การปรับปรุงกระบวนการวิวัฒนาการในวิธีกำหนดการเชิงพันธุกรรม เพื่อสร้างคำตอบที่มีความทนทานสำหรับปัญหาการนำร่องหุ่นยนต์

นาย รุ่งโรจน์ นพสุวรรณชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-616-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I14556985X

IMPROVING EVOLUTIONARY PROCESS IN THE GENETIC PROGRAMMING FOR GENERATING A ROBUST SOLUTION TO THE ROBOT NAVIGATION PROBLEM

Mr. Roongroj Nopsuwanchai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Computer Science
Department of Computer Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1998

ISBN 974-331-616-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงกระบวนการวิวัฒนาการในวิธีกำหนดการเชิงพันธุกรรมเพื่อสร้างคำตอบที่มีความทนทานสำหรับปัญหาการนำร่องหุ่นยนต์
โดย	นายรุ่งโรจน์ นพสุวรรณชัย
ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ชัยศิริ ปัณฑิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สืบสกุล พิภพมงคล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อาทิตย์ ทองทักษ์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

รุ่งโรจน์ นพสุวรรณชัย : การปรับปรุงกระบวนการวิวัฒนาการในวิธีกำหนดการเชิงพันธุกรรมเพื่อสร้างคำตอบที่มีความทนทานสำหรับปัญหาการนำร่องหุ่นยนต์ (IMPROVING EVOLUTIONARY PROCESS IN THE GENETIC PROGRAMMING FOR GENERATING A ROBUST SOLUTION TO THE ROBOT NAVIGATION PROBLEM) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา , 95 หน้า.
ISBN 974-331-616-7.

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรม เพื่อให้คำตอบที่สร้างขึ้นมามีความทนทานมากขึ้น ปัญหาที่นำมาใช้คือ ปัญหาการนำร่องหุ่นยนต์ โดยการหาคำตอบซึ่งอยู่ในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์ ในการเดินหลบหลีกสิ่งกีดขวางเพื่อไปยังเป้าหมายภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด โดยที่ความทนทานของคำตอบ คือ ความสามารถในการนำคำตอบนั้นไปทำงาน ควบคุมหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างไปจากสภาพแวดล้อมที่ได้เรียนรู้มา วิธีการที่ใช้เพิ่มความทนทานของคำตอบ ใช้การปรับปรุงกระบวนการวิวัฒนาการในระหว่างการหาคำตอบ โดยให้เรียนรู้จากสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันจำนวนหลายๆ แบบ และการเพิ่มระดับความแตกต่างของสภาพแวดล้อมที่ใช้เรียนรู้เหล่านั้นให้มากขึ้น

ผลการวิจัย โดยการเปรียบเทียบความทนทานของคำตอบทั้งก่อน และหลังการปรับปรุงกระบวนการวิวัฒนาการ แสดงให้เห็นว่าจำนวนสภาพแวดล้อมในการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น และสภาพแวดล้อมที่ใช้เรียนรู้ที่มีความแตกต่างกันมากขึ้น มีผลทำให้ความทนทานของคำตอบเพิ่มสูงขึ้น ผลการวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้ความทนทานของคำตอบเพิ่มสูงขึ้น พบว่า เนื่องจาก 'ประสบการณ์' ที่คำตอบนั้นได้เรียนรู้มามีมากขึ้น และอัตราส่วนการนำประสบการณ์ที่ได้เรียนรู้มาไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่ได้เรียนรู้มามีอัตราเพิ่มสูงขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต รุ่งโรจน์ นพสุวรรณชัย
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ประภาส จงสถิตย์วัฒนา
ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

3971480921 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING
KEY WORD: AUTOMATIC ROBOT PROGRAMMING / GENETIC PROGRAMMING / ROBUSTNESS

ROONGROJ NOPSUWANCHAI : IMPROVING EVOLUTIONARY PROCESS IN THE GENETIC PROGRAMMING FOR GENERATING A ROBUST SOLUTION TO THE ROBOT NAVIGATION PROBLEM. THESIS ADVISOR : PRABHAS CHONGSTITVATANA, Ph.D.

