่มีมวลภาระหนัก 600 กรัม เมื่อ $\rho_0 = [0.015 \ 0.008 \ 0.005]^T$	118
จ.6	สถานะที่มีมวลภาระหนัก 600 กรัม เมื่อ $\rho_0 = [0.019 \ 0.003 \ 0.002]^T$	119
จ.7	สถานะที่มีมวลภาระหนัก 900 กรัม เมื่อ $\rho_0 = [0.01 \ 0.002 \ 0.002]^T$	119
จ.8	สถานะที่มีมวลภาระหนัก 900 กรัม เมื่อ $\rho_0 = [0.02 \ 0.0001 \ 0.0001]^T$	119

สารบัญญภาพ

2.1	ระบบวงปิด	8
2.2	การควบคุมแบบปรับตัวโดยอ้างอิงแบบจำลอง	9
2.3	เงื่อนไขการเลือกขนาดความยาวของการค้นหาด้วยการตามรอยถอยหลัง	17
3.1	ส่วนประกอบในการควบคุมระบบสายพานลำเลียง	21
3.2	โครงสร้างอุปกรณ์ทางด้านกลศาสตร์	22
3.3	มอเตอร์กระแสตรง	23
3.4	ชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรง	24
3.5	การ์ด A/D, D/A และ Digital I/O	25
3.6	วงจรไฟฟ้าขับมอเตอร์กระแสตรง	26
4.1	ระบบสายพานลำเลียงที่รวมแบบจำลองความไม่แน่นอน และแรงเสียดทาน	29
4.2	ความไม่แน่นอนเชิงการคูณ	29
4.3	การแบ่งสายพานลำเลียงเป็น N ส่วน	31
4.4	แผนภาพรูปร่างอิสระ	31
4.5	รูปแบบการทดลองครั้งที่ 1	35
4.6	รูปแบบการทดลองครั้งที่ 2	35
4.7	รูปแบบการทดลองครั้งที่ 3	35
4.8	ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า	37
4.9	ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	38
4.10	สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	38
4.11	ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	39
4.12	สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	39
4.13	ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า	40
4.14	ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	41
4.15	สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	41
4.16	ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 3 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	42
4.17	สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 3 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	42
4.18	ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า	44
4.19	ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	45
4.20	สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	45
4.21	ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 9 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	46

5.14	ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 3 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	73
5.15	สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 3 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	73
5.16	ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า	74
5.17	ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	75
5.18	สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	75
5.19	ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	77
5.20	สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ	77
5.21	สภาวะอิมพัลส์ของมอเตอร์	78
ก.1	เครื่องมือแฉงด้านหน้า	86
ก.2	ส่วนเครื่องมือที่ใช้สำหรับการออกแบบแฉงด้านหน้า	87
ก.3	เครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมบนแผนภาพบล็อก	88
ก.4	การเขียนโปรแกรมแผนภาพบล็อกแบบกระแสดข้อมูล	89
ก.5	โครงสร้างการเขียนโปรแกรมวงวน	90
ก.6	การดูลำดับต่างๆ ของลำดับทั้งหมด	92
ก.7	ค่าที่เข้ามาในตัวเลือก	92
ก.8	รูปแบบข้อมูลแบบสายอักขระ	93
ก.9	การเพิ่มมิติของแถวลำดับ	94
ก.10	ฟังก์ชันรูปแบบข้อมูลแบบรูปคลื่น	95
ก.11	การเรียกใช้ตัวแปรเฉพาะที่	96
ก.12	การเขียนโปรแกรม LabVIEW ทำให้ผลลัพธ์ของตัวแปร X เกิดเงื่อนไขเรซ	97
ก.13	ฟังก์ชันเพิ่มเข้าและเพิ่มออก	98
ก.14	ตัวอย่างแผ่นแบบใน LabVIEW	100
ก.15	รูปแบบการใช้งาน NI-DAQmx	102
ค.1	ชุดอุปกรณ์ขยายสัญญาณจากตัวเข้ารหัส	110
ค.2	ชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรง	111
ค.3	ชิ้นส่วนอุปกรณ์ขับมอเตอร์กระแสตรง	111
ง.1	แบบวาดโครงสร้างแกน	113
ง.2	แบบวาดฐานรอง	113
ง.3	แบบวาดขายึดติดสายพาน	114
ง.4	แบบวาดตัวปรับความตึงสายพาน	114
ง.5	แบบวาดตัวจับยึดมอเตอร์กับสายพาน	115
ง.6	แบบวาดขอกันนิ้วสคูบนสายพาน	115