

การเรียนรู้ของแขนงหุ่นยนต์โดยใช้การโปรแกรมพื้นฐาน



นาย จุมพล พลวิชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2539

ISBN 974-633-468-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16495642

LEARNING OF A ROBOT ARM BY GENETIC PROGRAMMING

Mr. Jumpol Polvichai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Computer Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1996

ISBN 974-633-468-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์  
โดย  
ภาควิชา  
อาจารย์ที่ปรึกษา

การเรียนรู้ของแขนงหุ่นยนต์โดยใช้การโปรแกรมพันธุการ  
นาย จุมพล พลวิชัย  
วิศวกรรมคอมพิวเตอร์  
อาจารย์ ดร. จู๊ด ศิริบุรณ



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

\_\_\_\_\_ คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
( รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ฤงสุวรรณ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

\_\_\_\_\_ ประธานกรรมการ  
( อาจารย์ ดร. บุญเสริม กิจศิริกุล )

\_\_\_\_\_ อาจารย์ที่ปรึกษา  
( อาจารย์ ดร. จู๊ด ศิริบุรณ )

\_\_\_\_\_ กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล )

\_\_\_\_\_ กรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ )



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ  
อาจารย์ ดร. ลีต ศิริบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา ซึ่งท่าน  
ทั้งสองได้ให้การดูแล แนะนำ สั่งสอน และให้ข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาด้วยดีตลอดเวลา

เนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้ได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของสำนักงานพัฒนา-  
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ หรือ สวทช. จึงขอขอบคุณ สวทช. มา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ นางสาวสวิญญา อัครราษฎร์ ซึ่งเป็นผู้ให้กำลังใจและเป็นทีปรึกษาที่ดีแก่  
ผู้วิจัยตลอดเวลาในการทำวิจัยครั้งนี้

และ ขอขอบคุณ นายพินิจ เขียวขจี ซึ่งให้ความช่วยเหลือในการให้ยืมเครื่องมือพิมพ์  
สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี

จุมพล พลวิชัย

เมษายน 2539



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฐ
สารบัญภาพ .....	ฒ
<b>บทที่</b>	
1. บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา .....	1
1.2 ที่มาของงานวิจัย .....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.5 ขั้นตอนของการวิจัย .....	3
1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย .....	4
2. การโปรแกรมหุ่นยนต์ .....	5
2.1 การโปรแกรมหุ่นยนต์ .....	5
2.2 การโปรแกรมหุ่นยนต์สมัยแรก .....	6
2.3 การโปรแกรมหุ่นยนต์สมัยกลาง .....	8
2.4 การโปรแกรมหุ่นยนต์สมัยใหม่ .....	9
2.5 สรุปท้ายบท .....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. ขั้นตอนวิธีพันธนาการ .....	16
3.1 หลักการทั่วไป .....	16
3.2 รายละเอียดของขั้นตอนวิธีพันธนาการ .....	21
3.3 คุณสมบัติพิเศษ .....	21
3.4 ลักษณะที่แตกต่างของขั้นตอนวิธีพันธนาการจากวิธีการอื่นๆ .....	22
3.5 สรุปท้ายบท .....	23
4. ทำไมขั้นตอนวิธีพันธนาการจึงทำงานได้ .....	24
4.1 ทฤษฎีสก็มา .....	24
4.2 การคัดเลือกพันธู์ .....	26
4.3 การผสมพันธู์ .....	28
4.4 การกลายพันธู์ .....	30
4.5 สรุปท้ายบท .....	31
5. การโปรแกรมพันธนาการ .....	32
5.1 หลักการทั่วไป .....	32
5.2 รายละเอียดของการโปรแกรมพันธนาการ .....	33
5.3 ปฏิบัติการทางพันธนาการของการโปรแกรมพันธนาการ .....	37
5.4 สรุปท้ายบท .....	39
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	40
6.1 การวิวัฒนาการที่ละขั้น .....	40
6.2 แผนการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ .....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3	สมการอินเวอร์สโคไซน์เมติก ..... 42
6.4	ตัวอย่างปัญหาที่ใช้การโปรแกรมพันธุการ ..... 43
6.5	การทดลองหุ่นยนต์ผลักกล่อง ..... 49
6.6	สรุปท้ายบท ..... 50
<b>7.</b>	<b>การทดลอง ..... 52</b>
7.1	ลักษณะของปัญหา ..... 52
7.2	แขนหุ่นยนต์ ..... 54
7.3	การมองเห็นและการประมวลผลข้อมูลภาพ ..... 57
7.4	กระบวนการโปรแกรมพันธุการ ..... 59
7.5	การจำลองการทำงานของแขนหุ่นยนต์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ..... 66
7.6	การออกแบบการทดลอง ..... 67
7.7	สรุปท้ายบท ..... 68
<b>8.</b>	<b>ผลการทดลอง ..... 70</b>
8.1	ลักษณะของเส้นโค้งสมรรถภาพ ..... 71
8.2	ผลการทดลองของกลุ่มที่ 1 ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง ..... 72
8.3	ผลการทดลองของกลุ่มที่ 2 ในสภาพแวดล้อมที่มี 1 สิ่งกีดขวาง ..... 80
8.4	ผลการทดลองของกลุ่มที่ 3 ในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางมากกว่า 1 ..... 91
8.5	ผลการทดลองของกลุ่มที่ 4 ในสภาพแวดล้อมที่มีปัญหาจุดต่ำสุดเสมือน ... 100
8.6	สรุปผลการทดลองทั้งหมด ..... 110

