การควบคุมแขนกลแบบผสมระหว่างภาพกับแรง

นายรัชทิน จันทร์เจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-941-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19254118 12 พ.ย. 2546

HYBRID VISUAL SERVO/FORCE CONTROL OF A MANIPULATOR ARM

Mr. Ratchatin Chancharoen

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 1999

ISBN 974-333-941-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมแขนกลแบบผสมระหว่างภาพกับแรง
โดย	นายรัชทิน จันทร์เจริญ
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

_____ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____ ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วริทธิ์ อึ้งภากรณ์)

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

_____ กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

_____ กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

_____ กรรมการ

(พล.อ.ต. ศ. ดร. สมนึก พาลีบัตร์)

รัชทิน จันทร์เจริญ : การควบคุมแขนกลแบบผสมระหว่างภาพกับแรง. (HYBRID VISUAL SERVO /FORCE CONTROL OF A MANIPULATOR ARM) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ , 124 หน้า. ISBN 974-333-941-8.

โดยทั่วไปแล้ว หุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะทำงานได้เฉพาะในสถานที่ซึ่งจัดเตรียมให้เหมาะสมกับการทำงานของหุ่นยนต์เท่านั้น หุ่นยนต์มีบทบาทน้อยมากกับงานที่สภาพแวดล้อมหรือตำแหน่งชิ้นงานมีความไม่แน่นอน ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดในเรื่องการรับรู้ของหุ่นยนต์ เราอาจนำอุปกรณ์วัดแรงและระบบกล้องดิจิตัลมาใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพให้กับหุ่นยนต์เนื่องมาจากอุปกรณ์ตรวจรู้ทั้งสองทำงานคล้ายกับการสัมผัสและการมองของมนุษย์ตามลำดับ หุ่นยนต์จะสามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมโดยใช้ความสามารถนี้

ในงานวิจัยนี้ เราใช้ระบบกล้องดิจิตัลในการนำปลายแขนหุ่นยนต์เข้าหาชิ้นงาน กล้องจะติดตั้งอยู่ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์และจะบันทึกภาพตำแหน่งของชิ้นงานเทียบกับปลายแขนหุ่นยนต์ และเราได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงไว้ที่ปลายแขน และจะควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพพร้อมกัน กล่าวคือ ควบคุมเคลื่อนหุ่นยนต์ให้ตำแหน่งชิ้นงานปรากฏอยู่กลางภาพและปลายแขนออกแรงสัมผัสตามที่กำหนด เป้าหมายนี้มีความอิสระเท่ากับสาม อนึ่ง เราไม่ทราบตำแหน่งของชิ้นงานก่อนล่วงหน้า

เทคนิคการควบคุมแบบใหม่ เรียกว่า การควบคุมแบบเรียนรู้ ได้พัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพพร้อมกัน วิธีนี้จะประมาณหาจาโคเบียนจากการสังเกตการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ควบคุม และใช้จาโคเบียนในการหาทิศในการปรับตำแหน่งข้อต่อหุ่นยนต์ เนื่องจากวิธีการนี้ไม่ต้องสร้างแบบจำลองให้กับระบบ ทำให้สามารถนำไปใช้กับหุ่นยนต์แบบใดก็ได้ และเนื่องจากวิธีการนี้ทำงานอยู่บนการควบคุมตำแหน่งข้อต่อ ทำให้สามารถใช้ได้กับชุดควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไป เราได้ทดลองวิธีการนี้กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริงหลายครั้งเพื่อแสดงสมรรถนะของวิธีการ และได้จำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาถึงสมรรถนะต่างๆ ในหลายๆ กรณี

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา 2542 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

C816346 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: ROBOTS / FORCE SERVOING / VISUAL SERVO CONTROL
RATCHATIN CHANCHAROEN : HYBRID VISUAL SERVO/FORCE CONTROL OF A MANIPULATOR ARM. THESIS ADVISOR : ASSC. PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D. 124 pp. ISBN 974-333-941-8.

Normally, Industrial robots must be operated where the environment is contrived to suit the robot. The robots have less use in the applications where the working environment and the object position can not be accurately specified. This limitation is due to the lack of sensory capability. Force and vision sensors can be used to improve the flexibility of the robot since they mimic the human sense of force and vision respectively. The robots are able to interact with its environment using these capabilities.

In this research, the vision system is used to navigate the manipulator hand to a target object. The camera is in an eye-in-hand configuration and is able to capture the target position relative to the manipulator hand. Force sensor is also equipped to the robot hand. The task is to control force and visual parameters simultaneously, i.e., the target is in the middle of the image and also has the specified touching force, a 3 degrees of freedom task. The position of the target in the world coordinate is unknown.