95 pp. ISBN 974-331-616-7.

This research presents improvement of the Genetic Programming learning method for generating a robust solution to the robot navigation problem. The solution is in the form of a computer program that controls the robot to go to a target while avoiding obstacles within a particular environment. The robustness of a solution is defined as an ability to perform successfully in the environment that is different from the one that it was trained. The robustness of the solution is increased by improving the evolutionary process during the evolution of solutions by learning from multiple environments and by increasing the difference among those training environments.

The robustness of a solution before and after improving evolutionary process is compared. The result shows that increasing the number of environments and increasing the difference among environments cause the solution to be more robust. The analysis shows that the robustness of a solution depends on the acquired 'experience' during the evolution and the ratio of experience reusing in an unknown environment.

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้การดูแล คำแนะนำ และให้ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มาด้วยดีตลอด

ขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ หรือ สวทช. ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ นายสาธิต สุทธิธรรม ซึ่งให้ความช่วยเหลือ ดูแลเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลในภาควิชา และนายวิจารณ์ ศรีรัตนาลัย ที่ให้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ในศูนย์คอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อการประมวลผลด้วยดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ อาจารย์ชัชวาล วงศ์ศิริประเสริฐ ในการช่วยแก้ปัญหา และให้คำปรึกษาในส่วนของการเขียนโปรแกรมภาษา C ทั้งบนระบบปฏิบัติการ Windows บนระบบ Unix และบนระบบ Linux ขอขอบคุณ นางสาวน้ำฝน อัศวเมฆิน และนาย พีรกาญจน์ สิริเวชพันธุ ซึ่งช่วยตรวจทานแก้ไขข้อผิดพลาดในรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ นายวรวัฒน์ วรศิลป์ และนายเอกชัย ตันติกนกพร ที่ให้ความช่วยเหลือในการให้ใช้เครื่องพิมพ์ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ รวมทั้งพี่น้องทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ที่ดีมาโดยตลอด

และสุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ซึ่งเป็นผู้ให้กำเนิด ดูแล ให้คำปรึกษา และให้โอกาสในการศึกษาที่ดีมาโดยตลอด อีกทั้งให้การสนับสนุนด้านการเงินเป็นอย่างดี

รุ่งโรจน์ นพสุวรรณชัย

มีนาคม 2542

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่

1. **บทนำ** 1
   - 1.1 ความสำคัญ และความเป็นมาของปัญหา 2
   - 1.2 ที่มาของงานวิจัย 3
   - 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3
   - 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 3
   - 1.5 ขั้นตอน และวิธีดำเนินงานวิจัย 4
   - 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้ 4
   - 1.7 เนื้อหา และรูปแบบการนำเสนอวิทยานิพนธ์ 4
   - 1.8 บทความที่ตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์ 5

2. **กำหนดการเชิงพันธุกรรม** 6
   - 2.1 หลักการทั่วไป 6
   - 2.2 การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้น 8
   - 2.3 การประเมินค่าความเหมาะของผลเฉลย (Fitness Evaluation) 9
   - 2.4 การสร้างประชากรของผลเฉลยรุ่นใหม่ 10
     - 2.4.1 การสืบพันธุ์ (Reproduction) 11
     - 2.4.2 การไขว้เปลี่ยน (Crossover) 11
     - 2.4.3 การกลาย (Mutation) 12
   - 2.5 สรุปท้ายบท 13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง **14**

3.1 โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ในสภาพจำลอง 14

3.2 โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ในโลกจริง 15

3.3 การปรับปรุงความทนทานโดยเพิ่มสิ่งรบกวนให้ระบบ 16

3.4 การปรับปรุงความทนทานโดยใช้ชุดฟังก์ชันที่เหมาะสม 17

3.5 การปรับปรุงความทนทานโดยใช้วิวัฒนาการร่วม 17

3.6 การปรับปรุงความทนทานโดยเรียนรู้จากสภาพแวดล้อมหลายๆ แบบ 18

3.7 สรุปท้ายบท 19

4. การออกแบบการทดลอง 20

4.1 ลักษณะของปัญหา 20

4.2 รายละเอียดของกำหนดการเชิงพันธุกรรม 22

4.2.1 ฟังก์ชัน และเทอร์มินอล 22

4.2.2 รูปแบบของโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ และวิธีการประมวลผล 24