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
9. สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	115
9.1 สรุปการวิจัย .....	115
9.2 ข้อเสนอแนะ .....	116
รายการอ้างอิง .....	118
ภาคผนวก	
ก. รายละเอียดการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ .....	122
ข. การประมวลผลข้อมูลภาพที่ใช้ในการทดลอง .....	131
ค. ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ .....	135
ประวัติผู้เขียน .....	141



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
7.1	สรุปพารามิเตอร์ต่างๆของการโปรแกรมพันธุการที่ใช้ในการทดลอง ..... 65
8.1	แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองของกลุ่มการทดลองที่ 1 ..... 79
8.2	แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองของกลุ่มการทดลองที่ 2 ..... 89
8.3	แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองของกลุ่มการทดลองที่ 3 ..... 99
8.4	แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองของกลุ่มการทดลองที่ 4 ..... 109
ข.1	กฎการเคลื่อนที่ของตัวตามรอย โดย L = ซ้าย, R = ขวา, X = พื้นหลัง และ O = วัตถุ .. 133
ข.2	การคำนวณเพื่อค่าของคุณสมบัติโดยทั่วไปของวัตถุ โดย $x_i, y_i$ เป็นจุดในรายการ ของจุดขอบรอบวัตถุ ..... 134

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงตัวอย่างของภาษาAML โปรแกรมของการนำหมุดลงรู(Peg in Hole) .....	7
2.2	แสดงตัวอย่างของการโปรแกรมในระดับงานของการใส่แบริงและน็อตในเพลลา .....	8
2.3	แสดงลักษณะการแบ่งโมดูลทำงานที่แตกต่างกันระหว่างการแบ่งแบบ Functional (บน) และ การแบ่งแบบ Behavior-base (ล่าง) .....	9
2.4	แสดงลักษณะสถาปัตยกรรมแบบ Subsumption .....	10
2.5	แสดงลักษณะของการควบคุมโดยใช้สัญญาณ การยับยั้งแบบแทนที่ (Suppression) และ การยับยั้งแบบหยุด (Inhibition) .....	10
2.6	แสดงตัวอย่างของการเขียนโปรแกรมแบบเพิ่มพูน .....	11
2.7	แสดงตัวอย่างการแบ่งชั้นของความสามารถ Level of Competence .....	12
3.1	แสดงแผนภูมิของเทคนิคการค้นหาทั้งหมด .....	17
3.2	แสดงการผสมพันธุ์แบบสลับไขว้ของคู่สายอักขระ .....	19
3.3	แสดงลักษณะการกลายพันธุ์ของสายอักขระ .....	19
3.4	แสดงแผนภูมิตายงานของขั้นตอนวิธีพันธุการ .....	20
4.1	แสดงโครงสร้างโดยทั่วไปของขบวนการวิวัฒนาการ .....	26
5.1	แสดงแผนภูมิตายงานของการโปรแกรมพันธุการ .....	34
5.2	ต้นไม้ที่แทนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (+ (* NO N1) NO) ซ้าย และ (+ (- NO N1) (/ NO N1)) ขวา .....	36
5.3	ตัวอย่างต้นไม้ที่เกิดจากการผสมพันธุ์ พ่อแม่(บน) และลูก(ล่าง) .....	37
5.4	ตัวอย่างต้นไม้ในขบวนการกลายพันธุ์ .....	38
5.5	ตัวอย่างต้นไม้ในขบวนการเปลี่ยนรูป .....	38
6.1	ภาพแสดงการเดินทางของมดประดิษฐ์บนพื้นที่ 32 x 32 ที่มีก้อนหิน 89 ก้อน .....	43
6.2	ภาพแสดงลักษณะการอ้างอิงตำแหน่งของผู้ไล่ล่าและผู้หลบหลีก .....	45