A new technique called Learning Control is developed to complete the task. This technique determines the Jacobian from the robot movement and uses it to determine the direction for updating joint angles. Since this technique does not require system modeling, it is applicable to any robots. Furthermore, this technique works on joint command and thus is able to implement on any industrial robot controller. We performed several experiments to validate the proposed method. The computer simulation is used to analyze the performance in various conditions.

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต _____
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ปีการศึกษา 2542 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฏ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย 4

1.5 สิ่งริเริ่มในวิทยานิพนธ์ 4

1.6 ภาพรวมของวิทยานิพนธ์ 6

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7

2.1 นำเรื่อง 7

2.2 การควบคุมแรงหุ่นยนต์ 7

2.3 การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยกล้องดิจิตัล 11

2.4 การควบคุมแบบผสม 16

3 การประมวลรูปภาพ 20

3.1 นำเรื่อง 20

3.2 การบันทึกภาพของกล้องดิจิตัล 21

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้อง 22

3.4 การประมวลรูปภาพเพื่อหาตำแหน่งของวัตถุ 24

3.5 อภิปรายและสรุป 29

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	การควบคุมขับแขนกลด้วยระบบกล้องดิจิตัล	31
	4.1 นำเรื่อง	31
	4.2 วิธีการควบคุมแขนกลด้วยกล้องดิจิตัล	32
	4.3 อุปกรณ์ที่ใช้	33
	4.4 ภาพรวมของการทดลอง	34
	4.5 ทฤษฎีของการควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์ในรูปภาพ	35
	4.6 การจำลองควบคุมขับแขนกลกับปัญหาที่มีความอิสระเท่ากับสอง	39
	4.7 การทดลองกับปัญหาที่มีความอิสระเท่ากับสอง	43
	4.8 การจำลองควบคุมขับแขนกลกับปัญหาที่มีความอิสระเท่ากับสาม	49
	4.9 การทดลองกับปัญหาที่มีความอิสระเท่ากับสาม	52
	4.10 สรุปและอภิปราย	54
5	การควบคุมแรงของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม	55
	5.1 นำเรื่อง	55
	5.2 การทดลอง	56
	5.3 อุปกรณ์ที่ใช้	57
	5.4 ผลลัพธ์	58
	5.5 การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัลกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม	73
	5.6 สรุปและอภิปราย	75
6	การควบคุมแรงและรูปภาพของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม	76
	6.1 นำเรื่อง	76
	6.2 การควบคุมแรงและรูปภาพของแขนกล	77
	6.3 การควบคุมแบบสลับ	77
	6.4 การควบคุมแบบผสม	78
	6.5 การควบคุมแบบร่วมกัน	79
	6.6 การควบคุมแบบเรียนรู้	80
	6.7 อุปกรณ์ที่ใช้	82
	6.8 การจำลองการควบคุมแบบเรียนรู้	83
	6.9 การทดสอบการควบคุมแบบเรียนรู้กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม	85

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
6	การควบคุมแรงและรูปภาพของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม (ต่อ)	
	6.10 การควบคุมแบบขนาน ระหว่างแรงและพารามิเตอร์รูปภาพ	89
	6.11 สรุปและอภิปราย	91
7	บทสรุป	93
	7.1 บทสรุป	93
	7.2 งานวิจัยต่อเนื่อง	95
รายการอ้างอิง		97
ภาคผนวก		103
	ก. โปรแกรมจำลองการทำงาน	104
	ข. ข้อมูลการทดสอบกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม	113
	ค. ตัวอย่างโปรแกรมควบคุมการทำงาน	120
	ง. ประมวลภาพเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง	121
ประวัติผู้วิจัย		124

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ทิศทางการเดินหาขอบ 27
ตารางที่ 3.2 ความเร็วในการบันทึกและประมวลภาพ 29
ตารางที่ 6.1 ข้อมูลผลการทดลอง 88
ตารางที่ 6.2 ข้อมูลผลการทดลอง 91
ตารางที่ ข.1 ตารางข้อมูล 114
ตารางที่ ข.2 ตารางข้อมูล 115
ตารางที่ ข.3 ตารางข้อมูล 116
ตารางที่ ข.4 ตารางข้อมูล 117
ตารางที่ ข.5 ตารางข้อมูล 119