4.2.3 การดำเนินการกำหนดการเชิงพันธุกรรม 25

4.2.3.1 การสร้างประชากรผลเฉลยเริ่มต้น 25

4.2.3.2 การประเมินค่าความเหมาะของผลเฉลย 26

4.2.3.3 การสร้างประชากรผลเฉลยรุ่นใหม่ 26

4.2.3.4 การหาคำตอบ 27

4.3 การทดสอบความทนทานของคำตอบ 29

4.4 ผลการทดสอบความทนทานของคำตอบ 30

4.5 สรุปท้ายบท 31

5. การทดลองเพิ่มความทนทานให้กับคำตอบ 32

5.1 การปรับปรุงกระบวนการวิวัฒนาการ 32

5.2 การทดลองเพิ่มความทนทานตอนที่ 1 33

5.2.1 วิธีการทดลอง 33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.2 ผลการทดลอง 35
5.3 การทดลองเพิ่มความทนทานตอนที่ 2 36
5.3.1 วิธีการทดลอง 36
5.3.2 ผลการทดลอง 37
5.4 สรุปท้ายบท 39

6. การวิเคราะห์ความทนทานของคำตอบ 40
6.1 ความหมายของ Trace 40
6.2 วิธีวิเคราะห์ความทนทานของคำตอบ 42
6.3 ผลการวิเคราะห์ความทนทานของคำตอบ 45
6.3.1 ผลการวิเคราะห์ความทนทานในการทดลองส่วนที่ 1 45
6.3.2 ผลการวิเคราะห์ความทนทานในการทดลองส่วนที่ 2 47
6.3.3 ผลการวิเคราะห์ความทนทานในการทดลองส่วนที่ 3 48
6.3.4 ผลการวิเคราะห์ความทนทานในการทดลองทั้งหมด 50
6.4 สรุปผลการวิเคราะห์ความทนทาน 51

7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 52
7.1 สรุปผลการวิจัย 52
7.2 ข้อเสนอแนะ 53

รายการอ้างอิง 54
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก บัญชีคำศัพท์ 56
ภาคผนวก ข ตัวอย่างคำตอบที่ได้จากการทดลอง 57
ประวัติผู้เขียน 95

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 แสดงรายละเอียดต่างๆของวิธีการกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในการทดลอง 27

4.2 แสดงค่าความทนทานของคำตอบ (%) ในสภาพแวดล้อมต่างๆ กัน 30

5.1 แสดงค่าความทนทานของคำตอบ (%) ในการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อมกลุ่มต่างๆ 34

5.2 แสดงค่าความทนทานของคำตอบ (%) ในการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อม 50 สภาพแวดล้อม ที่มีค่าเปอร์เซนต์ของสิ่งกีดขวางที่ถูกขยับตำแหน่งไป (d_{Train}) เป็น 10% และ 50% 37

5.3 แสดงค่าความทนทานของคำตอบ (%) ในการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อม 10 สภาพแวดล้อม ที่มีค่าเปอร์เซนต์ของสิ่งกีดขวางที่ถูกขยับตำแหน่งไป (d_{Train}) เป็น 10% 30% และ 50% 38

6.1 แสดงผลการวิเคราะห์ความทนทาน ในการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อมกลุ่มต่างๆ 45

6.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความทนทาน ในการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อม 50 สภาพแวดล้อม ที่มีค่าเปอร์เซนต์ของสิ่งกีดขวางที่ถูกขยับตำแหน่งไป (d_{Train}) เป็น 10% และ 50% 47

6.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความทนทาน ในการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อม 10 สภาพแวดล้อม ที่มีค่าเปอร์เซนต์ของสิ่งกีดขวางที่ถูกขยับตำแหน่งไป (d_{Train}) เป็น 10% 30% และ 50% 48