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3	ต้นไม้แสดงผลตอบแทนของการเลือกเดินแต่ละครั้ง ..... 47
6.4	ภาพหุ่นยนต์จำลองที่ถูกใช้ในการทดลองหุ่นยนต์ผลักกล่อง ..... 48
6.5	ภาพแสดงรูปร่างของห้อง, ตำแหน่งเริ่มต้นของกล่อง และตำแหน่งเริ่มต้นของ หุ่นยนต์ ..... 49
7.1	ภาพจำลองของการทดลอง ..... 53
7.2	แสดงระยะจำกัดของการหมุนของแต่ละข้อต่อ ..... 54
7.3	แสดงขอบเขตพื้นที่ของการเคลื่อนที่ทั้งหมดของแขนหุ่นยนต์ และขอบเขตพื้นที่ ของการเคลื่อนที่ภายใต้ขอบเขตพื้นที่การมองเห็นผ่านกล้องวิดีโอ ..... 54
7.4	แสดงส่วนประกอบภายในของเซอร์โวมอเตอร์ ..... 55
7.5	แสดงกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์กับความกว้าง ของพัลส์ ..... 56
7.6	แสดงรูปจำลองการควบคุมแขนหุ่นยนต์ ..... 57
7.7	ภาพแสดงภาพที่ได้จากกล้องวิดีโอ ..... 57
7.8	ตัวอย่างของโปรแกรมหุ่นยนต์และการแทนด้วยโครงสร้างต้นไม้ ..... 61
7.9	ลักษณะของการดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อยอด ..... 64
7.10	ลักษณะของการดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อปลาย ..... 64
7.11	แสดงลักษณะสภาพแวดล้อมของการทดลองทั้งหมด ..... 68
8.1	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 1 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 760 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหา ในรุ่นที่ 18 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100 %, $G = 250$ , $P_1 = 100$ %, $E_1 = 760$ ..... 74
8.2	แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 1 ..... 74

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.3	แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 1 .. 74
8.4	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 2 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 440 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหา ในรุ่นที่ 10 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100 % , $G = 250$ , $P_2 = 100\%$ , $E_2 = 440$ ..... 75
8.5	แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 2 ..... 75
8.6	แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 2 .. 75
8.7	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 3 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 200 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหา ในรุ่นที่ 4 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100 % , $G = 250$ , $P_3 = 100\%$ , $E_3 = 200$ ..... 77
8.8	แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 3 ..... 77
8.9	แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 3 .. 77
8.10	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 4 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 200 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหา ในรุ่นที่ 4 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100 % , $G = 250$ , $P_4 = 100\%$ , $E_4 = 200$ ..... 78
8.11	แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 4 ..... 78
8.12	แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 4 .. 78
8.13	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 5 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 14760 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 122 ที่มีโอกาสสำเร็จ 80 % , $G = 250$ , $P_5 = 80\%$ , $E_5 = 14760$ ..... 83