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	วิธีในการควบคุมแรงแบบผสมของ M. H. Raibert และ J. J. Craig	8
รูปที่ 2.2	วิธีในการควบคุมแรงแบบผสมของ Yoshikawa และคณะ	9
รูปที่ 2.3	วิธีในการควบคุมแรงแบบผสมของ Stokic และคณะ	9
รูปที่ 2.4	แบบจำลองของ หุ่นยนต์/อุปกรณ์ตรวจรู้/สิ่งแวดล้อม ของ Volpe และคณะ	10
รูปที่ 2.5	วิธีในการควบคุมแรงแบบผสมของนายไพรัช ตั้งพรประเสริฐ	10
รูปที่ 2.6	โครงสร้างการควบคุมของ Feddema และคณะ	13
รูปที่ 2.7	ผังระบบควบคุมของ Zheng และคณะ	13
รูปที่ 2.8	โครงสร้างการควบคุมแบบรูปภาพของ ของ Wijesoma และคณะ	14
รูปที่ 2.9	โครงสร้างการควบคุมของ Andres Castano และคณะ	16
รูปที่ 2.10	โครงสร้างการควบคุมทั่วไปที่เสนอโดย Nelson และคณะ	17
รูปที่ 2.11	อุปกรณ์ทดลองของ Hosoda และคณะ	18
รูปที่ 3.1	แกนอ้างอิงสำหรับระบบกล้อง	23
รูปที่ 3.2	รูปขาวดำ 8 บิต ของปากกา	25
รูปที่ 3.3	การกระจายของระดับความเข้มของจุดสี	25
รูปที่ 3.4	ภาพสองสีแสดงวัตถุที่ประมวลได้โดยใช้การตัดสี	26
รูปที่ 3.5	การตรวจหาขอบ	27
รูปที่ 3.6	ขอบของวัตถุ	28
รูปที่ 4.1	ลักษณะของแขนกลที่ใช้ในการศึกษา	40
รูปที่ 4.2	ผังการทำงานควบคุมแขนกลด้วยระบบกล้องดิจิตัล	41
รูปที่ 4.3	ผลของช่วงของก้าวเดินที่มีผลต่อทางเดินของปลายแขนกล	41
รูปที่ 4.4	ผลของค่าความยาวของแขนที่มีผลต่อการควบคุม	42
รูปที่ 4.5	หุ่นยนต์จากบริษัท CRS Robotic Inc พร้อมชุดควบคุม	44
รูปที่ 4.6	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	44
รูปที่ 4.7	การลู่เข้าของพารามิเตอร์ควบคุม	46
รูปที่ 4.8	ผลของช่วงก้าวเดินต่อสมรรถนะการควบคุม	47
รูปที่ 4.9	ผลของช่วงก้าวเดินต่อสมรรถนะการควบคุมในรูปของ RMSE	47
รูปที่ 4.10	สมรรถนะการควบคุมเมื่อเป้าหมายอยู่ในตำแหน่งต่างๆ กัน	48
รูปที่ 4.11	หุ่นยนต์ PUMA 560	49

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 4.12	ผลลัพธ์การควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพกับหุ่นยนต์ PUMA 560 ..	50
รูปที่ 4.13	แขนกล Stanford Arm	51
รูปที่ 4.14	ผลลัพธ์การควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพกับแขนกล Stanford Arm	51
รูปที่ 4.15	พารามิเตอร์รูปภาพในระหว่างที่ควบคุม	52
รูปที่ 4.16	ทางเดินของวัตถุในรูปภาพ	53
รูปที่ 5.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองควบคุมแรง	57
รูปที่ 5.2	การควบคุมแรงแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสี่เหลี่ยม	64
รูปที่ 5.3	การควบคุมแรงแบบอินทิกรัล โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสี่เหลี่ยม	64
รูปที่ 5.4	การควบคุมแรงแบบอินทิกรัลที่มีตัวชดเชย โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสี่เหลี่ยม	65
รูปที่ 5.5	การควบคุมแรงทางอ้อม โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสี่เหลี่ยม	65
รูปที่ 5.6	การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัล โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสี่เหลี่ยม	66
รูปที่. 5.7	เปรียบเทียบการควบคุมแรงด้วยวิธีต่างๆ โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสี่เหลี่ยม	66
รูปที่. 5.8	การควบคุมแรงแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบซายน์	67
รูปที่ 5.9	การควบคุมแรงแบบอินทิกรัล โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบซายน์	67
รูปที่ 5.10	การควบคุมแรงแบบอินทิกรัลที่มีตัวชดเชย โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบซายน์	68
รูปที่ 5.11	การควบคุมแรงทางอ้อม โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบซายน์	68
รูปที่ 5.12	การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัล โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบซายน์	69