ก.1 แสดงคำศัพท์ทางกำหนดการเชิงพันธุกรรมภาษาอังกฤษ และภาษาไทยที่อ้างถึงในวิทยานิพนธ์ 57

ข.1 แสดง Trace ที่เกิดขึ้นเมื่อประมวลผลคำตอบจากการทดลองที่ 1 60

ข.2 แสดง Trace ที่เกิดขึ้นเมื่อประมวลผลคำตอบจากการทดลองที่ 2 62

ข.3 แสดง Trace ที่เกิดขึ้นเมื่อประมวลผลคำตอบจากการทดลองที่ 3 65

ข.4 แสดง Trace ที่เกิดขึ้นเมื่อประมวลผลคำตอบจากการทดลองที่ 4 69

ข.5 แสดง Trace ที่เกิดขึ้นเมื่อประมวลผลคำตอบจากการทดลองที่ 5 71

ข.6 แสดง Trace ที่เกิดขึ้นเมื่อประมวลผลคำตอบจากการทดลองที่ 6 73

ข.7 แสดง Trace ที่เกิดขึ้นเมื่อประมวลผลคำตอบจากการทดลองที่ 7 76

ข.8 แสดง Trace ที่เกิดขึ้นเมื่อประมวลผลคำตอบจากการทดลองที่ 8 82

ข.9 แสดง Trace ที่เกิดขึ้นเมื่อประมวลผลคำตอบจากการทดลองที่ 9 88

ข.10 แสดง Trace ที่เกิดขึ้นเมื่อประมวลผลคำตอบจากการทดลองที่ 10 93

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	Pseudo Code แสดงกระบวนการวิวัฒนาการในการหาคำตอบของวิธีกำหนดการเชิงพันธุกรรม	7
2.2	ต้นไม้ที่แทนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (* (+ x y) z) ซ้าย และ (+ (* x y) (/ y x)) ขวา	9
2.3	โปรแกรม 2 ตัวที่ถูกคัดเลือกมาผสมพันธุ์กันโดยใช้ตัวดำเนินการไขว้เปลี่ยน	11
2.4	โปรแกรม 2 ตัวที่เกิดขึ้นหลังจากการไขว้เปลี่ยน	11
2.5	โปรแกรมที่ถูกคัดเลือกมาทำการกลาย (ซ้าย) และ โปรแกรมใหม่ที่เกิดหลังจากการกลาย (ขวา)	12
3.1	แสดงเส้นทางเดินของหุ่นยนต์หลบสิ่งกีดขวาง ในการทดลองของ Reynolds (1993)	15
3.2	แสดงสภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลองของ จุมพล พลวิชัย (2538)	16
3.3	แสดงหุ่นยนต์เดินในสภาพแวดล้อมที่แคบ และคดเคี้ยวได้โดยไม่มีการชนในงานของ Reynolds (1994)	16
3.4	แสดงสภาพแวดล้อมของปัญหาหุ่นยนต์หยิบกล่อง ในการทดลองของ Ito, Iba และ Kimura (1996)	17
3.5	แสดงหุ่นยนต์เดินหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ในการทดลองของ Browne (1996)	18
3.6	แสดงสภาพแวดล้อมของปัญหาหุ่นยนต์เดินหลบหลีกสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมาย ในการทดลองของ ธีระ โตสุโขวงศ์ และทัศสิน บัวชื่น (2540)	19
4.1	แสดงสภาพแวดล้อมของปัญหาหุ่นยนต์เดินหลบหลีกสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมาย ที่ใช้ในการทดลองนี้	21
4.2	แสดงลักษณะของหุ่นยนต์ในสภาพจำลองที่ใช้ในการทดลองนี้	21
4.3	แสดงต้นไม้ซึ่งแทนโปรแกรมที่ประกอบด้วยฟังก์ชัน IF-AND	23
4.4	แสดงต้นไม้ซึ่งแทนโปรแกรมที่ประกอบด้วยฟังก์ชัน IF-OR	23
4.5	แสดงต้นไม้ซึ่งแทนโปรแกรมที่ประกอบด้วยฟังก์ชัน IF-NOT	23
4.6	แสดงต้นไม้ซึ่งแทนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (IF-AND forward (IF-NOT smellLeft turnRight smellRight) turnLeft (IF-OR forward turnLeft forward turnRight))	25
4.7	แสดงทิศทางการเปลี่ยนตำแหน่งของสิ่งกีดขวางชิ้นหนึ่งๆ ที่เป็นไปได้	29
4.8	กราฟแสดงความทนทานของคำตอบ (%) ก่อนการปรับปรุงกระบวนการวิวัฒนาการ	31
5.1	กราฟแสดงความทนทานของคำตอบ (%) ในการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อมกลุ่มต่างๆ	35
5.2	กราฟแสดงความทนทานของคำตอบ (%) ในการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อม 50 สภาพแวดล้อม ที่มีค่าเปอร์เซนต์ของสิ่งกีดขวางที่ถูกขยับตำแหน่งไป (d_{Train}) เป็น 10% และ 50%	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.3 กราฟแสดงความทนทานของคำตอบ (%) ในการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อม 10 สภาพแวดล้อม ที่มีค่าเปอร์เซนต์ของสิ่งกีดขวางที่ถูกขยับตำแหน่งไป (d_{Train}) เป็น 10% 30% และ 50% 39

6.1 แสดงต้นไม้ซึ่งแทนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (IF-AND smellLeft forward turnLeft (IF-NOT smellRight forward turnRight)) 41

6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซต L และเซต Y 42

6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซต L และเซต A_i ใดๆ 42

6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความทนทานของคำตอบ กับ S_{All} ที่ค่า d_{Test} ต่างๆในการทดลองส่วนที่ 1 46

6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ S_{All} กับขนาดของประสบการณ์ | L | ที่ค่า d_{Test} ต่างๆในการทดลองส่วนที่ 1 46

6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความทนทานของคำตอบ กับ S_{All} ที่ค่า d_{Test} ต่างๆในการทดลองส่วนที่ 2 47

6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ S_{All} กับขนาดของประสบการณ์ | L | ที่ค่า d_{Test} ต่างๆในการทดลองส่วนที่ 2 48

6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความทนทานของคำตอบ กับ S_{All} ที่ค่า d_{Test} ต่างๆในการทดลองส่วนที่ 3 49

6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ S_{All} กับขนาดของประสบการณ์ | L | ที่ค่า d_{Test} ต่างๆในการทดลองส่วนที่ 3 49

6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความทนทานของคำตอบ กับ S_{All} ที่ค่า d_{Test} ต่างๆในการทดลองทั้งหมด 50

6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ S_{All} กับขนาดของประสบการณ์ | L | ที่ค่า d_{Test} ต่างๆในการทดลองทั้งหมด 50

ข.1 ตัวอย่างคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 1 59

ข.2 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งควบคุมโดยคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 1 59

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
ข.3	ตัวอย่างคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 2	61
ข.4	แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งควบคุมโดยคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 2	62
ข.5	ตัวอย่างคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 3	64
ข.6	แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งควบคุมโดยคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 3	65
ข.7	ตัวอย่างคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 4	68
ข.8	แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งควบคุมโดยคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 4	68
ข.9	ตัวอย่างคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 5	70
ข.10	แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งควบคุมโดยคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 5	71
ข.11	ตัวอย่างคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 6	72
ข.12	แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งควบคุมโดยคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 6	73
ข.13	ตัวอย่างคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 7	75
ข.14	แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งควบคุมโดยคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 7	75
ข.15	ตัวอย่างคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 8	81
ข.16	แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งควบคุมโดยคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 8	81
ข.17	ตัวอย่างคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 9	87
ข.18	แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งควบคุมโดยคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 9	88
ข.19	ตัวอย่างคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 10	92
ข.20	แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งควบคุมโดยคำตอบที่ได้จากการทดลองที่ 10	92