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.14 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 5 .....	83
8.15 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 5 ..	83
8.16 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 6 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 3800 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 94 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100 % , $G = 250$ , $P_6 = 100\%$ , $E_6 = 3800$ .....	84
8.17 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 6 .....	84
8.18 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 6 ..	84
8.19 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 7 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 8120 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 28 ที่มีโอกาสสำเร็จ 50 % , $G = 250$ , $P_7 = 60\%$ , $E_7 = 8120$ .....	87
8.20 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 7 .....	87
8.21 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 7 ..	87
8.22 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 8 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 5680 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 141 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100 % , $G = 250$ , $P_8 = 100\%$ , $E_8 = 5680$ .....	88
8.23 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 8 .....	88
8.24 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 8 ..	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.25	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 9 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 51240 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 60 ที่มีโอกาสสำเร็จ 20 % , $G = 250$ , $P_9 = 20 \%$ , $E_9 = 51240$ ..... 93
8.26	แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 9 ..... 93
8.27	แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 9 .. 93
8.28	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 10 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 66000 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 164 ที่มีโอกาสสำเร็จ 40 % , $G = 250$ , $P_{10} = 80 \%$ , $E_{10} = 66000$ ..... 94
8.29	แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 10 ..... 94
8.30	แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 10 .. 94
8.31	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 11 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 1560 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 38 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100 % , $G = 250$ , $P_{11} = 100 \%$ , $E_{11} = 1560$ ..... 97
8.32	แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 11 ..... 97
8.33	แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 11.. 97
8.34	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 12 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 5600 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 34 ที่มีโอกาสสำเร็จ 70 % , $G = 250$ , $P_{12} = 70 \%$ , $E_{12} = 5600$ ..... 98
8.35	แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 12 ..... 98

### สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.36	แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 12.. 98
8.37	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 13 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 71760 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 896 ที่มีโอกาสสำเร็จ 90 % , $G = 1250$ , $P_{13} = 90 \%$ , $E_{13} = 71760$ ..... 103
8.38	แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 13 ..... 103
8.39	แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 13.. 103
8.40	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 14 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 102440 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 196 ที่มีโอกาสสำเร็จ 30 % , $G = 1250$ , $P_{14} = 30 \%$ , $E_{14} = 102440$ ..... 104
8.41	แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 14 ..... 104
8.42	แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 14.. 104
8.43	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 15 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 245440 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 1533 ที่มีโอกาสสำเร็จ 70 % , $G = 1750$ , $P_{15} = 70 \%$ , $E_{15} = 245440$ ..... 107
8.44	แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 15 ..... 107
8.45	แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 15.. 107
8.46	แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 16 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 2600 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 4 ที่มีโอกาสสำเร็จ 30 % , $G = 250$ , $P_{16} = 30 \%$ , $E_{16} = 2600$ ..... 108

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.47	แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 16 ..... 108
8.48	แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 16.. 108
8.49	กราฟแสดงจำนวนรุ่นที่ดีที่สุดในแต่ละการทดลอง ..... 111
8.50	กราฟแสดงค่าความพยายามในการคำนวณในแต่ละการทดลอง ..... 111
8.51	กราฟแสดงขนาดของโปรแกรมเฉลี่ยที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละการทดลอง ..... 111
8.52	กราฟแสดงจำนวนครั้งของการล้างพันธุในแต่ละการทดลอง ..... 112
8.53	กราฟแสดงร้อยละของความสำเร็จในการทดลองในโลกกจริงในแต่ละการทดลอง ..... 112
ก.1	แสดงแผนภูมิผังงานของการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยครั้งนี้ ..... 123
ข.1	แสดงลักษณะการกวาดตรวจในข้อมูลภาพ ..... 132
ข.2	แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของการตามรอยรอบวัตถุ ..... 133
ค.1	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 1 ..... 136
ค.2	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 2 ..... 136
ค.3	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 3 ..... 136
ค.4	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 4 ..... 136
ค.5	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 5 ..... 137
ค.6	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 6 ..... 137
ค.7	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 7 ..... 137
ค.8	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 8 ..... 138
ค.9	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 9 ..... 138
ค.10	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 10 ..... 138
ค.11	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 11 ..... 138



## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ค.12	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 12 .....	139
ค.13	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 13 .....	139
ค.14	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 14 .....	139
ค.15	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 15 .....	140
ค.16	ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 16 .....	140