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 5.13	เปรียบเทียบการควบคุมแรงด้วยวิธีต่างๆ โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบซายน์	69
รูปที่ 5.14	การควบคุมแรงแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสามเหลี่ยม	70
รูปที่ 5.15	การควบคุมแรงแบบอินทิกรัล โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสามเหลี่ยม	70
รูปที่ 5.16	การควบคุมแรงแบบอินทิกรัลที่มีตัวชดเชย โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสามเหลี่ยม	71
รูปที่ 5.17	การควบคุมแรงทางอ้อม โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสามเหลี่ยม	71
รูปที่ 5.18	การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัล โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสามเหลี่ยม	72
รูปที่ 5.19	เปรียบเทียบการควบคุมแรงด้วยวิธีต่างๆ โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสามเหลี่ยม	72
รูปที่ 5.20	การควบคุมแรงกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยมีสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได	74
รูปที่ 5.21	การควบคุมแรงกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยมีสัญญาณอ้างอิงแบบซายน์	74
รูปที่ 6.1	ผังการทำงานของการควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพ	77
รูปที่ 6.2	แขนกลที่ใช้ในการจำลองการควบคุมแรง และพารามิเตอร์รูปภาพพร้อมกัน	83
รูปที่ 6.3	ผังการทำงานของการควบคุมแบบเรียนรู้	84
รูปที่ 6.4	ความคลาดเคลื่อนในขณะที่แขนกลเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย	84
รูปที่ 6.5	ประสิทธิภาพในการติดตามแรงอ้างอิงที่ไม่คงที่	85
รูปที่ 6.6	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	86
รูปที่ 6.7	การลู่เข้าของพารามิเตอร์ควบคุม	86
รูปที่ 6.8	ทางเดินของวัตถุเป้าหมายที่มองเห็นจากกล้องดิจิตัล	87
รูปที่ 6.9	การลู่เข้าของพารามิเตอร์ควบคุม	89
รูปที่ 6.10	ทางเดินของวัตถุเป้าหมายที่มองเห็นจากกล้องดิจิตัล	90

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ ก.1	ผลลัพธ์การจำลองควบคุมหุ่นยนต์ PUMA 560 ด้วยกล้องดิจิตัล .	108
รูปที่ ก.2	ผลลัพธ์การจำลองควบคุมหุ่นยนต์ Stanford Arm ด้วยกล้องดิจิตัล	110
รูปที่ ข.1	ภาพที่บันทึกจากการทดลองควบคุมแขนกลด้วยรูปภาพ เรียงตามลำดับที่บันทึก	118
รูปที่ ข.2	ทางเดินของปลายแขน	119
รูปที่ ค.1	ตัวอย่างโปรแกรมควบคุม	120
รูปที่ ง.1	หุ่นยนต์อุตสาหกรรม	121
รูปที่ ง.2	ตัวควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม	121
รูปที่ ง.3	การติดอุปกรณ์วัดแรงและกล้องดิจิตัล	122
รูปที่ ง.4	ตัวควบคุมที่สร้างขึ้น	122
รูปที่ ง.5	หุ่นยนต์จุฬาฯ 2	123

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำ จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ และที่สำคัญที่สุด คือถ่ายทอดความรู้และให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

วิทยานิพนธ์นี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างมาก ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่สนับสนุนค่าวัสดุใช้สอยในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณสถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทยที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายรายเดือนซึ่งทำให้ผู้วิจัยสามารถมีเวลากับงานวิจัยอย่างเต็มที่ ขอขอบคุณบริษัทซีเกดที่อุทิศหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเพื่อให้ใช้ในการทดลอง และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ ที่ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ต่างๆ หลายชิ้น เพื่อให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการทดลองได้

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัย โรจน์ คุณพนิชกิจ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ รองศาสตรจารย์ ทวี เวชพฤติ และคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลอีกหลายท่าน ที่ให้คำแนะนำตลอดช่วงเวลาที่ทำวิจัย

ขอขอบคุณห้องสมุดอิเล็กทรอนิกส์ ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นแหล่งค้นคว้าที่สำคัญสำหรับวิทยานิพนธ์นี้

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมารดา ที่เป็นแรงกำลังใจให้ผู้วิจัยมีความมุ่งมั่นจนงานสำเร็จลุล่วง ตลอดจนภรรยาและลูกที่เข้าใจ และเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดเวลา