ผลกระทบของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของกำหนดการเชิงพันธุกรรม

นางสาว ขนิษฐา หุตะเมขลิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-798-9

IMPACT OF THE INITIAL TREE SIZE ON COMPUTATIONAL EFFORT IN GENETIC PROGRAMMING

Miss Kanitta Hutamekalin

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Computer Science
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 1999
ISBN 974-333-798-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของกำหนดการเชิงพันธุกรรม
โดย	นางสาว ขนิษฐา หุตะเมขลิน
ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร. สืบสกุล พิภพมงคล)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. บุญเสริม กิจศิริกุล)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย ประสิทธิ์จูตระกูล)

ขนิษฐา หุตะเมขลิน : ผลกระทบของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของกำหนดการเชิงพันธุกรรม (IMPACT OF THE INITIAL TREE SIZE ON COMPUTATIONAL EFFORT IN GENETIC PROGRAMMING) อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา; 114 หน้า ISBN 974-333-798-9

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาผลกระทบของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของกำหนดการเชิงพันธุกรรมโดยใช้ปัญหาแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายเป็นกรณีศึกษา ดำเนินการวิจัยด้วยกระบวนการทางสถิติในการวางแผนการทดลองและทดสอบสมมติฐาน โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่ม(randomized complete block design) ซึ่งประกอบด้วยระดับของปัจจัยคือขนาดของต้นไม้เริ่มต้น , แบ่งกลุ่มตามชุดของพารามิเตอร์ของกำหนดการเชิงพันธุกรรม และหน่วยทดลองคือกำหนดการเชิงพันธุกรรมสำหรับสร้างโปรแกรมแขนหุ่นยนต์ ค่าที่วัดจากหน่วยทดลองคือค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ กำหนดจำนวนขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 37 ระดับ จำนวนชุดของพารามิเตอร์ไว้ 105 ชุด จึงต้องทำการทดลอง 3,885 การทดลองภายใต้ 1 สภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์ และจะต้องทำการทดลองทั้งสิ้น 11,655 การทดลองจึงครบ 3 สภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์ การทดลองแต่ละการทดลองดำเนินการโดยใส่ชุดพารามิเตอร์ 1 ชุด ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 1 ระดับ และกำหนดสภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์ให้กับกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์แล้วรันโปรแกรม เมื่อจบการรันโปรแกรมเก็บข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนกำหนดระดับนัยสำคัญของการทดสอบสมมติฐานเท่ากับ 0.05 ผลการทดสอบสมมติฐานพบว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีผลกระทบต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ และใช้วิธีการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรแบบจับคู่กำหนดระดับนัยสำคัญรวมเท่ากับ 0.05 ผลการทดสอบพบว่าเมื่อขนาดของต้นไม้เริ่มต้นใหญ่ขึ้นจะทำให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณมีการกระจายของข้อมูลไม่เท่ากันในแต่ละระดับของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น การที่ค่าความแปรปรวนของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณไม่เท่ากันนี้ อาจเป็นเพราะอิทธิพลของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเป็นไปอย่างไม่คงเส้นคงวา

ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	ลายมือชื่อนิสิต..................................
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ประภาส จงสถิตย์วัฒนา
ปีการศึกษา	2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..................

KANITTA HUTAMEKALIN : IMPACT OF THE INITIAL TREE SIZE ON COMPUTATIONAL EFFORT IN GENETIC PROGRAMMING. THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. PRABHAS CHONGSTITVATANA. 114 pp. ISBN 974-333-798-9

This thesis studies the impact of the initial tree size on computational effort in genetic programming using the robotic arm moving to target as the study case. The research is performed with the statistical procedure both the experimental design and the hypothesis testing, using the randomized complete block design. The experiment consists of the treatments which are the initial tree sizes. The blocking are the set of parameters that are the parameters of the genetic programming. The experimental unit is the genetic programming for generating the robotic arm program. The measurement of the experimental unit is the computational effort. The number of the initial tree size is 37 levels. The number of the set of parameter is 105. There are 3,885 experiments under one robotic arm environment. Hence, there are totally 11,655 experiments for three robotic arm environments. Each experiment is performed with one set of parameter, one initial tree size and one robotic arm environment for the genetic programming. After the execution of each experiment, the computational effort data is collected. The data is analyzed using the analysis of variance with the level of significance 0.05. The result of the hypothesis testing indicates that the initial tree size effects the computational effort. Using a pair comparison under the level of significance 0.05, the result indicates that the larger initial tree size decreases the computational effort. In addition, the characteristic of the computational effort data has nonuniform distribution for each initial tree size. This is probably because the effect of the initial tree size on the computational effort is nonuniform.

ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	ลายมือชื่อนิสิต........................
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา P. Chongstitvatana
ปีการศึกษา	2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม........................

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่พยายามเข้าใจลักษณะนิสัยของลูกศิษย์ จึงสามารถให้คำปรึกษาที่มีอานุภาพน้อมนำใจให้ทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสิ้นได้

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพบูลย์ รัตนประเสริฐ และ รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทิพย์โยธาที่ท่านได้กรุณาสละเวลามาให้คำแนะนำทางด้านสถิติแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณ แม่แมว สำหรับแรงใจ

ขอขอบคุณ พี่อุ่น และแม่เสาวนีย์ สำหรับอาหารอร่อยมีคุณค่าทางโภชนาการ

ขอบใจ น้องยอด คู่คิด คู่แข่งแย่งชิงคะแนนนิยมจากอาจารย์ที่ปรึกษา

ท้ายนี้ ต้องขอขอบคุณทุกท่านซึ่งไม่ได้เอ่ยชื่อที่ข้าพเจ้าเคยรบกวน ขอร้อง หรือบังคับให้ช่วยเหลือในกิจการที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ทั้งมวล

ขนิษฐา หุตะเมขลิน

สารบัญ

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญตาราง

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

สารบัญภาพ

สารบัญกราฟ

สารบัญกราฟ(ต่อ)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

กำหนดการเชิงพันธุกรรม (Genetic Programming หรือ GP) เป็นกระบวนการค้นหาโปรแกรมคำตอบจากโปรแกรมที่เป็นไปได้ทั้งหมด ขั้นตอนในการค้นหาคำตอบที่กินเวลามากที่สุดคือขั้นตอนการหาค่าความเหมาะ (**fitness value**) ของแต่ละโปรแกรม เวลาที่ใช้ไปในขั้นตอนนี้จึงแสดงถึงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของกำหนดการเชิงพันธุกรรม หากพบคำตอบได้เร็วก็จะใช้เวลาในขั้นตอนนี้น้อย อย่างไรก็ตามไม่สามารถใช้เวลาในขั้นตอนการหาค่าความเหมาะของโปรแกรมสำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการได้ เนื่องจากแต่ละปัญหาใช้ฟังก์ชันความเหมาะ (**fitness function**) ไม่เหมือนกันจึงใช้เวลาในการวัดค่าความเหมาะต่อหนึ่งผลเฉลยไม่เท่ากัน การวัดว่ากระบวนการใช้เวลาในการตรวจสอบประสิทธิภาพของผลเฉลยไปเท่าไรจนกระทั่งพบคำตอบจึงใช้การนับจำนวนผลเฉลยที่กระบวนการต้องตรวจสอบประสิทธิภาพจนกระทั่งพบผลเฉลยที่เป็นคำตอบแทน Koza (1994) ใช้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ (computational effort) ในการแสดงการคำนวณที่ต้องใช้ในขั้นตอนดังกล่าว เนื่องจากไม่สามารถยกเลิกขั้นตอนนี้ได้ การปรับปรุงกระบวนการให้มีค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณลดลงจึงมุ่งไปที่การปรับปรุงคุณภาพของโปรแกรมที่เป็นไปได้ที่จะเป็นคำตอบของปัญหาให้มีความหลากหลาย เช่น การเพิ่มจำนวนโปรแกรม การทำให้โครงสร้างภายในแต่ละโปรแกรมแตกต่างกันโดยทำให้โปรแกรมมีโครงสร้างคล้ายกับลักษณะการเขียนโปรแกรมโดยมนุษย์

ชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ (2540) ได้ทำการวิจัยในหัวข้อการลดทอนความเพียรพยายามเชิงคำนวณของวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางในการลดทอนความเพียรพยายามเชิงคำนวณของวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรม ปัญหาที่ใช้ในการทดลองคือปัญหาแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังวัตถุเป้าหมาย ทำการวิจัยโดยเพิ่มฟังก์ชันซึ่งถูกนิยามโดยอัตโนมัติ (Automatically Defined Functions , ADF หรือ เอดีเอฟ) ซึ่งทำให้โครงสร้างของแต่ละโปรแกรมหุ่นยนต์ประกอบไปด้วยฟังก์ชันหลักและฟังก์ชันย่อย เลียนแบบการเขียนโปรแกรมเชิงโครงสร้าง

(structural programming) ของมนุษย์ การที่วิธีการดังกล่าวสามารถลดทอนความเพียรพยายามเชิงคำนวณได้อาจเป็นผลมาจากผลการทดลองที่พบว่าขนาดของโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นมีผลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณมากโดยไม่ต้องปรับปรุงโครงสร้างโปรแกรม ซึ่งชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ (2540: 44) ได้ให้ข้อสังเกตไว้ว่า *"จากผลการทดลองการหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นและค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ พบว่าขนาดของประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นมีผลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณมาก ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายได้ว่าเป็นเพราะเหตุใด จึงควรมีการศึกษาในจุดนี้ต่อไป"*

ในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาถึงผลกระทบของขนาดของโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ ในแง่ที่ว่าผลกระทบเป็นไปในลักษณะใด และเมื่อปัญหาแขนหุ่นยนต์มีลักษณะเปลี่ยนไปเช่นสภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์เปลี่ยนไปผลกระทบนี้จะยังคงมีอยู่หรือไม่ รวมทั้งเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของกำหนดการเชิงพันธุกรรมไปเป็นแบบต่างๆ ขนาดของโปรแกรมหุ่นยนต์จะยังมีผลกระทบต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณอีกหรือไม่

หากขนาดของโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นที่เปลี่ยนไปทำให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณลดลงได้ ก็จะเป็นการศึกษาที่ช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกำหนดการเชิงพันธุกรรมอีกทางหนึ่งด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดของโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของกำหนดการเชิงพันธุกรรม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์และข้อมูลของงานวิจัยการลดทอนความเพียรพยายามเชิงคำนวณของวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรม (ชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์, 2540) เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเริ่มทำงานวิจัย โดยรายละเอียดของปัญหาที่ใช้เป็นกรณีศึกษาของงานวิจัยดังกล่าวจะนำไปกล่าวไว้ในหัวข้อ 1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ไม่ทำการทดลองกับแขนหุ่นยนต์จริง

3. ไม่ใช้ฟังก์ชันที่ถูกนิยามโดยอัตโนมัติและวิธีเอดีเอฟเอกซ์ร่วมกับวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรม

1.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กำหนดการเชิงพันธุกรรม

กำหนดการเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้สำหรับการเรียนรู้ได้รับการพัฒนามาจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) ซึ่งคิดค้นโดย Holland (1975) ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นขบวนการค้นหาคำตอบโดยจำลองแบบตามกฎการคัดเลือกโดยธรรมชาติซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างไปจากเทคนิคอื่นทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) เนื่องจากการแก้ปัญหาโดยเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ส่วนใหญ่นั้นจะเริ่มจากการสร้างความรู้ (knowledge) แล้วจึงค้นหาคำตอบโดยอ้างอิงกับความรู้นั้น ๆ และผลลัพธ์ที่ได้มักจะเป็นคำตอบเดียว ส่วนการแก้ปัญหาโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะเริ่มจากการสร้างกลุ่มของผลเฉลยที่เป็นไปได้ และผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้มักเป็นลักษณะกลุ่มของผลเฉลย ข้อแตกต่างระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและกำหนดการเชิงพันธุกรรมคือลักษณะการแทนคำตอบโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะแทนลักษณะคำตอบในรูปสายอักขระ (string) ที่มีขนาดคงที่ แต่กำหนดการเชิงพันธุกรรมจะแทนลักษณะคำตอบในรูปโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถแทนด้วยโครงสร้างแบบต้นไม้

กระบวนการในการค้นหาคำตอบโดยกำหนดการเชิงพันธุกรรม อาจแบ่งออกเป็นขั้นตอนคือ

1. การสร้างประชากรของผลเฉลยเริ่มต้น
2. การตรวจสอบประสิทธิภาพของผลเฉลย
3. การสร้างประชากรของผลเฉลยรุ่นใหม่
4. การหาผลลัพธ์

1. การสร้างประชากรของผลเฉลยเริ่มต้น

เป็นขั้นตอนเริ่มต้นของกำหนดการเชิงพันธุกรรมโดยทำการสุ่มเลือกส่วนประกอบเพื่อสร้างผลเฉลยแต่ละผลเฉลยจนกระทั่งได้จำนวนประชากรของผลเฉลยครบตามที่

กำหนดไว้ ส่วนประกอบของผลเฉลยที่กล่าวถึงแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เทอมินอล (terminal) และ ฟังก์ชัน (function)

เทอมินอล โดยปกติจะเป็นเซตของปัจจัยที่เป็นอิสระแก่กันสำหรับปัญหานั้นๆ โดยเป็นได้ทั้งตัวแปร เช่น ตัวแปรภาวะของระบบ (state variables) ค่าคงที่หรือคำสั่งที่มีผลกระทบโดยตรงกับปัญหานั้น เช่น ปัญหาการหาทางออกจากเขาวงกต เทอมินอลคือคำสั่งในการ เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา และตรงไปเป็นต้น เทอมินอลอาจหมายถึงฟังก์ชันที่ไม่มีอาร์กิวเมนต์ (argument) ก็ได้

ฟังก์ชัน ฟังก์ชันที่ใช้ในผลเฉลยอาจเป็นฟังก์ชันปฏิบัติการพื้นฐาน (เช่น การบวก, การลบ) ฟังก์ชันมาตรฐานทางคณิตศาสตร์ (เช่น sin, log) ฟังก์ชันมาตรฐานในการโปรแกรม (เช่น if-then-else) หรือฟังก์ชันทางตรรก (เช่น and, or) เป็นต้น

ขั้นตอนนี้อาจเปรียบเทียบได้กับการก่อกำเนิดสิ่งมีชีวิตในทางพันธุศาสตร์ ผลเฉลยแต่ละผลเฉลยเปรียบเสมือนโครโมโซม (chromosome) โดยฟังก์ชันและเทอมินอลเปรียบเสมือนยีน (gene) บนโครโมโซมนั้นๆ สำหรับกำหนดการเชิงพันธุกรรมคำว่า ผลเฉลย (solution), โปรแกรมหรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (computer program) และโครโมโซม (chromosome) จะมีความหมายเดียวกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ซึ่งใช้ปัญหาแขนหุ่นยนต์เป็นกรณีศึกษาจะกล่าวถึงโปรแกรมหุ่นยนต์, ผลเฉลย และต้นไม้ (เนื่องจากแทนโปรแกรมหุ่นยนต์ด้วยโครงสร้างแบบต้นไม้) ในความหมายเดียวกัน

search space ของกำหนดการเชิงพันธุกรรมมีขนาดเท่ากับจำนวนโปรแกรมที่เป็นไปได้ทั้งหมดซึ่งถูกสร้างขึ้นจากสมาชิกของเซตฟังก์ชันและเซตเทอมินอล ประชากรโปรแกรมเริ่มต้นจึงเป็นเพียงส่วนหนึ่งของ search space เท่านั้น ซึ่งประกอบไปด้วยโปรแกรมที่มีรูปแบบหลากหลายอันเป็นประโยชน์ต่อการค้นหาคำตอบ และการสร้างประชากรต้นไม้ด้วยการสุ่มทำให้แต่ละต้นไม้มีรูปแบบและโครงสร้างต่างๆ กันด้วยโอกาสที่เท่ากัน

2. การตรวจสอบประสิทธิภาพของผลเฉลย

ในขั้นตอนนี้จะนำผลเฉลยแต่ละผลเฉลยมาตรวจวัดโดยคำนวณค่าความเหมาะ (fitness value) ด้วยฟังก์ชันความเหมาะ(fitness function) ในกรณีที่ค่าความเหมาะสูง

แสดงถึงประสิทธิภาพดี ซึ่งกลุ่มของผลเฉลยที่มีค่าความเหมาะสูงจะมีโอกาสถูกนำไปสร้างประชากรของผลเฉลยในรุ่นใหม่ต่อไปมากกว่ากลุ่มที่ค่าความเหมาะต่ำ การนิยามฟังก์ชันความเหมาะจะต้องแสดงให้เห็นถึงความมีประสิทธิภาพของผลเฉลยที่จะแก้ไขปัญหาของโจทย์ที่กำหนด เช่น ปัญหาหุ่นยนต์เดินไปยังเป้าหมาย ฟังก์ชันความเหมาะอาจเป็นการวัดระยะห่างของหุ่นยนต์กับเป้าหมายเมื่อหุ่นยนต์สิ้นสุดการเดินตามผลเฉลยนั้น ฟังก์ชันความเหมาะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกำหนดการเชิงพันธุกรรมเพราะค่าความเหมาะจะนำไปใช้ควบคุมการปฏิบัติการทางพันธุกรรมซึ่งจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลเฉลยและทำให้เกิดการวิวัฒนาการของประชากรจนกระทั่งได้ผลเฉลยที่เป็นคำตอบในที่สุด

3. การสร้างประชากรผลเฉลยรุ่นใหม่

ในขั้นตอนนี้ประชากรของผลเฉลยรุ่นใหม่จะถูกสร้างโดยใช้ปฏิบัติการทางพันธุกรรมคือ การสืบพันธุ์ (reproduction), การไขว้เปลี่ยน (crossover) และการกลาย (mutation)

<u>การสืบพันธุ์</u> เป็นการสำเนากลุ่มของผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดของรุ่นเดิมมาเป็นประชากรของผลเฉลยรุ่นใหม่

<u>การไขว้เปลี่ยน</u> เป็นปฏิบัติการทางพันธุกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งของกำหนดการเชิงพันธุกรรม ซึ่งทำการสุ่มเลือกผลเฉลย 2 ผลเฉลยเปรียบเสมือนพ่อและแม่ (parents) โดยการสุ่มเลือกผลเฉลยจะมีผลมาจากค่าความเหมาะของแต่ละผลเฉลยทำให้โอกาสที่จะถูกเลือกของแต่ละผลเฉลยไม่เท่ากัน จากนั้นสุ่มเลือกจุดที่จะทำการไขว้เปลี่ยน (crossover point) จากโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยพ่อและผลเฉลยแม่ ทำการไขว้เปลี่ยนโดยการแลกต้นไม้ย่อย (subtree) ระหว่างผลเฉลยพ่อกับผลเฉลยแม่ ต้นไม้ย่อยดังกล่าวคือส่วนของต้นไม้ที่อยู่นับตั้งแต่จุดที่จะทำการไขว้เปลี่ยนรวมถึงส่วนที่อยู่ต่ำกว่าจุดนี้ทั้งหมด หลังจากการแลกเปลี่ยนต้นไม้ย่อยระหว่าง 2 ผลเฉลยจะเกิดผลเฉลยใหม่ 2 ผลเฉลย (children หรือ offspring) เป็นประชากรในรุ่นใหม่

<u>การกลาย</u> เป็นการสุ่มเลือกผลเฉลยรุ่นเดิมครั้งละ 1 ผลเฉลย โดยการสุ่มเลือกผลเฉลยจะมีผลมาจากค่าความเหมาะของแต่ละผลเฉลยทำให้โอกาสที่จะถูกเลือกของแต่ละผลเฉลยไม่เท่ากัน แล้วสุ่มเลือกจุดที่จะทำการกลาย (mutation point) จากโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลย จุดที่สุ่มมาอาจเป็นโหนด (node) ที่เป็นฟังก์ชันหรือโหนดที่เป็นเทอมินอลก็

ได้ จากนั้นให้เอาต้นไม้ย่อยคือส่วนของต้นไม้ที่อยู่นับตั้งแต่จุดที่จะทำการกลายรวมถึงส่วนที่อยู่ต่ำกว่าจุดนี้ทั้งหมดออกจากโครงสร้างต้นไม้ของผลเฉลยแล้วใส่ต้นไม้ย่อยที่ถูกสร้างอย่างสุ่มไว้แทนที่

ประชากรผลเฉลยรุ่นใหม่ที่ได้ในขั้นตอนนี้ จะถูกดำเนินการซ้ำในขั้นตอนตรวจสอบประสิทธิภาพและขั้นตอนนี้ เกิดเป็นประชากรของผลเฉลยรุ่นใหม่สืบต่อกันไป

จากความคิดที่ว่าในสภาพแวดล้อมหนึ่งสิ่งมีชีวิตที่มีความสามารถในการดำรงชีวิตได้ดีกว่าจะอยู่รอดและมีอัตราการสืบพันธุ์สูงกว่าสิ่งมีชีวิตที่มีความสามารถในการดำรงชีวิตด้อยกว่า ดังนั้นสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะต่างกันแม้จะเป็นเผ่าพันธุ์เดียวกันก็ตามจึงมีอัตราการอยู่รอดและสืบพันธุ์ที่ไม่เท่ากัน ประชากรของผลเฉลยก็เป็นเช่นเดียวกัน ผลเฉลยที่มีค่าความเหมาะสูงจะถูกเลือกมาเพื่อการสืบพันธุ์ และผลเฉลยที่มีค่าความเหมาะสูงมีโอกาสถูกเลือกเพื่อการไขว้เปลี่ยนและการกลายสูงกว่าผลเฉลยที่มีค่าความเหมาะต่ำกว่า ดังนั้นผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพดีจึงมีโอกาสถูกสืบทอดและถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นจนกระทั่งพบคำตอบในที่สุด

อย่างไรก็ตามผลเฉลยที่มีค่าความเหมาะต่ำยังคงเป็นประโยชน์ในการวิวัฒนาการของประชากร เช่นเดียวกับสิ่งมีชีวิตที่จะปรากฏลักษณะเด่นบางอย่างออกมาเพื่อความอยู่รอดเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนไปหรือเพื่อปรับปรุงพันธุ์ให้ดีขึ้น ผลเฉลยที่มีค่าความเหมาะต่ำเมื่อถูกเลือกมาทำการไขว้เปลี่ยนหรือทำการกลายอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างทำให้ค่าความเหมาะของตัวมันเองหรือคู่ของมันเพิ่มขึ้น ผลเฉลยที่มีค่าความเหมาะต่ำจึงยังคงมีประโยชน์ในแง่ที่ทำให้เกิดความหลากหลายเช่นเดียวกับความหลากหลายทางพันธุกรรมในสิ่งมีชีวิต

4. การหาผลลัพธ์

ผลลัพธ์ของกำหนดการเชิงพันธุกรรมคือผลเฉลยหรือกลุ่มของผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพซึ่งยอมรับว่าเป็นคำตอบของปัญหา โดยประสิทธิภาพประเมินด้วยฟังก์ชันความเหมาะซึ่งปรากฏในขั้นตอนทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น

ในการแก้ปัญหาด้วยวิธีกำหนดการเชิงพันธุกรรมนอกจากการกำหนด เซต (set) ของฟังก์ชัน, เซตของเทอมินอล และฟังก์ชันความเหมาะแล้วยังต้องกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ควบคุมในการทำงาน และเงื่อนไขในการสิ้นสุดการทำงาน

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ควบคุมในการทำงาน ตัวแปรในกลุ่มนี้ได้แก่จำนวนของประชากรของผลเฉลย จำนวนประชากรมีผลต่อความเร็วในการค้นหาคำตอบ และการใช้ทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ จำนวนรุ่น (number of generation), อัตราการสืบพันธุ์, อัตราการไขว้เปลี่ยน และอัตราการกลายเป็นต้น

เงื่อนไขในการสิ้นสุดการทำงาน โดยปกติจะกำหนดให้การทำงานสิ้นสุดเมื่อครบจำนวนรุ่นที่กำหนด

ขั้นตอนของกำหนดการเชิงพันธุกรรมดังที่ได้กล่าวมาอาจทำให้พบคำตอบที่เป็น local optima ดังนั้นจึงทำกระบวนการกำหนดการเชิงพันธุกรรมซ้ำหลายๆ รอบและแต่ละรอบเป็นอิสระต่อกัน เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดจากคำตอบในแต่ละรอบของกระบวนการ และทำให้มั่นใจในประสิทธิภาพของคำตอบมากขึ้น จำนวนรอบของกระบวนการจึงเป็นพารามิเตอร์ของกำหนดการเชิงพันธุกรรมด้วย

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การลดทอนความเพียรพยายามเชิงคำนวณของวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรม

ชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ (2540) ได้ทำการวิจัยในหัวข้อการลดทอนความเพียรพยายามเชิงคำนวณของวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรม เป็นการศึกษาเพื่อเสนอแนวทางในการลดทอนความเพียรพยายามเชิงคำนวณของวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรมโดยใช้งานวิจัยเรื่องการเรียนรู้ของแขนหุ่นยนต์โดยใช้โปรแกรมพันธุการ (จุมพล พลวิชัย, 2539) เป็นกรณีศึกษา

ชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ (2540) ได้นิยามปัญหาแขนหุ่นยนต์และกำหนดรายละเอียดของกำหนดการเชิงพันธุกรรมสำหรับปัญหาแขนหุ่นยนต์ ซึ่งจะตัดทอนเฉพาะใจความสำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ไว้ดังต่อไปนี้

ปัญหาแขนหุ่นยนต์คือการหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนแขนหุ่นยนต์ไปยังเป้าหมายโดยต้องหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง ได้ทำการทดลองโดยจำลองแบบการทำงานของแขนหุ่นยนต์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และได้กำหนดพารามิเตอร์ของแขนหุ่นยนต์และพื้นที่ในการจำลองแบบไว้ดังนี้

1. แขนหุ่นยนต์แบ่งออกเป็น 3 ท่อน แต่ละท่อนมีความยาวต่างกันและยึดติดกันด้วยข้อต่อ 3 ข้อต่อได้แก่ ข้อต่อหัวไหล่ ข้อต่อศอก และข้อต่อมือ แต่ละข้อต่อมีระยะจำกัดการหมุนต่างกัน แขนหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ในระนาบ 2 มิติ

2. ขนาดของแขนหุ่นยนต์ แขนหุ่นยนต์แบ่งออกเป็น 3 ท่อน โดยความยาวของท่อนไหล่ ท่อนศอก และท่อนมือเท่ากับ 74 จุดภาพ 68 จุดภาพ และ 24 จุดภาพ ตามลำดับ ความกว้างของแต่ละท่อนเท่ากับ 15 จุดภาพ

3. ระยะจำกัดของการหมุนของข้อต่อแขนหุ่นยนต์ แขนหุ่นยนต์ประกอบด้วยข้อต่อจำนวน 3 ข้อต่อได้แก่ ข้อต่อหัวไหล่ ข้อต่อศอก และข้อต่อมือ โดยแต่ละข้อต่อมีระยะจำกัดของการหมุนเท่ากับ –90 ถึง 90 องศา -20 ถึง 160 องศา และ –90 ถึง 90 องศา ตามลำดับ โดยตำแหน่งของข้อต่อหัวไหล่อยู่ที่ตำแหน่ง (40,170)

4. ขั้นของการหมุนของข้อต่อแขนหุ่นยนต์ จำนวนขั้นของการหมุนของแต่ละข้อต่อมีจำนวน 37 ขั้นโดยแต่ละขั้นจะขยับข้อต่อขึ้นหรือลงขั้นละ 5 องศา

5. ขนาดของพื้นที่ พื้นที่มีความกว้าง 200 จุดภาพ และมีความยาว 250 จุดภาพ

รายละเอียดต่าง ๆ ของกำหนดการเชิงพันธุกรรมสำหรับปัญหาแขนหุ่นยนต์ได้แก่

1. โครงสร้างของโปรแกรมหุ่นยนต์ ลักษณะเป็นโครงสร้างต้นไม้โดยประกอบไปด้วยฟังก์ชันและเทอมินอล โดยในตารางที่ 1.1 แสดงฟังก์ชันที่กำหนดไว้สำหรับปัญหาแขนหุ่นยนต์ ตารางที่ 1.2 แสดงเทอมินอลที่ทำหน้าที่เป็นคำสั่งให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ และตารางที่ 1.3 แสดงเทอมินอลที่ใช้ตรวจสอบสถานะของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งค่าของเทอมินอลคือผลของการตรวจสอบสถานะ รูปที่ 1.1 เป็นตัวอย่างของโปรแกรมหุ่นยนต์

ฟังก์ชัน	จำนวนอาร์กิวเมนต์	ลำดับการประมวลผล
IF-AND	4 อาร์กิวเมนต์	ปฏิบัติตามอาร์กิวเมนต์ที่ 3 เมื่ออาร์กิวเมนต์ที่ 1 และ 2 เป็นจริง ไม่เช่นนั้นจะปฏิบัติตามอาร์กิวเมนต์ที่ 4
IF-OR	4 อาร์กิวเมนต์	ปฏิบัติตามอาร์กิวเมนต์ที่ 3 เมื่ออาร์กิวเมนต์ที่ 1 หรือ 2 เป็นจริง ไม่เช่นนั้นจะปฏิบัติตามอาร์กิวเมนต์ที่ 4
IF-NOT	3 อาร์กิวเมนต์	ปฏิบัติตามอาร์กิวเมนต์ที่ 2 เมื่ออาร์กิวเมนต์ที่ 1 เป็นเท็จ และปฏิบัติตามอาร์กิวเมนต์ที่ 3 เมื่ออาร์กิวเมนต์ที่ 1 เป็นจริง

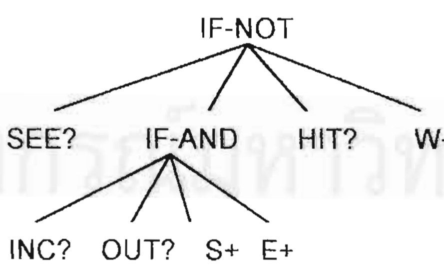
ตารางที่ 1.1 ฟังก์ชันของปัญหาแขนหุ่นยนต์

เทอมินอล	หน้าที่
s+	คำสั่งให้หมุนข้อต่อหัวไหล่ขึ้น 1 ขั้น
s-	คำสั่งให้หมุนข้อต่อหัวไหล่ลง 1 ขั้น
e+	คำสั่งให้หมุนข้อต่อศอกขึ้น 1 ขั้น
e-	คำสั่งให้หมุนข้อต่อศอกลง 1 ขั้น
w+	คำสั่งให้หมุนข้อต่อมือขึ้น 1 ขั้น
w-	คำสั่งให้หมุนข้อต่อมือลง 1 ขั้น

ตารางที่ 1.2 เทอมินอลที่ทำหน้าที่เป็นคำสั่ง

เทอมินอล	หน้าที่
HIT?	ตรวจสอบสภาพการชนกับสิ่งกีดขวาง ค่าเป็นจริง เมื่อส่วนใดส่วนหนึ่งของแขนหุ่นยนต์มีการชนกับสิ่งกีดขวาง ค่าเป็นเท็จเมื่อไม่พบการชนกับสิ่งกีดขวาง
SEE?	ตรวจสอบการมองเห็นเป้าหมาย ค่าเป็นจริงเมื่อแนวเส้นตรงจากปลายแขนหุ่นยนต์ไปยังเป้าหมายไม่ถูกสิ่งกีดขวางบัง ค่าเป็นเท็จเมื่อพบว่ามีสิ่งกีดขวางบังอยู่
INC?	ตรวจสอบระยะทางที่เพิ่มขึ้นระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์และเป้าหมาย ค่าเป็นจริงเมื่อพบว่าปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกห่างจากเป้าหมาย ค่าเป็นเท็จเมื่อพบว่าปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าใกล้เป้าหมายมากขึ้น
DEC?	ตรวจสอบระยะทางที่ลดลงระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์และเป้าหมาย ค่าเป็นจริงเมื่อพบว่าปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าใกล้เป้าหมายมากขึ้น ค่าเป็นเท็จเมื่อพบว่าปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกห่างจากเป้าหมาย
OUT?	ตรวจสอบการออกนอกพื้นที่ ค่าเป็นจริงเมื่อพบว่ามีส่วนใดส่วนหนึ่งของแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกนอกพื้นที่ ค่าเป็นเท็จเมื่อไม่พบการออกนอกพื้นที่

ตารางที่ 1.3 เทอมินอลที่ทำหน้าที่ในการตรวจสอบสถานะของแขนหุ่นยนต์



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์

2. การวัดประสิทธิภาพของโปรแกรมหุ่นยนต์ ประสิทธิภาพของโปรแกรมหุ่นยนต์แต่ละโปรแกรมวัดด้วยค่าความเหมาะซึ่งคำนวณได้จากสมการ

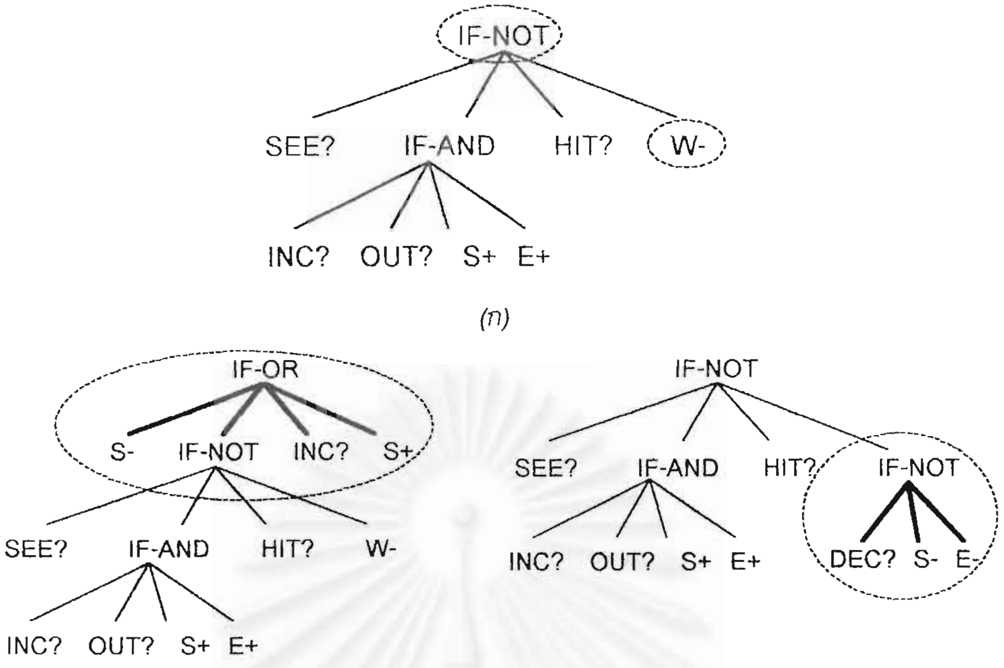
$$\begin{aligned} FitnessValue = & -2000 \times FinalDistance/InitialDistance \\ & -100 \times Sumdistance/InitialDistance \\ & -1000 \times notSee \\ & -4000 \times Die \end{aligned}$$

ตัวแปร	ความหมายของตัวแปร
FitnessValue	ค่าความเหมาะ
InitialDistance	ระยะทางระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์และเป้าหมายก่อนการประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์
FinalDistance	ระยะทางระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์และเป้าหมายเมื่อประมวลผลตามโปรแกรมหุ่นยนต์จบแล้ว
SumDistance	ระยะทางรวมในการเคลื่อนแขนหุ่นยนต์จนจบการประมวลผลตามโปรแกรมหุ่นยนต์
NotSee	เมื่อประมวลผลตามโปรแกรมหุ่นยนต์จบแล้วพบว่าระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์และเป้าหมายมีสิ่งกีดขวางบังอยู่
Die	โปรแกรมหุ่นยนต์สิ้นสุดการทำงานในลักษณะตาย ซึ่งเกิดจากระหว่างการประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์พบว่ามีการชนระหว่างแขนหุ่นยนต์และสิ่งกีดขวางมากเกินกว่าที่กำหนด

ตารางที่ 1.4 ความหมายของตัวแปรในสมการที่ใช้คำนวณค่าความเหมาะ

ค่าความเหมาะของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่คำนวณค่าได้มากกว่า แสดงถึงความเหมาะสมของผลเฉลย โดยโปรแกรมหุ่นยนต์ที่จะมีค่าความเหมาะสูงคือโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนแขนหุ่นยนต์ได้เข้าใกล้เป้าหมาย มีระยะทางรวมในการเคลื่อนแขนหุ่นยนต์น้อย เมื่อสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์แล้วระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์กับเป้าหมายไม่พบสิ่งกีดขวาง และโปรแกรมหุ่นยนต์นั้นไม่สิ้นสุดการทำงานในลักษณะตาย

3. การปฏิบัติการเชิงพันธุกรรมที่ใช้สำหรับปัญหาแขนหุ่นยนต์นี้ได้แก่ การสืบพันธุ์ การไขว้เปลี่ยน การกลายแบบต่อยอด และการกลายแบบต่อปลาย ลักษณะการกลายทั้งสองแบบเกิดจากการสร้างต้นไม้ความสูง 1 เพื่อต่อยอดหรือต่อปลายในโครงสร้างต้นไม้ของโปรแกรมหุ่นยนต์ ตัวอย่างการกลายทั้ง 2 แบบแสดง ดังรูปที่ 1.2



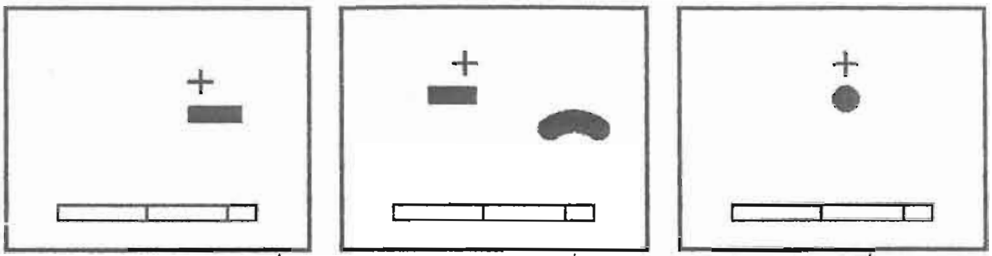
(ข) (ค)

รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างการกลายแบบต่อยอดและต่อปลาย
(ก) โปรแกรมหุ่นยนต์ก่อนเกิดการกลาย
(ข) โปรแกรมหุ่นยนต์ซึ่งเกิดการกลายแบบต่อยอด
(ค) โปรแกรมหุ่นยนต์ซึ่งเกิดการกลายแบบต่อปลาย

ในการเลือกโปรแกรมหุ่นยนต์เพื่อทำการ ไขว้เปลี่ยน การกลายแบบต่อยอด และการกลายแบบต่อปลายจะทำโดยการสุ่มเลือก ความน่าจะเป็นในการถูกเลือกของแต่ละโปรแกรมหุ่นยนต์จะขึ้นอยู่กับค่าความเหมาะของโปรแกรมหุ่นยนต์นั้น

4. สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 1.3 โดยเป้าหมายของสภาพแวดล้อมทั้ง 3 นี้แสดงด้วยเครื่องหมาย + สิ่งกีดขวางแสดงด้วยรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสีดำ วงกลม และแถบโค้ง ส่วนแขนหุ่นยนต์คือสี่เหลี่ยมต่อกัน 3 ท่อนซึ่งวางอยู่ด้านล่างของภาพ

ในการทดลองใช้สภาพแวดล้อม 3 แบบแต่ละแบบมีค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณแตกต่างกันซึ่งแสดงถึงความยากง่ายของสภาพแวดล้อมทั้งสาม จากการทดลองวัดค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของสภาพแวดล้อมทั้ง 3 แบบพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็นลำดับดังนี้สภาพแวดล้อมแบบที่ 1, สภาพแวดล้อมที่ 2 และสภาพแวดล้อมที่ 3



สภาพแวดล้อมที่ 1　　สภาพแวดล้อมที่ 2　　สภาพแวดล้อมที่ 3

รูปที่ 1.3 สภาพแวดล้อมทั้ง 3 ที่ใช้ในการทดลอง

2. งานวิจัย Where Does the Good Stuff Go, and Why? How contextual semantics influences program structure in simple genetic programming (Goldberg and O'Reilly, 1998)

งานวิจัยนี้มีประเด็นที่น่าสนใจคือ พบว่าต้นไม้ 1 ต้นประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ดี (expressed portions) และ ส่วนที่ไม่ดี (inhibited portions) ถ้าจำนวนโหนดที่ประกอบเป็นส่วนที่ไม่ดีมีมากกว่าจะทำให้โอกาสที่การไขว้เปลี่ยนจะทำลายโครงสร้างของส่วนที่ดีลดลง และถ่ายทอดส่วนที่ดีให้กับต้นไม้ลูกได้อย่างสมบูรณ์ มีผลให้ค่าความเหมาะเท่ากับหรือมากกว่าต้นไม้ที่เป็นพ่อแม่ เนื่องจากต้นไม้ลูกจะได้รับส่วนที่ดีจากต้นไม้พ่อแม่และเกิดส่วนที่ไม่ดีเปลี่ยนเป็นส่วนที่ดี

สรุปคือต้นไม้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นในรุ่นถัดไปโดยในต้นไม้แต่ละต้นจะมีการเพิ่มขึ้นของส่วนที่ไม่ดีมากกว่าและรวดเร็วกว่าส่วนที่ดี เมื่อต้นไม้มีขนาดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีความสูงใกล้เคียงกับความสูงของต้นไม้ที่กำหนดไว้ พบว่าส่วนที่ดีจะเป็นต้นไม้ย่อยที่สูง (stringy)

3. งานวิจัย Causality in Genetic Programming (Rosca and Ballard, 1995)

งานวิจัยนี้มีประเด็นที่น่าสนใจคือพบว่าเมื่อขนาดของต้นไม้ใหญ่ขึ้นจะมีส่วนของต้นไม้ที่ไม่มีประโยชน์ (คือไม่ถูกใช้งาน) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้การไขว้เปลี่ยนมีโอกาสเกิดภายในส่วนของต้นไม้ที่ไม่มีประโยชน์และโอกาสที่การไขว้เปลี่ยนจะทำลายส่วนของต้นไม้ที่มีประโยชน์ลดลง และส่วนของต้นไม้ที่ไม่มีประโยชน์ยังทำให้เกิดส่วนของต้นไม้ที่มี

ประโยชน์ได้ในภายหลังเนื่องมาจากการไขว้เปลี่ยนในแต่ละรุ่นสืบไป ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงทำให้ต้นไม้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในรุ่นต่อไป

4. งานวิจัย Generality versus Size in Genetic Programming (Rosca, 1996)

งานวิจัยนี้มีประเด็นที่น่าสนใจคือ การเพิ่มขึ้นของขนาดต้นไม้มีความเกี่ยวข้องกับโอกาสที่ต้นไม้ในรุ่นต่อไปจะมีค่าความเหมาะดีขึ้น ต้นไม้ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกเลือกเพื่อทำให้ค่าความเหมาะดีขึ้นในรุ่นถัดไป และขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีผลต่อการเกิดของส่วนที่เป็นคำตอบของต้นไม้

งานวิจัยในข้อ 2 , 3 และ 4 ที่กล่าวถึงข้างต้นได้วิเคราะห์ปัญหาที่มีลักษณะของโปรแกรมขึ้นอยู่กับตำแหน่งของฟังก์ชันและเทอมินอลได้แก่โปรแกรมที่ประกอบด้วยการทดสอบเงื่อนไข if-then-else ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับปัญหาแขนหุ่นยนต์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ แต่เป็นการศึกษา*ขนาดของต้นไม้ขณะวิวัฒนาการ*

1.6 สมมติฐานในการทำวิจัย

จากผลการวิจัยดังกล่าวจึงเกิดสมมติฐานว่าหากกำหนดขนาดของโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นให้มีขนาดต่างกันควรที่จะทำให้เกิดผลคือ โปรแกรมหุ่นยนต์ที่มีขนาดเริ่มต้นใหญ่กว่าจะมีส่วนของโปรแกรมที่มีประโยชน์มากกว่า จำนวนของโปรแกรมที่มีประโยชน์น่าจะก่อให้เกิดการวิวัฒนาการของโปรแกรมจนกระทั่งพบคำตอบได้ในจำนวนรุ่นที่ลดลงและหรือได้ในรอบการทดลองที่ลดลงซึ่งเป็นผลให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณลดลง

บทที่ 2

การดำเนินการวิจัย

การศึกษาเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณผู้วิจัยจะดำเนินการวิจัยโดยใช้วิธีการทางสถิติในการวางแผนการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูล และนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาสรุปว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีผลกระทบต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

2.1 การวางแผนการทดลอง

การวางแผนการทดลองคือ การกำหนดสภาวะที่ทำให้สามารถวัดความแตกต่างของตัวแปรอิสระที่มีต่อค่าของตัวแปรตาม โดยสภาวะที่กำหนดขึ้นควรจะปราศจากสิ่งรบกวนหรือมีสิ่งรบกวนน้อยที่สุด สิ่งรบกวนได้แก่ตัวแปรอื่น ๆ ที่ไม่สนใจศึกษาแต่มีผลกระทบต่อค่าของตัวแปรตามที่เรากำลังสนใจศึกษาอยู่ในขณะนั้น

จุดประสงค์ของการวางแผนการทดลองคือ เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลที่ต้องการสำหรับการวิเคราะห์ โดยข้อมูลนั้นสามารถตอบสมมุติฐานที่ตั้งไว้ได้ และเป็นข้อมูลที่ถูกต้อง

ขั้นตอนของการวางแผนการทดลองโดยสังเขปมีดังต่อไปนี้

2.1.1 กำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์ของการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการตอบปัญหาว่าเมื่อกำหนดให้ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีขนาดต่าง ๆ กันจะทำให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเปลี่ยนแปลงหรือไม่ ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเป็นพารามิเตอร์ของโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ นอกจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้นแล้วยังมีพารามิเตอร์อื่นที่จำเป็นในการรันโปรแกรมได้แก่ จำนวนประชากร, อัตราการสืบพันธุ์, อัตราการไขว้เปลี่ยน, อัตราการกลาย, สภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์, จำนวนรุ่นมากที่สุดในการทดลอง, จำนวนรอบของกระบวนการ และค่า

ความมั่นใจของความสำเร็จ พารามิเตอร์ทั้งหมดที่กล่าวมามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังนั้นการวางแผนการทดลองจึงจำเป็นต้องกำจัดอิทธิพลที่ไม่สนใจออกจากค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเพื่อให้ค่าที่ได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเพียงอย่างเดียว รูปที่ 2.1 แสดงรูปจำลองของปัญหาดังกล่าว

รูปที่ 2.1 แสดงรูปจำลองของปัญหาที่ต้องการวางแผนการทดลอง

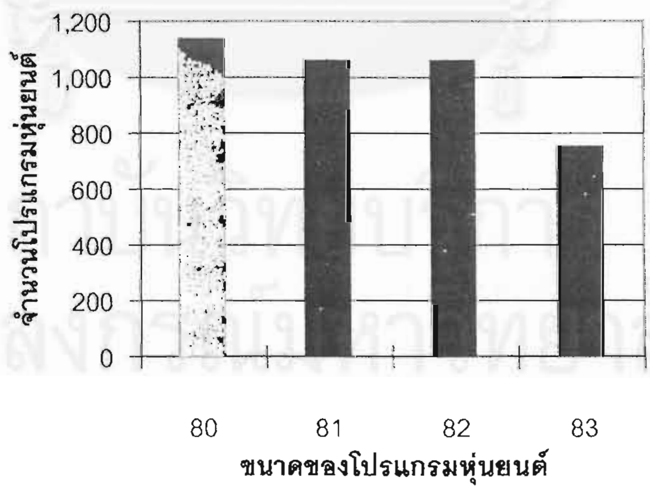
2.1.2 เลือกระดับของปัจจัยและกำหนดขอบเขตของปัจจัยที่ต้องการศึกษาผลกระทบ

ในการวางแผนการทดลองจะกำหนดสิ่งทดลองหรือปัจจัย (treatment) ให้กับหน่วยทดลอง (experimental unit) แล้ววัดค่าของตัวแปรตามจากหน่วยทดลอง ปัจจัยได้แก่ วิธีการ หรือกระบวนการ หรือ สิ่งต่างๆ ที่ต้องการเปรียบเทียบความแตกต่างซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แก่ระดับต่างๆ ของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น หน่วยทดลองหมายถึงคน หรือสัตว์ หรือสิ่งของที่ได้รับปัจจัยและถูกวัดผลของปัจจัย ซึ่งในที่นี้ได้แก่โปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ และตัวแปรตามที่วัดค่าได้จากหน่วยทดลองคือค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ

เกณฑ์ในการกำหนดขอบเขตของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นได้มาจากข้อมูลของงานวิจัยการลดทอนความเพียรพยายามเชิงคำนวณของวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรม(ชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์, 2540) โดยกำหนดขอบเขตตั้งแต่ 40 – 400 โหนด เนื่องจากเป็นจำนวนโหนดที่สามารถหาผลเฉลยที่เป็นคำตอบของปัญหาได้โดยใช้ทรัพยากรในการค้นหาคำตอบน้อย ความแตกต่างระหว่างแต่ละระดับของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเท่ากับ 10 โหนด เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ตัวสร้างประชากรเริ่มต้นที่ออกแบบโดย

ชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ ซึ่งมีขั้นตอนการสร้างประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ด้วยการเพิ่มขนาดโดยการต่อปลายด้วยต้นไม้ความสูง 1 เมื่อพิจารณาปัญหาแขนหุ่นยนต์พบว่ามีโครงสร้างที่ประกอบด้วยฟังก์ชัน 3 ฟังก์ชัน ได้แก่ฟังก์ชัน IF-AND, ฟังก์ชัน IF-OR และฟังก์ชัน IF-NOT โดย 2 ฟังก์ชันแรกประกอบด้วยอาร์กิวเมนต์ 4 อาร์กิวเมนต์ ส่วนฟังก์ชันสุดท้ายประกอบด้วยอาร์กิวเมนต์ 3 อาร์กิวเมนต์ ดังนั้นถ้าสร้างต้นไม้ความสูง 1 โดยใช้ฟังก์ชันแต่ละฟังก์ชันจะต้องใช้จำนวนโหนด 5 โหนด, 5 โหนด และ 4 โหนดตามลำดับ เพราะฉะนั้นขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ทำให้เกิดความแตกต่างทางโครงสร้างควรจะต่างกันระดับละ 5 โหนดเป็นต้นไป แต่ผู้วิจัยเลือกให้ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นต่างกันระดับละ 10 โหนดเพราะต้องการให้เกิดความแตกต่างในโครงสร้างมากเพียงพอจนสังเกตเห็นผลกระทบได้อย่างชัดเจน

การควบคุมขนาดของต้นไม้เริ่มต้นให้มีค่าตามที่กำหนดไว้ขณะสร้างประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์รุ่นแรกทำได้โดยใช้ตัวสร้างประชากรเริ่มต้นที่ออกแบบโดยชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ จากข้อมูลผลการทดลองของชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ (2540: 25) พบว่า *"รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สร้างโดยตัวสร้างประชากรเริ่มต้นใหม่ โดยทำการสร้างประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์จำนวน 4,000 โปรแกรม กำหนดขนาดของโปรแกรมหุ่นยนต์เท่ากับ 80 สัญลักษณ์ (โหนด) โดยไม่ใช้วิธีเอดีเอฟ ซึ่งพบว่าขนาดของโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นจะมีขนาดอยู่ระหว่าง 80 ถึง 83 สัญลักษณ์ (โหนด) และความสูงของโครงสร้างต้นไม้อยู่ระหว่าง 4 ถึง 12"*



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงจำนวนโปรแกรมหุ่นยนต์ในแต่ละขนาดของโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นที่สร้างโดยตัวสร้างประชากรเริ่มต้นใหม่เมื่อไม่ได้ใช้วิธีเอดีเอฟ (ชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ , 2540: 25)

2.1.3 การเลือกตัวแปรตาม และการควบคุมคุณภาพของตัวแปรตาม

ในงานวิจัยนี้เลือกค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเป็นตัวแปรตามที่ได้รับอิทธิพลจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้น จะกล่าวถึงรายละเอียดของนิยามและวิธีการวัดค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ และการควบคุมคุณภาพของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่วัดได้จากการทดลองดังต่อไปนี้

ตามหนังสือ Genetic Programming II ของ Koza (1994) สรุปความไว้ในวิทยานิพนธ์เรื่องการลดทอนความเพียรพยายามเชิงคำนวณของวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรมของ ชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ (2540: 10-13) ได้กล่าวถึงความเพียรพยายามเชิงคำนวณไว้ดังนี้

ผู้วิจัยขอเปลี่ยนแปลงคำศัพท์บางคำเพื่อไม่เกิดความสับสนกับงานวิจัยนี้ได้แก่คำว่า "การทดลอง" ซึ่งหมายถึงการทำกระบวนการกำหนดการเชิงพันธุกรรมครบหนึ่งรอบ ตั้งแต่การสร้างประชากรของผลเฉลยเริ่มต้น การตรวจสอบประสิทธิภาพของผลเฉลย การสร้างประชากรของผลเฉลยรุ่นใหม่ การหาผลลัพธ์ จนกระทั่งครบตามจำนวนรุ่นที่กำหนดไว้ เปลี่ยนคำว่า "การทดลอง"เป็น "กระบวนการ" หรือ "กระบวนการกำหนดการเชิงพันธุกรรม"

เนื่องจากกระบวนการของกำหนดการเชิงพันธุกรรมเป็นกระบวนการที่ใช้การสุ่มซึ่งทำให้ในแต่ละครั้งของกระบวนการได้ผลลัพธ์ที่ไม่เหมือนกัน การวัดประสิทธิภาพของวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรมจึงต้องใช้การคำนวณทางสถิติโดยใช้ข้อมูลจากผลของการทำกระบวนการกำหนดการเชิงพันธุกรรมซ้ำหลาย ๆครั้ง โดยในที่นี้จะใช้คำว่า *รอบของกระบวนการ* แทนการทำกระบวนการกำหนดการเชิงพันธุกรรมซ้ำในแต่ละครั้ง

ตามหนังสือ Genetic Programming II ของ Koza (1994) ได้กล่าวถึงความเพียรพยายามเชิงคำนวณซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการวัดประสิทธิภาพของวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรมโดยใช้การคำนวณทางสถิติเพื่อคำนวณหาจำนวนผลเฉลยอย่างน้อยที่ต้องประมวลผลจนพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จ (หมายถึงผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพซึ่งยอมรับว่าเป็นคำตอบของปัญหา) ภายใต้ความมั่นใจที่กำหนดดังสรุปได้ดังนี้

ในการดำเนินกระบวนการของกำหนดการเชิงพันธุกรรมซึ่งมีจำนวนประชากรของผลเฉลยในแต่ละรุ่นคงที่เท่ากับ M และมีจำนวนรุ่นเท่ากับ G หากสามารถพบผลเฉลยที่

ประสบความสำเร็จในรุ่น (generation) เดียวกันทุกรอบของกระบวนการ จำนวนผลเฉลยอย่างน้อยที่ต้องประมวลผลจนพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จจะมีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนประชากร M กับจำนวนรุ่นที่ใช้ในการหาผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จ หากไม่พบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จในรุ่นเดียวกันในแต่ละรอบของกระบวนการ แต่สามารถพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จภายใน G รุ่นทุกรอบของกระบวนการ จำนวนผลเฉลยอย่างน้อยที่ต้องประมวลผลจนพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จจะมีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนประชากร M กับค่าเฉลี่ยของจำนวนรุ่นที่ใช้จนพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จในแต่ละรอบของกระบวนการ แต่เนื่องจากกำหนดการเชิงพันธุกรรมเป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้หลักของความน่าจะเป็นซึ่งไม่สามารถรับประกันได้ว่าในทุกรอบของกระบวนการจะสามารถพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จได้ภายในจำนวนรุ่นที่กำหนด จึงต้องใช้การคำนวณทางสถิติเพื่อหาจำนวนผลเฉลยอย่างน้อยที่ต้องประมวลผลจนพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จภายใต้ความมั่นใจที่กำหนด

หากกำหนดให้ $Y(M,i)$ แทนความน่าจะเป็นที่จะพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จในรุ่นที่ i ซึ่งคำนวณได้จากจำนวนรอบของกระบวนการที่พบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จในรุ่นที่ i หารด้วยจำนวนรอบของกระบวนการทั้งหมด จะสามารถคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นสะสมของความสำเร็จ $P(M,i)$ ได้ โดย $P(M,i)$ จะเป็นฟังก์ชันที่ไม่ลดลง หากในทุกรอบของกระบวนการพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จภายใน G รุ่นดังกล่าวมาข้างต้น จะได้ว่า $P(M,G)$ จะมีค่าเท่ากับ 1.0 แต่ในความเป็นจริงจะพบว่า $P(M,G)$ มักจะมีค่าน้อยกว่า 1.0 เนื่องจากจะมีบางรอบของกระบวนการที่ไม่สามารถพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จได้ภายใน G รุ่น

หากกำหนดให้ $R(M,i,z)$ แทนจำนวนรอบของกระบวนการเพื่อให้สามารถพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จภายในรุ่นที่ i โดยมีความมั่นใจของความสำเร็จเท่ากับ z (เช่น z เท่ากับ 99 เปอร์เซนต์) จะได้ว่า

$$z = 1 - \left[1 - P(M,i)\right]^{R(M,i,z)}$$

ซึ่งสามารถหา $R(M,i,z)$ ได้จากสมการ

$$R(M,i,z) = \left\lceil \frac{\log(1-z)}{\log(1-P(M,i))} \right\rceil$$

หากกำหนดให้ $I(M,i,z)$ แทนจำนวนผลเฉลยอย่างน้อยที่ต้องประมวลผลจนพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จภายในรุ่นที่ i โดยมีค่าความมั่นใจของความสำเร็จ z จะได้ว่า

$$I(M,i,z) = M \times i \times R(M,i,z)$$

สำหรับรุ่นที่มีค่า $I(M,i,z)$ น้อยที่สุดเรียกว่ารุ่นที่ดีที่สุด (best generation, i^*) ซึ่งค่า $I(M,i,z)$ ของรุ่นที่ดีที่สุดนี้เรียกว่า *ความเพียรพยายามเชิงคำนวณ* (E) โดย

$$E = I(M,i^*,z) = M \times i^* \times R(M,i^*,z)$$

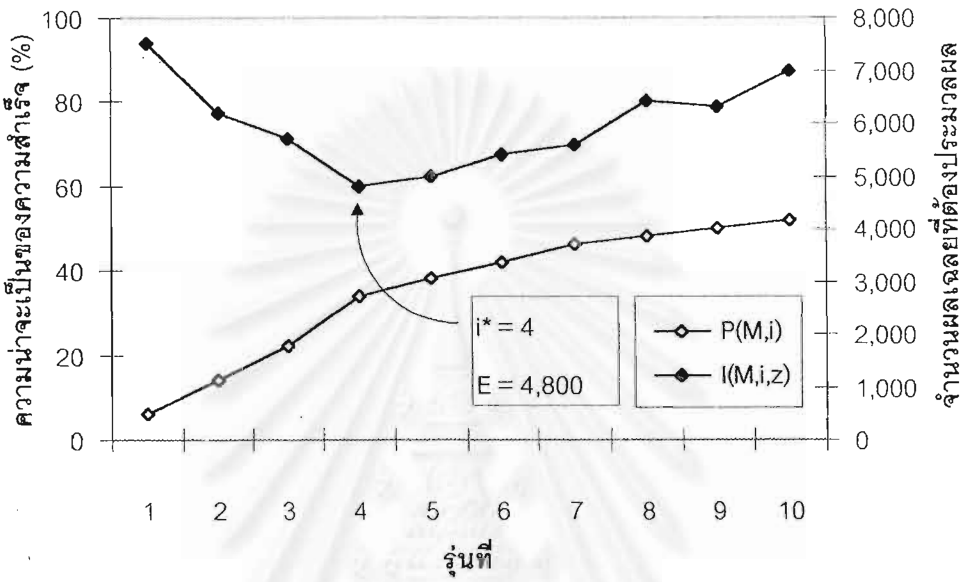
ซึ่งค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่คำนวณได้นี้ไม่จำเป็นจะต้องเป็นค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณน้อยที่สุดจริง ๆของปัญหานั้น

ตัวอย่างการคำนวณค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของตัวอย่างปัญหาแสดงดังตารางที่ 2.1 โดยกำหนดจำนวนประชากรของผลเฉลยในแต่ละรุ่นเท่ากับ 100 จำนวนรุ่นเท่ากับ 10 รุ่น จำนวนรอบของกระบวนการเท่ากับ 50 รอบ ค่าความมั่นใจของความสำเร็จเท่ากับ 99 เปอร์เซนต์ ซึ่งพบว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของตัวอย่างปัญหานี้เท่ากับ 4,800 โดยรุ่นที่ดีที่สุดคือรุ่นที่ 4

รุ่นที่	จำนวนรอบของกระบวนการที่พบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จ	$Y(M,i)$	$P(M,i)$	$R(M,i,z)$	$I(M,i,z)$
1	3	0.06	0.06	75	7,500
2	4	0.08	0.14	31	6,200
3	4	0.08	0.22	19	5,700
4	6	0.12	0.34	12	4,800
5	2	0.04	0.38	10	5,000
6	2	0.04	0.42	9	5,400
7	2	0.04	0.46	8	5,600
8	1	0.02	0.48	8	6,400
9	1	0.02	0.05	7	6,300
10	1	0.02	0.52	7	7,000

ตารางที่ 2.1 ค่าของตัวแปรต่าง ๆในการหาค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของตัวอย่างปัญหา (ชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ , 2540: 12)

กราฟที่แสดงความน่าจะเป็นสะสมของความสำเร็จ $P(M,i)$ และจำนวนผลเฉลยอย่างน้อยที่ต้องประมวลผลจนพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จ $I(M,i,z)$ ในแต่ละรุ่น i เรียกว่า *เส้นโค้งสมรรถนะ*(performance curve) สำหรับเส้นโค้งสมรรถนะของตัวอย่างปัญหาแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งสมรรถนะของตัวอย่างปัญหา (ชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์, 2540: 12)

ในการเปรียบเทียบโดยใช้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ หากใช้วิธีในการเรียนรู้เดียวกันในการหาคำตอบปัญหาที่ต่างกัน ปัญหาที่มีค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณสูงกว่าจะแสดงถึงปัญหานั้นมีความยากกว่าปัญหาที่มีค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณต่ำกว่า และหากใช้วิธีในการเรียนรู้ต่างกันในการหาคำตอบปัญหาเดียวกันวิธีการเรียนรู้ที่คำนวณค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณได้ต่ำกว่าแสดงถึงความมีประสิทธิภาพในการเรียนรู้มากกว่าวิธีการเรียนรู้ที่คำนวณค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณได้สูงกว่า

เนื่องจากกระบวนการหาคำตอบของกำหนดการเชิงพันธุกรรมจะใช้เวลาส่วนใหญ่ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของผลเฉลยเพื่อค้นหาผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพเป็นที่ยอมรับว่าเป็นคำตอบของปัญหา อย่างไรก็ตามไม่สามารถใช้เวลาในการตรวจสอบประสิทธิภาพของผลเฉลยสำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการได้ เนื่องจากแต่ละปัญหาใช้ฟังก์ชันความเหมาะไม่เหมือนกันจึงใช้เวลาในการวัดค่าความเหมาะต่อหนึ่งผลเฉลยไม่เท่ากัน การวัดว่ากระบวนการใช้เวลาในการตรวจสอบประสิทธิภาพของผลเฉลยไป

เท่าไรจนกระทั่งพบคำตอบจึงใช้การนับจำนวนผลเฉลยที่กระบวนการต้องตรวจสอบประสิทธิภาพจนกระทั่งพบผลเฉลยที่เป็นคำตอบแทน จึงเสมือนว่ากำหนดให้การวัดค่าความเหมาะของแต่ละผลเฉลยใช้เวลาเท่ากับ 1 หน่วยเวลาเท่า ๆ กันถึงแม้ว่าในแต่ละปัญหาจะมีขั้นตอนการตรวจสอบประสิทธิภาพของผลเฉลยที่ใช้เวลาไม่เท่ากันก็ตาม ซึ่งการวัดค่านี้ก็คือการวัดค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณนั่นเอง ในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะวัดประสิทธิภาพของโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์เมื่อกำหนดขนาดของต้นไม้เริ่มต้นต่างกัน ดังนั้นการใช้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณมาวัดประสิทธิภาพของกระบวนการจึงเหมาะสมแล้ว

การคำนวณค่าความน่าจะเป็นที่จะพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จในรุ่นที่ i ($Y(M,i)$) คำนวณได้จากจำนวนรอบของกระบวนการที่พบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จในรุ่นที่ i หารด้วยจำนวนรอบของกระบวนการทั้งหมด จำนวนรอบของกระบวนการที่พบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จในรุ่นที่ i เก็บข้อมูลจากการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมตามจำนวนรอบของกระบวนการทั้งหมดที่กำหนดไว้ ในการรันโปรแกรมแต่ละครั้งจำนวนรอบของกระบวนการที่พบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จในรุ่นที่ i ที่ได้จะไม่เท่ากันเนื่องจากกำหนดการเชิงพันธุกรรมเป็นกระบวนการเชิงสุ่ม ดังนั้นค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณจึงมีค่าความคลาดเคลื่อนจากสาเหตุดังกล่าว ค่าความคลาดเคลื่อนที่ว่านี้ลดลงได้เมื่อเพิ่มจำนวนรอบของกระบวนการทั้งหมดให้มากขึ้นซึ่งคล้ายกับการเพิ่มจำนวนตัวอย่างในวิธีการทางสถิตินั่นเอง ทำให้โปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่มีพารามิเตอร์ในการรันโปรแกรมเหมือนกันมีค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณไม่แตกต่างกันมากนักในการรันโปรแกรมแต่ละครั้ง

2.1.4 การเลือกแผนการทดลอง

ผู้วิจัยจึงเลือกใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่ม (randomized complete block design) (Montgomery, 1996) ซึ่งมีลักษณะของแผนการทดลองคือแบ่งกลุ่มของหน่วยทดลองจำแนกตามระดับของปัจจัยรบกวน จากนั้นสุ่มเลือกหน่วยทดลองภายในกลุ่มให้กับแต่ละระดับของปัจจัยที่สนใจศึกษา ดังนั้นจำนวนหน่วยทดลองภายในแต่ละกลุ่มจะเท่ากับจำนวนระดับของปัจจัยที่สนใจศึกษา แต่ละกลุ่มควรมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเพื่อช่วยในการจำแนกหน่วยทดลองและทำให้หน่วยทดลองที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันมีลักษณะคล้ายคลึงกันมากที่สุด

ลักษณะของแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่มที่มีจำนวนระดับของปัจจัยที่ต้องการวัดความแตกต่าง a ระดับ และมีจำนวนกลุ่ม b กลุ่มแสดงได้ดังรูปที่ 2.4

ปัจจัย	กลุ่ม 1	กลุ่ม 2		กลุ่ม b
1	y_{11}	y_{12}		y_{1b}
2	y_{21}	y_{22}		y_{2b}
3	y_{31}	y_{32}	. . . .	y_{3b}
.	.	.		.
.	.	.		.
a	y_{a1}	y_{a2}		y_{ab}

รูปที่ 2.4 แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่ม

แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่มได้อาศัยหลักการพื้นฐานของการวางแผนการทดลองคือ การแบ่งกลุ่ม (blocking) และการสุ่ม (randomization) เพื่อขจัดความผันแปรของความคลาดเคลื่อนในการทดลองทั้งที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ โดยการแบ่งกลุ่มจะช่วยขจัดความผันแปรของความคลาดเคลื่อนที่ควบคุมได้ ซึ่งเกิดจากปัจจัยรบกวนที่ผู้ทดลองรู้แน่ชัดว่าจะทำให้เกิดผลกระทบกับตัวแปรตาม เช่นในงานวิจัยนี้ได้แก่พารามิเตอร์อื่นๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ การแบ่งกลุ่มช่วยให้สามารถควบคุมปัจจัยรบกวนได้อย่างเป็นระบบ และยังมีประโยชน์ในกรณีที่การทดลองมีปัจจัยรบกวนหลายปัจจัย ผู้ทดลองอาจใช้การแบ่งกลุ่มโดยการจัดหมู่ (combination) ปัจจัยเหล่านี้ไว้เป็นกลุ่มๆ ลักษณะการแบ่งกลุ่มเช่นนี้มักใช้ในการทดลองที่ต้องการทดสอบความทนทานของปัจจัยที่สนใจศึกษาภายใต้สภาพแวดล้อมหลากหลาย ส่วนการสุ่มนั้นจะช่วยในการขจัดความผันแปรจากการที่หน่วยทดลองภายในกลุ่มเดียวกันแตกต่างกันซึ่งเป็นความผันแปรของความคลาดเคลื่อนที่ควบคุมไม่ได้ เพราะในการทดลองจริงถึงแม้ว่าจะพยายามเลือกหน่วยทดลองในกลุ่มเดียวกันให้คล้ายคลึงกันมากเพียงใดก็ยังคงมีความแตกต่างระหว่างแต่ละหน่วยทดลองอยู่ดี ดังนั้นจึงสุ่มเลือกหน่วยทดลองภายในกลุ่มเดียวกันให้กับแต่ละระดับของปัจจัยเพื่อเฉลี่ยความแตกต่างให้กับทุกระดับของปัจจัยเท่าๆ กัน

บรรทัดฐานที่ใช้เป็นแนวทางในการแบ่งกลุ่มแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. <u>แบ่งกลุ่มตามคุณสมบัติของหน่วยทดลอง</u> เช่น ถ้าหน่วยทดลองเป็นคน อาจแบ่งกลุ่มตามเพศ , อายุ , รายได้ ฯลฯ หากหน่วยทดลองคือจังหวัด อาจแบ่งกลุ่มตามภาค , จำนวนประชากร ฯลฯ

2. <u>แบ่งกลุ่มตามคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง</u> เช่น แบ่งเป็นกลุ่มตามกลุ่มของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการทดลองเพื่อลดความแตกต่างทางคุณสมบัติของวัตถุดิบแต่ละกลุ่ม เช่น ความชื้น, อุณหภูมิ, แบ่งเป็นกลุ่มตามระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง, แบ่งเป็นกลุ่มตามเครื่องจักรที่ใช้ในการทดลองเพื่อลดความแตกต่างด้านประสิทธิภาพของเครื่องจักร, แบ่งกลุ่มตามผู้ดำเนินการทดลองเพื่อลดความแตกต่างด้านความชำนาญของแต่ละคน ฯลฯ

การแบ่งกลุ่มมีความสำคัญมากในการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่ม เพราะช่วยลดความผันแปรของความคลาดเคลื่อนในการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ผู้วิจัยต้องมีความรู้ความเข้าใจในรายละเอียดของการทดลองอย่างเพียงพอจึงจะสามารถกำหนดการแบ่งกลุ่มที่ดีได้ หรือผู้วิจัยอาจใช้ข้อมูลการแบ่งกลุ่มที่ได้จากการทดลองนำร่องมาเป็นแนวทางในการพิจารณาแบ่งกลุ่มในการทดลองครั้งต่อไปก็จะช่วยให้การแบ่งกลุ่มก่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

การสุ่มหน่วยทดลองภายในกลุ่มให้กับแต่ละระดับของปัจจัยทำได้โดยใช้ตารางเลขสุ่มหรือใช้ตัวสร้างเลขสุ่ม (uniform random number generator) และแต่ละกลุ่มจะทำการสุ่มอย่างเป็นอิสระต่อกัน ในบางการทดลองยังมีการสุ่มลำดับในการทำการทดลองของแต่ละหน่วยทดลองอีกด้วยเพื่อขจัดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความได้เปรียบเสียเปรียบจากการทำการทดลองก่อนหลัง

แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่มเหมาะสมสำหรับใช้เป็นแผนการทดลองเพื่อตรวจสอบผลกระทบของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ เนื่องจากความต้องการที่จะกำจัดผลกระทบของพารามิเตอร์อื่นๆ ที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเพื่อให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่วัดได้จากการทดลองมีความผันแปรเนื่องจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ต่างกันเพียงปัจจัยเดียว และการแบ่งกลุ่มในการทดลองยังเป็นการทดสอบว่าเมื่อมีการใช้ค่าพารามิเตอร์อื่นที่จำเป็นในการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมหลายๆ แบบขนาดของต้นไม้เริ่มต้นจะยังคงมีผลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณอยู่หรือไม่ อีกทั้งแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่มยังมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ไม่ยุ่งยากและง่ายต่อการแปลความหมาย

เมื่อเลือกใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่มสำหรับออกแบบการทดลองจึงต้องทำการแบ่งกลุ่ม และทำการสุ่มหน่วยทดลองให้กับแต่ละระดับของปัจจัยก่อนที่จะดำเนินการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.4.1 การแบ่งกลุ่ม

ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 2.1.1 ว่านอกจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้นแล้วยังมีพารามิเตอร์อื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณได้แก่ จำนวนรุ่นมากที่สุดในการทดลอง, จำนวนรอบของกระบวนการ และค่าความมั่นใจของความสำเร็จ เนื่องจากค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเป็นผลลัพธ์จากการคำนวณโดยอาศัยความน่าจะเป็นในการคาดเดาค่าของจำนวนรอบของกระบวนการที่ทำให้สามารถพบผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จภายในรุ่นที่กำหนด ดังนั้นโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ซึ่งรันโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกันอาจให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่แตกต่างกันได้ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่าจึงต้องกำหนดเป็นค่าคงที่เพื่อให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ได้เป็นมาตรฐานเดียวกันตลอดการวิจัย และค่าคงที่นั้นต้องทำให้ความผันแปรของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ นั่นคือเมื่อรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกันจะต้องได้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ไม่แตกต่างกันมาก ความผันแปรของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณในส่วนนี้จะถูกจัดอยู่ในความคลาดเคลื่อนที่ไม่สามารถควบคุมได้ของการทดลองซึ่งจะมีผลต่อการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ การลดค่าความผันแปรในส่วนนี้ทำได้โดยใช้พารามิเตอร์ทั้ง 3 พารามิเตอร์ในการควบคุมค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแปรตามแทนที่จะใช้พารามิเตอร์นี้ในการแบ่งกลุ่ม รายละเอียดการกำหนดค่าพารามิเตอร์แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
จำนวนรุ่นมากที่สุดในการทดลอง	10 รุ่น
จำนวนรอบของกระบวนการ	1000 รอบ
ค่าความมั่นใจของความสำเร็จ	99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

2. <u>พารามิเตอร์ที่ไม่ใช้ในการคำนวณค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ</u> แต่อาจมีอิทธิพลทางอ้อมต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ ซึ่งผู้วิจัยใช้พารามิเตอร์ประเภทนี้แบ่งกลุ่มของหน่วยทดลอง เกณฑ์ในการกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ได้มาจากข้อมูลของงานวิจัยการลดทอนความเพียรพยายามเชิงคำนวณของวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรม (ชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์, 2540) ค่าของขอบเขตที่กำหนดเป็นค่าที่สนใจศึกษาเนื่องจากเป็นช่วงของค่าพารามิเตอร์ที่สามารถให้ผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จ และใช้ทรัพยากรในการค้นหาคำตอบน้อย (หมายความว่าสามารถเขียนโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมได้โดยไม่ซับซ้อน รันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนใหญ่ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันที่ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภายในเวลาจำกัดก็ได้รับคำตอบของปัญหา) ดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะต้องขยายขอบเขตของค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ออกไปอีกเพราะต้องการศึกษาให้เข้าใจในกระบวนการเพื่อปรับปรุงให้หาคำตอบได้เร็วขึ้น เนื่องจากพารามิเตอร์เหล่านี้มักจะถูกเปลี่ยนแปลงเสมอเมื่อใช้โปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมเพื่อหาคำตอบแต่ละครั้ง จึงจำเป็นที่จะต้องทดสอบว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นยังคงมีผลกระทบต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณหรือไม่เมื่อพารามิเตอร์เปลี่ยนไปหลายๆ แบบ ดังนั้นจึงเลือกค่าพารามิเตอร์จากขอบเขตที่กำหนดไว้ โดยค่าที่เลือกจะต้องแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่น ค่าจำนวนประชากรมีขอบเขตตั้งแต่ 100 – 400 ประชากร ผู้วิจัยเลือกค่าจำนวนประชากรเท่ากับ 100 , 150 , 200 , 250 , 300 , 350 , 400 เป็นต้น จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่ถูกเลือกมาจัดเป็นชุดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมเช่น จำนวนประชากร 100 ประชากร, อัตราการสืบพันธุ์ 5% ของจำนวนประชากร, อัตราการไขว้เปลี่ยน 40% ของจำนวนประชากร, อัตราการกลายแบบต่อยอดและอัตราการกลายแบบต่อปลายอย่างละเท่ากันรวมเป็น 55% ของจำนวนประชากร ทั้งหมดนี้เป็น 1 ชุดของพารามิเตอร์และกำหนดให้เป็น 1 กลุ่ม ต่อไปในงานวิจัยนี้หากมีการอ้างถึงชุดของพารามิเตอร์จะมีความหมายเดียวกับกลุ่ม จากตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เลือกทั้งหมดนำมาจัดเป็นชุดของพารามิเตอร์ได้ทั้งหมด 105 ชุด จะใช้พารามิเตอร์แต่ละชุดรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ภายใต้สภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์ทั้ง 3 สภาพแวดล้อม การกำหนดค่าพารามิเตอร์เช่นนี้ทำให้แต่ละชุดของพารามิเตอร์มีความแตกต่างกัน และครอบคลุมรูปแบบของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมสำหรับแก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ นอกจากนี้การกำหนดรูปแบบพารามิเตอร์อย่างมีระบบจะมีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ข้อมูลอีกด้วย รายละเอียดของชนิดของพารามิเตอร์ การกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์ และค่าพารามิเตอร์ที่เลือกมาใช้ในงานวิจัยแสดงในตารางที่ 2.3 ส่วนชุดของพารามิเตอร์ทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ก

พารามิเตอร์	ขอบเขต	ค่าพารามิเตอร์ที่เลือก
จำนวนประชากร	100 – 400	100,150,200,250,300,350,400
อัตราการสืบพันธุ์	5% - 10%	5%, 8%, 10%
อัตราการไขว้เปลี่ยน	40% - 60%	40%,45%,50%,55%,60%
อัตราการกลายแบบต่อยอด และ อัตราการกลายแบบต่อปลาย	รวมกันเท่ากับ 30% - 55%	(100% - อัตราการสืบพันธุ์ – อัตราการไขว้เปลี่ยน) / 2
สภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์	สภาพแวดล้อม 1 – 3	สภาพแวดล้อม 1 – 3

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการแบ่งกลุ่ม

2.1.4.2 การสุ่ม

กำหนดการเชิงพันธุกรรมเป็นกระบวนการเชิงสุ่ม ด้วยเหตุที่ว่าการสร้างประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์เกิดจากการสุ่มเลือกฟังก์ชันและเทอมินอลมาสร้างเป็นต้นไม้ความสูง 1 จากนั้นสุ่มสร้างต้นไม้ย่อยความสูง 1 นำมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยการประกอบต้นไม้ย่อยเข้ากับต้นไม้หลักใช้การสุ่มเลือกจุดต่อ ทำเช่นนี้จนกระทั่งต้นไม้มีขนาดเท่ากับขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่กำหนดไว้ การสร้างประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นจะเป็นเช่นนี้ทุกครั้งที่เริ่มกระบวนการกำหนดการเชิงพันธุกรรมในแต่ละรอบ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้หน่วยทดลองคือโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์จึงมีลักษณะของความเป็นเชิงสุ่มอยู่ในตัวเอง ดังนั้นจึงไม่ต้องสุ่มหน่วยทดลองให้กับขนาดต่างๆ ของต้นไม้เริ่มต้นอีก เพราะว่าเมื่อรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้ชุดพารามิเตอร์เหมือนกันโดยมีขนาดของต้นไม้เริ่มต้นต่างกัน โปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมจะสร้างประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นชุดใหม่เสมอในแต่ละครั้ง และการสร้างประชากรโดยวิธีการเชิงสุ่มทำให้โอกาสที่จะได้โปรแกรมหุ่นยนต์ที่มีรูปแบบโครงสร้างต่างๆ กันมีค่าเท่ากัน จึงไม่เกิดความได้เปรียบเสียเปรียบเนื่องจากได้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ที่มีประสิทธิภาพดีกว่าหรือเลวกว่าในแต่ละครั้งที่รันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมถึงแม้ว่าจะมีลำดับการรันโปรแกรมก่อนหรือหลังก็ตาม

2.1.5 การดำเนินการทดลอง

ดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่ม ซึ่งจากการวางแผนการทดลองที่ผ่านมาได้กำหนดจำนวนชุดของพารามิเตอร์ไว้ 105 ชุด จำนวนขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 37 ระดับ จึงต้องทำการทดลอง 3,885 การทดลองภายใต้ 1 สภาพแวดล้อม

ของแขนหุ่นยนต์ และจะต้องทำการทดลองทั้งสิ้น 11,655 การทดลองจึงครบทุกสภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์

การทดลองแต่ละการทดลองดำเนินการโดยใส่ชุดพารามิเตอร์ 1 ชุด ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 1 ระดับ และกำหนดสภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์ให้กับโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์แล้วรันโปรแกรม เมื่อจบการรันโปรแกรมเก็บข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ

2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

บทที่ 3 จะอธิบายเกี่ยวกับขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติและดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูล พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของเทคนิควิธีการที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อยืนยันความเชื่อถือได้ของผลการวิเคราะห์ จากนั้นจึงสรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่นที่กำหนดไว้

2.3 สรุปผลการวิจัย

บทที่ 4 จะแสดงข้อสังเกตที่ได้จากการผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการวิจัย พร้อมทั้งกล่าวถึงข้อเสนอแนะต่าง ๆ สำหรับการทำวิจัยต่อไปในอนาคต

บทที่ 3

การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อได้ออกแบบการทดลองและทำการทดลองเสร็จสิ้น ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยนำสมมติฐานในการวิจัยมาแปลเป็นสมมติฐานทางสถิติ จากนั้นนำสมมติฐานทางสถิติมาทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติ ผลการทดสอบไม่ว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานจะเป็นผลการทดสอบที่มีนัยสำคัญทางสถิติซึ่งหมายความว่าจากการใช้วิธีการทางสถิติตั้งแต่การวางแผนการทดลองจนถึงการทดสอบสมมติฐานทางสถิติผลการทดสอบที่ได้สามารถเชื่อถือและยอมรับได้ในระดับหนึ่งหรือมีหลักฐานที่น่าเชื่อถือว่าน่าจะเกิดเหตุการณ์เช่นนั้นจริง แต่ไม่ได้หมายความว่าสามารถพิสูจน์ว่าปัจจัยที่สนใจจะทำให้เกิดหรือไม่เกิดผลกระทบเช่นนั้นอย่างจริงแท้แน่นอน การใช้วิธีการทางสถิติอย่างเหมาะสมและตรงตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยจึงเป็นการประมาณโอกาสของความผิดพลาดในการสรุปผลหรือเป็นการให้ความเชื่อมั่นต่อผลสรุปในระดับหนึ่งเท่านั้น

อย่างไรก็ตามผลสรุปที่ได้อาจจะไม่เหมาะสมในการนำไปเป็นเหตุผลสำหรับการปฏิบัติก็ได้ เช่นวิศวกรสรุปผลว่าการเปลี่ยนระบบหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงในรถยนต์จากแบบที่ 1 ไปเป็นแบบที่ 2 จะทำให้รถยนต์วิ่งได้ระยะทางเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 0.04 กิโลเมตรต่อน้ำมันเชื้อเพลิง 1 ลิตรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ในทางปฏิบัติการเปลี่ยนหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงต้องลงทุนถึง 40,000 บาท ดังนั้นระยะทางที่รถวิ่งได้เพิ่มขึ้นอาจจะไม่คุ้มกับการที่จะต้องลงทุน การนำผลสรุปไปใช้งานจึงต้องตระหนักว่าถึงแม้ในการทดลองปัจจัยที่สนใจศึกษาจะทำให้เกิดความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่ก็ไม่ได้รับประกันว่าผลสรุปจากการทดลองจะเป็นเหตุผลที่มีน้ำหนักเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเชิงปฏิบัติ จึงควรพิจารณาถึงปัจจัยอื่นประกอบการตัดสินใจด้วย

3.1 ขั้นตอนในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

วัตถุประสงค์ในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติคือ เพื่อสรุปว่าการคาดเดาเกี่ยวกับลักษณะของประชากรโดยใช้ข้อมูลหรือสารสนเทศจากตัวอย่างมีความเป็นไปได้หรือไม่ โดยประชากรที่กล่าวถึงหมายถึงทุกหน่วยที่ให้ข้อมูลที่สนใจศึกษาเช่นในงานวิจัยนี้ประชากรคือ

โปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ที่มีพารามิเตอร์ในการรันโปรแกรมทุกแบบ โดยสนใจศึกษาค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่วัดได้จากประชากร เนื่องจากผู้วิจัยไม่สามารถวัดค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณจากโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่มีพารามิเตอร์ในการรันโปรแกรมทุกแบบได้ เพราะว่ามีจำนวนมากมายนับไม่ถ้วน ดังนั้นจึงต้องสุ่มตัวอย่างจากประชากรมาเพียงบางส่วน ผู้วิจัยจึงกำหนดพารามิเตอร์ในการรันโปรแกรมไว้เพียงบางแบบแล้ววัดค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ จากนั้นนำค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่วัดได้จากตัวอย่างมาคำนวณค่าประมาณลักษณะของประชากร ค่าประมาณลักษณะของประชากรที่ได้จากตัวอย่างเรียกว่าค่าสถิติ ลักษณะของประชากรอธิบายด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของประชากร เช่น ค่าเฉลี่ยของประชากร ค่าความแปรปรวนของประชากร เป็นต้น ตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ของค่าสถิติและค่าพารามิเตอร์ เช่น ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยจากตัวอย่างเป็นตัวประมาณค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยจากประชากร ในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติจะใช้ค่าสถิติในกระบวนการตรวจสอบว่าสมมติฐานทางสถิติที่ตั้งไว้ยอมรับได้หรือไม่ หรือเป็นการสรุปผลโดยอาศัยข้อมูลจากตัวอย่างมาคำนวณค่าสถิติแล้วใช้ค่าสถิติที่เป็นตัวประมาณค่าพารามิเตอร์นั้นตัดสินว่าค่าพารามิเตอร์ของประชากรมีลักษณะอย่างไร จากนั้นจึงจะสรุปลักษณะของประชากรด้วยลักษณะของค่าพารามิเตอร์

ส่วนใหญ่ก่อนที่จะทำงานวิจัยผู้วิจัยมักจะมีคำตอบที่คาดว่าจะเป็นคำตอบของปัญหาที่ทำการวิจัยไว้ล่วงหน้าแล้ว คำตอบที่คาดไว้ล่วงหน้านี้เรียกว่าสมมติฐาน โดยผู้วิจัยมักจะกำหนดสมมติฐานจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือจากความรู้พื้นฐานที่ได้ศึกษามาก่อน และสมมติฐานที่เตรียมไว้จะเป็นแนวทางในการเริ่มต้นทำงานวิจัย สมมติฐานทางสถิติจึงได้มาจากสมมติฐานในการทำวิจัยเหล่านี้นั่นเอง

สมมติฐานทางสถิติหมายถึงข้อความที่อธิบายลักษณะของประชากรด้วยค่าพารามิเตอร์โดยเขียนอยู่ในรูปของสัญลักษณ์ทางสถิติ เพื่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างค่าสถิติและค่าพารามิเตอร์จึงมีการกำหนดสัญลักษณ์แทนค่าสถิติและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายลักษณะต่าง ๆ ของประชากรไว้ดังตารางที่ 3.1

ค่าที่คำนวณได้จากตัวอย่าง	ค่าสถิติ	ค่าพารามิเตอร์
ค่าเฉลี่ย (mean)	$\bar{x}$	μ
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)	s	σ
ค่าความแปรปรวน (variance)	s^2	σ^2
ค่าสัดส่วน (proportion)	p หรือ $\hat{p}$	π หรือ P
ค่าสหสัมพันธ์ (correlation)	r	ρ
ค่าอื่น ๆ	$\hat{\theta}$	θ

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์แทนค่าสถิติและค่าพารามิเตอร์ (ศิริชัย พงษ์วิชัย, 2540: 66)

สมมติฐานทางสถิติแบ่งเป็น 2 ประเภทคือสมมติฐานว่าง (null hypothesis) แทนด้วยสัญลักษณ์ H_0 และสมมติฐานแย้ง (alternative hypothesis) แทนด้วยสัญลักษณ์ H_1 การแปลงจากสมมติฐานในการทำวิจัยไปเป็นสมมติฐานทางสถิติ จะกำหนดให้สมมติฐานในการทำวิจัยเป็นสมมติฐานแย้ง และกำหนดนิเสธของสมมติฐานเป็นสมมติฐานว่าง ในทางปฏิบัติจะพบว่าส่วนใหญ่สมมติฐานในการทำวิจัยมักจะไม่รวมถึงการเท่ากัน จึงไม่ปรากฏเครื่องหมายเท่ากับในสมมติฐานแย้ง เช่นกำหนดสมมติฐานในการทำการวิจัยว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเมื่อขนาดของต้นไม้เริ่มต้นต่างกันจะไม่เท่ากัน จุดมุ่งหมายในการทำวิจัยจึงต้องการแสดงว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณซึ่งวัดจากโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่มีพารามิเตอร์ในการรันโปรแกรมทุกแบบมีความแตกต่างกันสำหรับขนาดของต้นไม้เริ่มต้นแต่ละระดับ จึงใช้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยจากประชากรในการเขียนสมมติฐานทางสถิติ จากตัวอย่างนี้สามารถเขียนสมมติฐานว่างและสมมติฐานแย้งได้ดังนี้

$H_0 : \mu_{40} = \mu_{50} = \ldots = \mu_{400}$

$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่

μ_i และ μ_j คือค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยจากประชากรที่มีขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเท่ากับ i และ j โดยกำหนดให้ i, j มีค่าตั้งแต่ 40 - 400 โหนด และขนาดของต้นไม้เริ่มต้นต่างกันระดับละ 10 โหนด

สมมติฐานทางสถิติจะถูกประเมินความถูกต้องบนพื้นฐานของข้อมูลที่ได้มาจากตัวอย่าง โดยมีหลักการคือจะยอมรับสมมติฐานว่างจนกระทั่งมีหลักฐานชัดเจนว่าข้อมูลที่ได้มา

จากตัวอย่างไม่ได้แสดงลักษณะดังเช่นที่เขียนไว้ในสมมติฐานว่าง จึงจะปฏิเสธสมมติฐานว่างและยอมรับสมมติฐานแย้ง ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการปฏิเสธสมมติฐานว่างเมื่อสมมติฐานว่างจริงถือเป็นความผิดพลาดที่ร้ายแรงกว่าการยอมรับสมมติฐานว่างเมื่อสมมติฐานว่างเท็จ เนื่องจากจะทำให้เกิดการสรุปผลที่ผิดพลาดและอาจเกิดความเสียหายอย่างมากเมื่อนำผลสรุปนั้นไปใช้งานในเชิงปฏิบัติ หรืออาจกล่าวได้ว่าการปฏิเสธสมมติฐานว่างเมื่อสมมติฐานว่างเป็นจริงและยอมรับสมมติฐานแย้งคือการตัดสินใจยอมรับสมมติฐานในการทำวิจัยเมื่อสมมติฐานนั้นไม่จริงซึ่งจะเป็นผลเสียต่อการสรุปผลงานวิจัยอย่างมาก

การทดสอบสมมติฐานทางสถิติจึงต้องกำหนดระดับของความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐานไว้ก่อนทำการทดสอบ ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

1. ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (type I error) เป็นความผิดพลาดเนื่องจากการปฏิเสธ H_0 เมื่อ H_0 เป็นจริง เรียกความผิดพลาดชนิดนี้ว่า "ระดับนัยสำคัญ" (level of significance) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ α โดย α เท่ากับความน่าจะเป็นที่จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ H_0 เป็นจริง

2. ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (type II error) เป็นความผิดพลาดเนื่องจากการยอมรับ H_0 เมื่อ H_0 ไม่เป็นจริง ใช้สัญลักษณ์ β แทนความผิดพลาดประเภทนี้ โดย β เท่ากับความน่าจะเป็นที่จะยอมรับ H_0 เมื่อ H_0 ไม่เป็นจริง

ผลการทดสอบ	**ความเป็นจริง**	
	H_0 เป็นจริง	**H_0 ไม่เป็นจริง**
ยอมรับ H_0	ผลการทดสอบถูกต้อง	ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (β)
ปฏิเสธ H_0	ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (α)	ผลการทดสอบถูกต้อง

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบและความผิดพลาดในการทดสอบ (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2542: 98)

ในการทดสอบสมมติฐานย่อมต้องการให้มีความผิดพลาดทั้ง 2 ประเภทน้อยที่สุดแต่ถ้าลด α จะทำให้ β เพิ่มขึ้น และในทางกลับกันการลด β จะทำให้ α เพิ่มขึ้น การลดค่าความผิดพลาดทั้ง 2 ประเภทต้องอาศัยการเพิ่มขนาดตัวอย่างที่สุ่มมาจากประชากร เนื่องจากความสำคัญของความผิดพลาดประเภทที่หนึ่งดังเหตุผลที่กล่าวไว้ในย่อหน้าที่ผ่านมา โดยปกติจึงกำหนดความผิดพลาดประเภทที่ 1 หรือ α หรือระดับนัยสำคัญ ที่ยอมรับได้

ในการทดสอบสมมติฐาน หรือกำหนดระดับความเชื่อมั่น $1-\alpha$ ซึ่งหมายถึงโอกาสที่จะยอมรับ H_0 เมื่อ H_0 เป็นจริง

เกณฑ์ในการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานว่างจะขึ้นอยู่กับค่าสถิติทดสอบ (test statistic) สถิติทดสอบคือฟังก์ชันของตัวอย่างสุ่มซึ่งถูกใช้เพื่อการตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานว่างฟังก์ชันดังกล่าวจะประกอบด้วยข้อกำหนดและวิธีการคำนวณค่าสถิติจากข้อมูลตัวอย่าง การเลือกสถิติทดสอบต้องสอดคล้องกับสมมติฐานที่กำลังทำการทดสอบ จะกล่าวถึงรายละเอียดของสถิติทดสอบที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เมื่อทำการทดสอบสมมติฐาน ค่าสถิติทดสอบที่คำนวณได้จะถูกเปรียบเทียบกับค่าวิกฤต (critical value) ถ้าค่าสถิติทดสอบอยู่ในเขตปฏิเสธ (critical region) จะสรุปว่าปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 แต่ถ้าค่าสถิติทดสอบอยู่นอกเขตปฏิเสธจะสรุปว่ายอมรับ H_0 ค่าวิกฤตคือค่าที่แบ่งเขตปฏิเสธและเขตยอมรับ (acception region) ของสมมติฐานว่าง โดยบริเวณปฏิเสธคือบริเวณที่ทำให้เกิดการปฏิเสธสมมติฐานว่างซึ่งรวมแล้วมีค่าเท่ากับ α การเปรียบเทียบค่าสถิติทดสอบกับค่าวิกฤตจะแสดงให้เห็นในการทดสอบสมมติฐานต่อไป ส่วนรายละเอียดเพิ่มเติมในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติสามารถอ่านได้จากหนังสือสถิติทั่วไป ในงานวิจัยนี้ได้แสดงรายละเอียดไว้เพียงให้เห็นถึงแนวคิด, ขั้นตอนและรายละเอียดโดยสังเขปของการทดสอบสมมติฐานเท่านั้น

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานทางสถิติที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมดสามารถสรุปเป็นขั้นได้ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดสมมติฐานทางสถิติ
ขั้นที่ 2 กำหนดระดับนัยสำคัญ (α) ในการทดสอบ
ขั้นที่ 3 เลือกสถิติทดสอบที่เหมาะสมกับสมมติฐานทางสถิติที่จะทดสอบ
ขั้นที่ 4 คำนวณค่าสถิติทดสอบ
ขั้นที่ 5 สร้างขอบเขตการปฏิเสธสมมติฐานหรือการหาค่าวิกฤต
ขั้นที่ 6 ตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานว่าง และสรุปผลการทดสอบ

การดำเนินการทดสอบสมมติฐานในงานวิจัยนี้จะเป็นไปตามขั้นตอนดังกล่าว และเพิ่มเติมรายละเอียดเกี่ยวกับเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐาน พร้อมทั้งการตรวจสอบความเหมาะสมของเทคนิคดังกล่าว

3.2 สมมติฐานในการวิจัยและสมมติฐานทางสถิติ

ในงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานในการวิจัยไว้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อกำหนดขนาดของต้นไม้เริ่มต้นต่างกันจะทำให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณไม่เท่ากัน
2. เมื่อกำหนดให้ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีขนาดเพิ่มขึ้นค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณจะลดลง

จากสมมติฐานในการวิจัยดังกล่าวเขียนเป็นสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

1. $H_0 : \mu_{40} = \mu_{50} = \ldots = \mu_{400}$
   $H_1 : \mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่ $; i \neq j$

   หรือกล่าวได้ว่า

H_0 : *ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นแต่ละระดับไม่แตกต่างกัน*

H_1 : *มีความแตกต่างของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้นอย่างน้อย 1 คู่*

2. $H_0 : \mu_d = 0$ $; \mu_d = \mu_i - \mu_j$ และ $i < j$
   $H_1 : \mu_d > 0$ $; \mu_d = \mu_i - \mu_j$ และ $i < j$

   หรือกล่าวได้ว่า

H_0 : *ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นทั้ง 2 ระดับไม่แตกต่างกัน*

H_1 : *ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ใหญ่กว่าจะน้อยกว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่เล็กกว่า*

μ_i และ μ_j คือค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยจากประชากรที่มีขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเท่ากับ i และ j โดยกำหนดให้ i, j มีค่าตั้งแต่ 40 - 400 โหนด และขนาดของต้นไม้เริ่มต้นต่างกันระดับละ 10 โหนด

จะทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติข้อ 2 ก็ต่อเมื่อผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติข้อ 1 ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 คือมีความแตกต่างของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้นอย่างน้อย 1 คู่ โดยจะต้องทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติข้อ 2 ทั้งหมด $\binom{37}{2} = 666$ คู่ ซึ่งเป็นการจับคู่ระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มีขนาดต่างกัน เพื่อหาว่าคู่ใดบ้างที่ค่าเฉลี่ยของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่มีขนาดของต้นไม้เริ่มต้น j มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่มีขนาดของต้นไม้เริ่มต้น i โดยที่ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น i เล็กกว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้น j

3.3 การทดสอบสมมติฐานข้อ 1.

จากสมมติฐานทางสถิติ

$H_0 : \mu_{40} = \mu_{50} = \ldots = \mu_{400}$
$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่ ; $i \neq j$

μ_i และ μ_j คือค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยจากประชากรที่มีขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเท่ากับ i และ j โดยกำหนดให้ i, j มีค่าตั้งแต่ 40 - 400 โหนด และขนาดของต้นไม้เริ่มต้นต่างกันระดับละ 10 โหนด

กำหนดระดับนัยสำคัญในการทดสอบ $\alpha = 0.05$ ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) ในการทดสอบสมมติฐาน การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นกระบวนการที่นิยมใช้สำหรับทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรตั้งแต่ 3 ประชากรขึ้นไป หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวนคือการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดที่มีอยู่ในข้อมูลออกเป็นส่วนๆ ตามแหล่งที่มาของความแปรปรวน

ความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวางแผนการทดลองคือขณะที่ผู้วิจัยกำหนดแผนการทดลองจะต้องระบุได้ว่าแหล่งที่มาของความแปรปรวนมีอะไรบ้าง เพื่อจะได้เลือกแผนการทดลองที่ทำให้สามารถวัดขนาดความแปรปรวนจากแต่ละแหล่งได้อย่างถูกต้อง

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่มซึ่งแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็น 3 ส่วนคือ

ความแปรปรวนทั้งหมด = ความแปรปรวนระหว่างระดับของปัจจัย +
ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม +
ความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

จะแสดงรายละเอียดของการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่มดังต่อไปนี้

1. <u>โมเดลทางสถิติ</u> (statistical model) ซึ่งใช้ในการอธิบายว่าค่าสังเกตมีส่วนประกอบอะไรบ้าง โดยเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ทางสถิติในรูปแบบของสมการเชิงเส้นตรงแบบบวก(linear additive model) สำหรับการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่มที่ประกอบด้วย a ระดับของปัจจัยและ b กลุ่มมีโมเดลทางสถิติดังนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \qquad \begin{cases} i = 1, 2, \ldots, a \\ j = 1, 2, \ldots, b \end{cases}$$

y_{ij} คือค่าสังเกตหรือผลการทดลองของปัจจัยระดับที่ i , กลุ่มที่ j

μ คือค่าเฉลี่ยโดยทั่วไป (general grand mean)

τ_i คือค่าพารามิเตอร์แสดงผลที่ได้รับจากปัจจัยระดับที่ i

β_j คือค่าพารามิเตอร์แสดงผลที่ได้รับจากกลุ่มที่ j

ε_{ij} คือค่าความคลาดเคลื่อน

จากโมเดลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าสังเกตประกอบด้วยความแปรปรวนจากปัจจัย ความแปรปรวนจากกลุ่ม และความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง ซึ่งค่าความแปรปรวนเหล่านี้ทำให้ค่าสังเกตมีค่าแตกต่างไปจากค่าเฉลี่ยโดยทั่วไป

2. <u>ข้อสมมติ</u> เมื่อโมเดลเป็นแบบ fixed effects model

2.1 แต่ละ ε_{ij} เป็นอิสระต่อกัน และมีการแจกแจงแบบปกติด้วยค่าเฉลี่ย 0 และค่าความแปรปรวน σ^2

2.2 ไม่มีผลกระทบซึ่งกันและกัน(interaction)ระหว่างแต่ละระดับของปัจจัยและแต่ละกลุ่ม

2.3 แต่ละ τ_i เป็นค่าคงที่ ภายใต้ข้อกำหนดว่า $\sum_{i=1}^{a} \tau_i = 0$

2.4 แต่ละ β_j เป็นค่าคงที่ ภายใต้ข้อกำหนดว่า $\sum_{j=1}^{b} \beta_j = 0$

ความหมายของ **fixed effects model** คือสนใจความแตกต่างของประชากรที่ได้รับระดับของปัจจัยเฉพาะระดับของปัจจัยที่เลือกมาศึกษาผลกระทบเท่านั้น ไม่ได้คำนึงถึงว่าระดับของปัจจัยที่เลือกมาศึกษาถูกสุ่มเลือกมาจากระดับของปัจจัยทั้งหมด ดังนั้นการสรุปผลสามารถอ้างอิงได้เฉพาะกลุ่มของระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษาเท่านั้น และการแบ่งกลุ่มจะแบ่งเป็นกลุ่มตามประเภทของประชากรเฉพาะประเภทที่มีลักษณะที่สนใจศึกษาเท่านั้น เช่นแบ่งกลุ่มตามเพศ, อายุ เป็นต้น การสรุปผลจึงสามารถอ้างอิงได้เฉพาะประเภทของประชากรที่นำมาศึกษาเท่านั้น

โมเดลแบบ **fixed effects model** สอดคล้องกับขอบเขตของงานวิจัยซึ่งกำหนดระดับของปัจจัยและแบ่งกลุ่มของหน่วยทดลองบนพื้นฐานของข้อมูลที่สนใจศึกษาซึ่งนำมาจากงานวิจัยของชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ (2540)

เนื่องจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีข้อสมมติบางอย่างที่ต้องตระหนักถึง หากข้อมูลที่ได้จากการทดลองไม่เป็นไปตามข้อสมมติผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนอาจคลาดเคลื่อนได้ เพราะความเชื่อมั่นในผลสรุปของวิธีการทางสถิติขึ้นอยู่กับความสอดคล้องของข้อมูลกับข้อสมมติของวิธีการทางสถิตินั้นๆ การนำผลสรุปไปใช้อ้างอิงอาจผิดพลาดได้หากข้อมูลมีลักษณะขัดแย้งกับข้อสมมติอย่างรุนแรง อย่างไรก็ตามผลกระทบของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการที่ข้อมูลไม่มีลักษณะตามข้อสมมติขึ้นอยู่กับโมเดลทางสถิติด้วย สำหรับ **fixed effects model** ในกรณีที่มีจำนวนหน่วยทดลองเท่ากันทุกระดับของปัจจัยการที่ข้อมูลไม่เป็นไปตามข้อสมมติจะไม่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์มากนัก

3. <u>การคำนวณค่าสถิติทดสอบ</u>แสดงไว้ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance Table หรือ ANOVA) ดังต่อไปนี้

แหล่งความแปรปรวน	องศาอิสระ (df)	Sum of Squares (SS)	Mean Square (MS)	F
ระหว่างระดับของปัจจัย	$(a-1)$	$SS_{treatments}$	$\frac{SS_{treatments}}{a-1}$	$\frac{MS_{treatments}}{MS_E}$
ระหว่างกลุ่ม	$(b-1)$	SS_{blocks}	$\frac{SS_{blocks}}{b-1}$	
ความคลาดเคลื่อน	$(a-1)(b-1)$	SS_E	$\frac{SS_E}{(a-1)(b-1)}$	
ผลรวม	$ab-1$	SS_T		

โดยที่ $SS_{treatments} = \frac{1}{b}\sum_{i=1}^{a} y_{i.}^2 - \frac{y_{..}^2}{ab}$ $\qquad SS_{blocks} = \frac{1}{a}\sum_{j=1}^{b} y_{.j}^2 - \frac{y_{..}^2}{ab}$

$SS_E = SS_T - SS_{treatments} - SS_{blocks}$ $\qquad SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{ab}$

<u>เขตปฏิเสธ</u> จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $F > F_{\alpha;a-1,(a-1)(b-1)}$

ตารางที่ 3.3 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่ม

จากตารางที่ 3.3 สำหรับการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในกลุ่มที่ประกอบด้วย a ระดับของปัจจัยและ b กลุ่ม ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนคือการที่ค่าความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูลชุดหนึ่งถูกแบ่งเป็นส่วนๆ ตามแหล่งที่มา ค่าความแปรปรวนในที่นี้คือผลบวกกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนของค่าสังเกตจากค่าเฉลี่ย ซึ่งมักจะเรียกสั้นๆ ว่าผลบวกกำลังสอง (Sum of Squares หรือ SS) โดย

$$SS_T = SS_{treatments} + SS_{blocks} + SS_E$$

สัญลักษณ์	ความหมาย	สูตรคำนวณ
SS_T	ความแปรปรวนทั้งหมด หรือผลบวกกำลังสองทั้งหมด (total sum of squares)	$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\left(y_{ij}-\bar{y}_{..}\right)^2$
$SS_{treatments}$	ความแปรปรวนระหว่างระดับของปัจจัย หรือผลบวกกำลังสองของปัจจัย (sum of squares for treatments)	$b\sum_{i=1}^{a}\left(\bar{y}_{i.}-\bar{y}_{..}\right)^2$
SS_{blocks}	ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม หรือผลบวกกำลังสองของกลุ่ม (sum of squares for blocks)	$a\sum_{j=1}^{b}\left(\bar{y}_{.j}-\bar{y}_{..}\right)^2$
SS_E	ความคลาดเคลื่อนในการทดลอง หรือผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (error sum of squares)	$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\left(y_{ij}-\bar{y}_{.j}-\bar{y}_{i.}+\bar{y}_{..}\right)^2$

ตารางที่ 3.4 อธิบายสัญลักษณ์ของสมการ $SS_T = SS_{treatments} + SS_{blocks} + SS_E$

โดยที่

y_{ij} คือค่าสังเกตหรือผลการทดลองของปัจจัยระดับที่ i , กลุ่มที่ j

$y_{i.}$ คือผลรวมของค่าสังเกตที่ได้รับปัจจัยระดับที่ i

$\bar{y}_{i.}$ คือค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตที่ได้รับปัจจัยระดับที่ i

$y_{.j}$ คือผลรวมของค่าสังเกตในกลุ่มที่ j

$\bar{y}_{.j}$ คือค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตในกลุ่มที่ j

$y_{..}$ คือผลรวมของค่าสังเกตทั้งหมด

$\bar{y}_{..}$ คือค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมด

จากตารางที่ 3.3 ระดับนัยสำคัญในการทดสอบคือ α สถิติทดสอบที่ใช้คือ F ซึ่งได้จากอัตราส่วนของค่าความแปรปรวนสองค่าคือความแปรปรวนของปัจจัย และความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อน ถ้าความแปรปรวนของปัจจัยมีค่าใกล้เคียงกับความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนก็จะสนับสนุน H_0 ค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับของปัจจัยไม่แตกต่างกัน แต่ถ้าความแปรปรวนของปัจจัยมีค่ามากกว่าความแปรปรวนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนก็น่าที่จะปฏิเสธ H_0 โดยการยอมรับหรือปฏิเสธ H_0 จะเปรียบเทียบค่า F กับค่าวิกฤตคือ $F_{\alpha;a-1,(a-1)(b-1)}$ จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $F > F_{\alpha;a-1,(a-1)(b-1)}$ การคำนวณผล

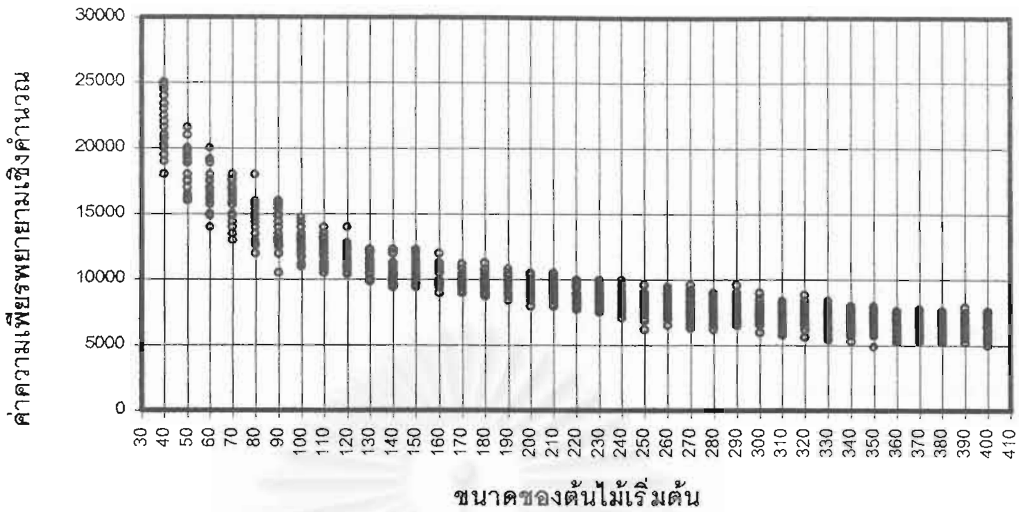
บวกกำลังสองในตารางที่ 3.3 ถูกเขียนให้อยู่ในรูปที่สามารถคำนวณได้ง่ายซึ่งมีที่มาจากสูตรคำนวณผลบวกกำลังสองในตารางที่ 3.4

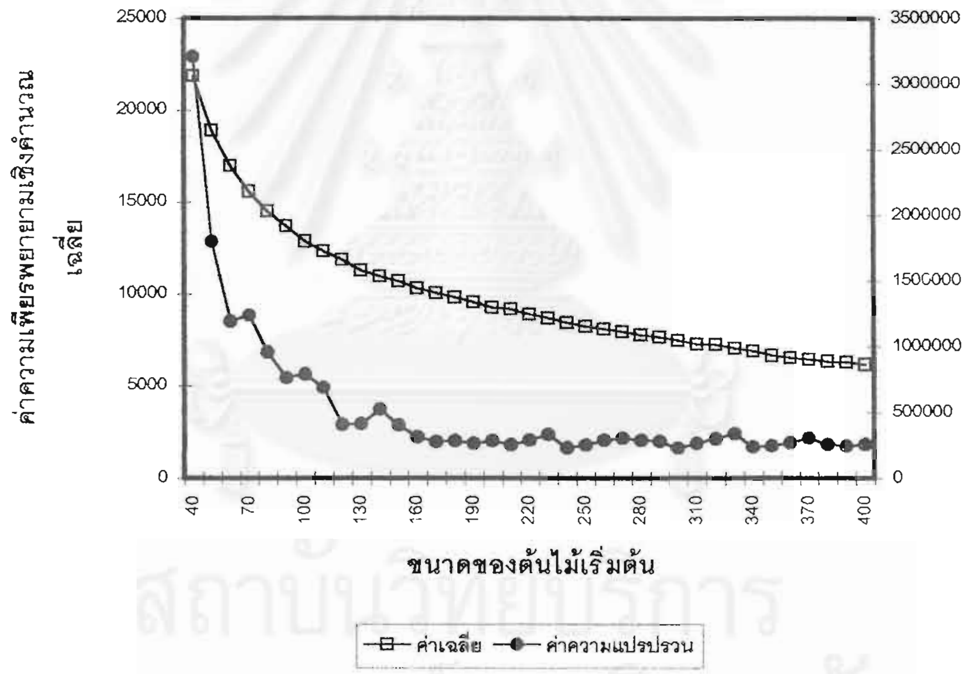
ข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณซึ่งได้จากการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 1, 2 และ 3 แสดงไว้ในภาคผนวก ข

แสดงลักษณะของข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของแต่ละสภาพแวดล้อมได้ด้วยกราฟ 3.1 ลักษณะของข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณจะมีการกระจายของข้อมูลลดลงเมื่อขนาดของต้นไม้เริ่มต้นใหญ่ขึ้นเห็นได้ชัดเจนจากกราฟทั้ง 3 รูปว่าพิสัย (range) ของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณจะกว้างมากเมื่อขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเล็กและพิสัยจะลดลงเมื่อขนาดของต้นไม้เริ่มต้นใหญ่ขึ้น หรืออาจพิจารณาจากค่าความแปรปรวนจะเห็นว่าค่าความแปรปรวนจะลดลงเมื่อขนาดของต้นไม้เริ่มต้นใหญ่ขึ้น และค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยจะลดลงเมื่อขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเพิ่มขึ้น

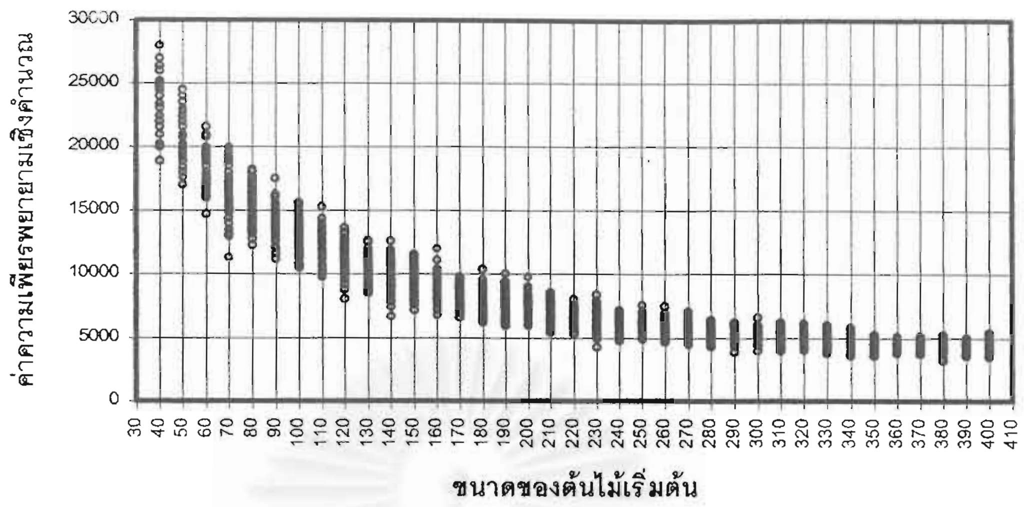
การที่ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณมีการกระจายไม่เท่ากันในแต่ละขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเป็นลักษณะที่ขัดกับข้อสมมติข้อที่ 2.1 เพราะจะทำให้ ε_{ij} มีค่าความแปรปรวนไม่เป็นค่าคงที่ ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงข้อมูล (transformation) เพื่อทำให้ข้อมูลมีลักษณะสอดคล้องกับข้อสมมติให้มากที่สุด

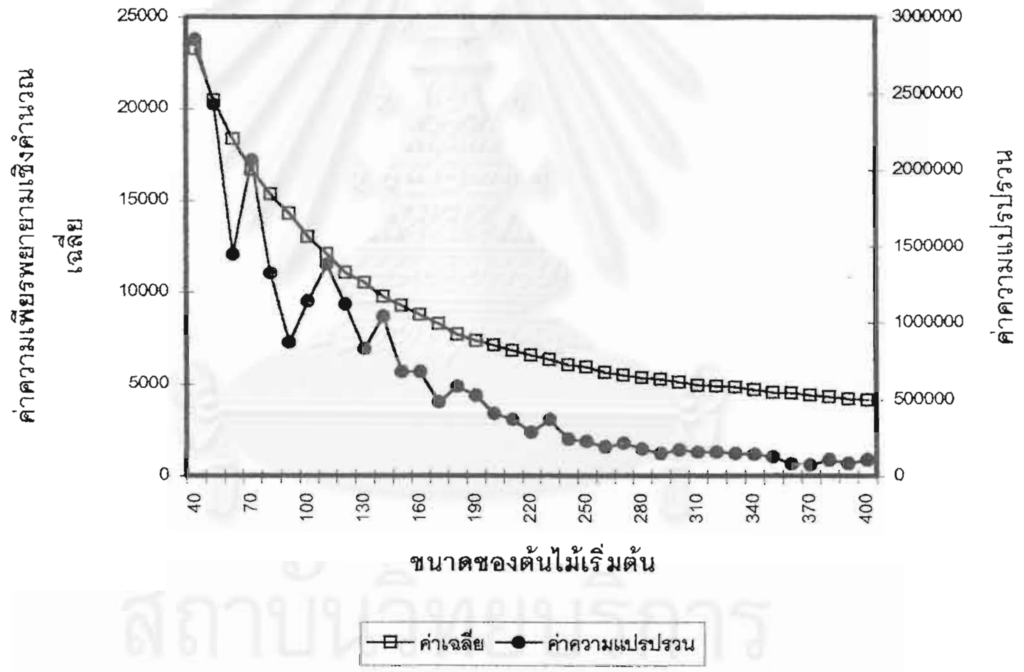
การแปลงข้อมูลทำให้ความแปรปรวนของ ε_{ij} เป็นค่าคงที่ และยังทำให้การแจกแจงของ ε_{ij} ใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติอีกด้วย จากลักษณะข้อมูลในงานวิจัยนี้พบว่าค่าความแปรปรวนแปรผันตามค่าเฉลี่ยคือเมื่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยเพิ่มขึ้นค่าความแปรปรวนของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณจะเพิ่มขึ้นด้วย จึงเลือกการแปลงข้อมูลด้วย log (common logarithm) วิธีการคือหาค่า log ฐาน 10 ของข้อมูลแต่ละตัวจากนั้นนำผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนตามปกติ จะเห็นได้ว่าการแปลงข้อมูลคือการเปลี่ยนสเกล(scale) ของข้อมูลนั่นเอง ดังนั้นหลังจากทำการวิเคราะห์ข้อมูลจึงสามารถแปลงข้อมูลกลับเพื่อรายงานผลการวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปของสเกลที่สามารถเข้าใจได้ง่าย



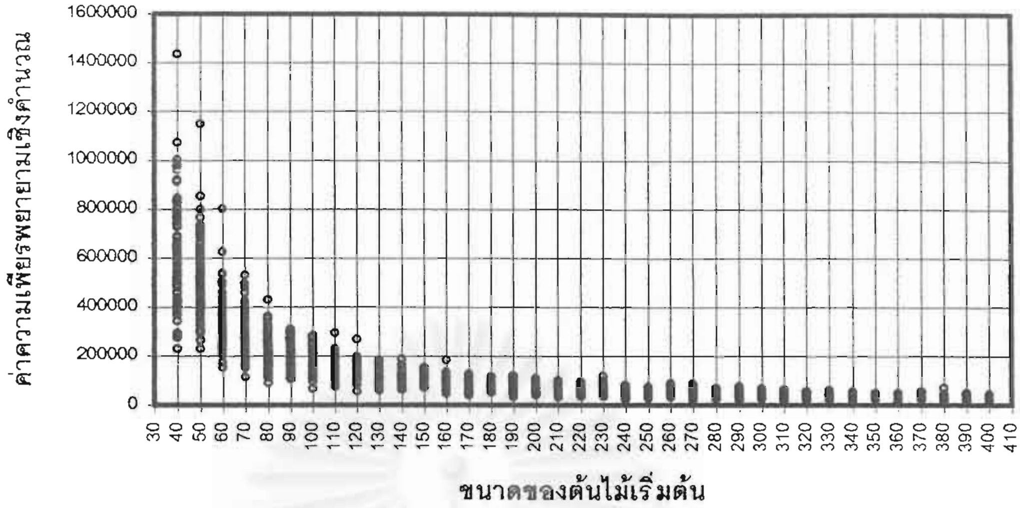


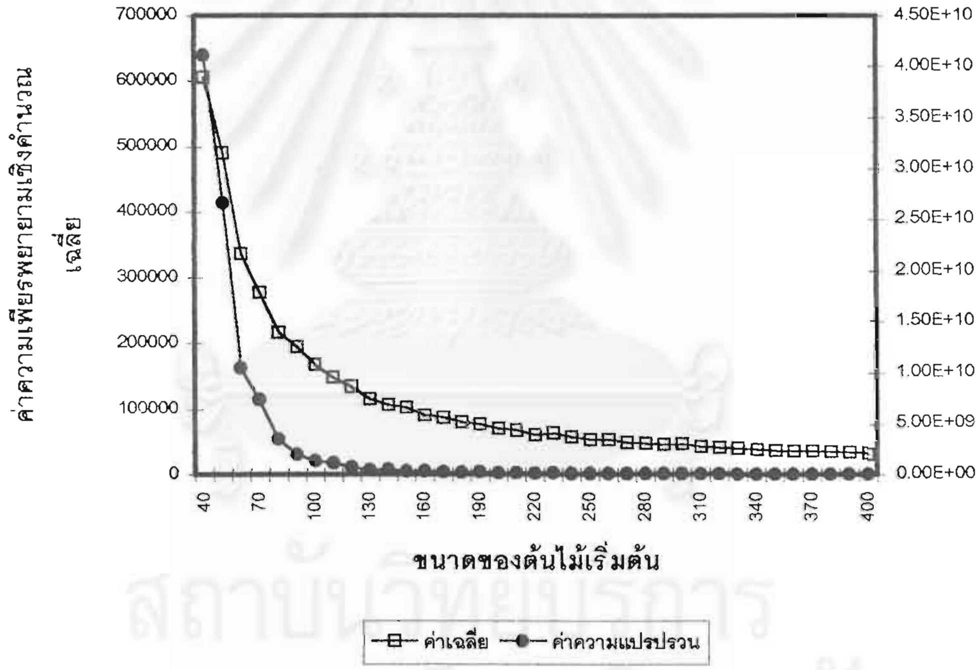
(ก) สภาพแวดล้อมที่ 1





(ข) สภาพแวดล้อมที่ 2

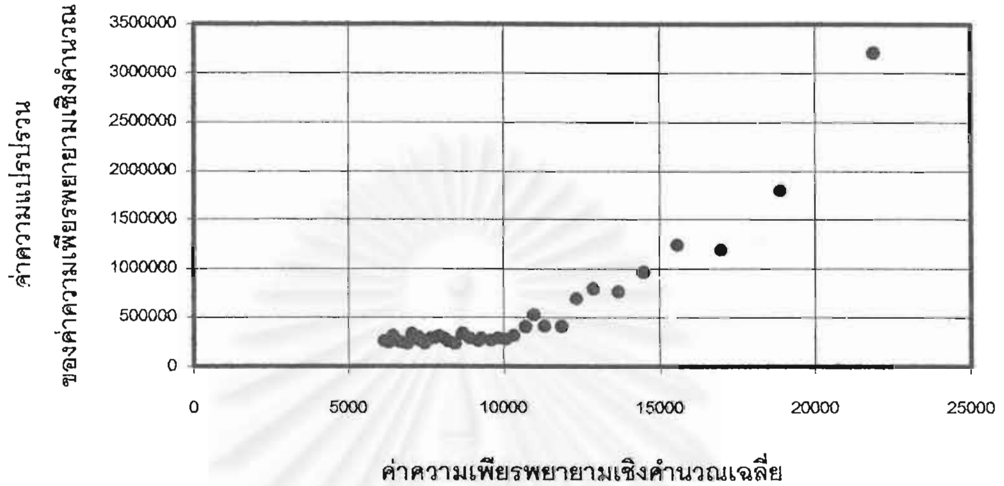




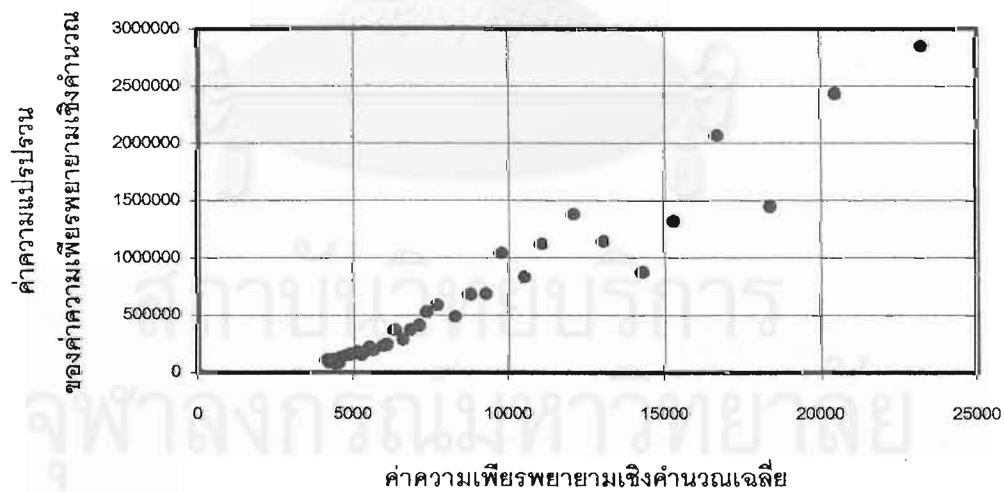
(ค) สภาพแวดล้อมที่ 3

กราฟ 3.1 ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นแต่ละระดับ และค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยกับค่าความแปรปรวนของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นแต่ละระดับ

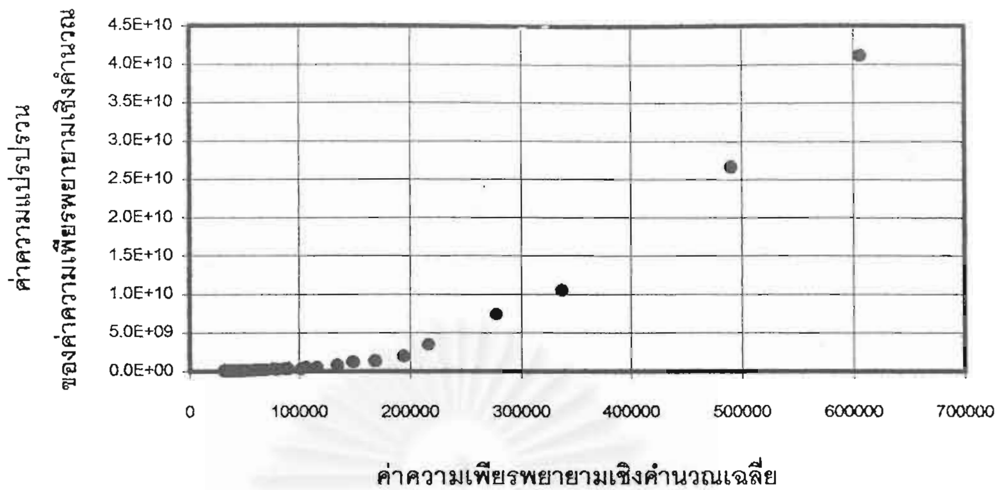
ลักษณะความสัมพันธ์ของค่าความแปรปรวนของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณกับค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยแสดงได้ด้วยกราฟ 3.2 และลักษณะของข้อมูลที่ผ่านการแปลงข้อมูลด้วย *log* แสดงด้วยกราฟ 3.3



สภาพแวดล้อมที่ 1

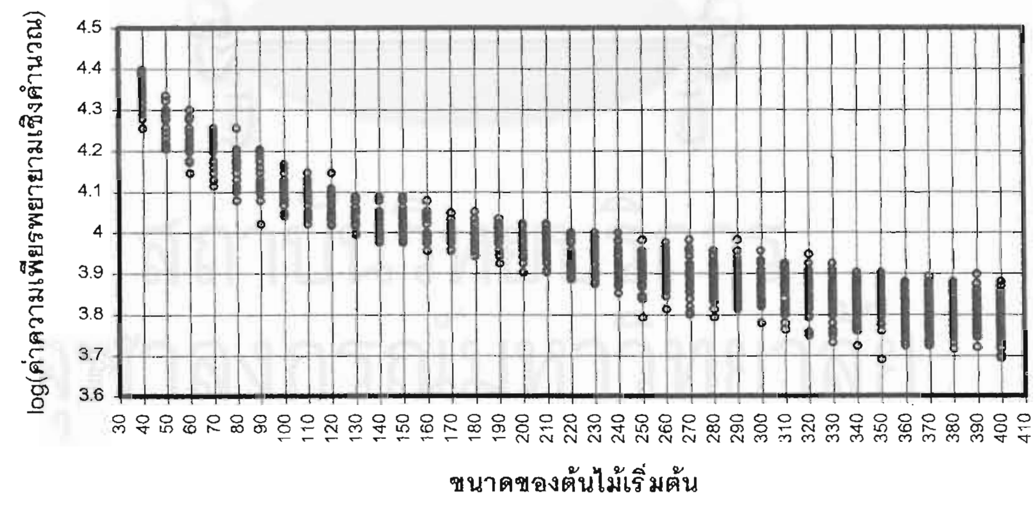


สภาพแวดล้อมที่ 2

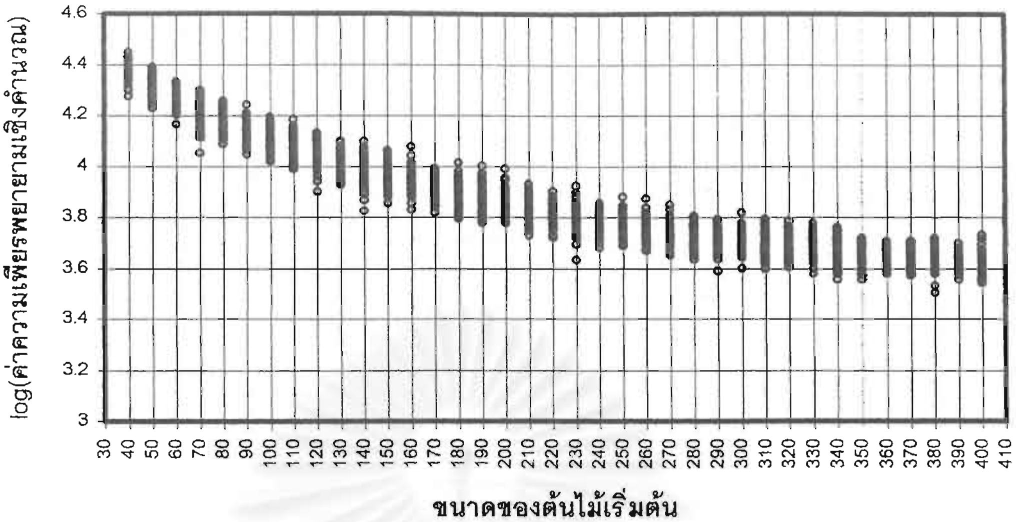


(ค) สภาพแวดล้อมที่ 3

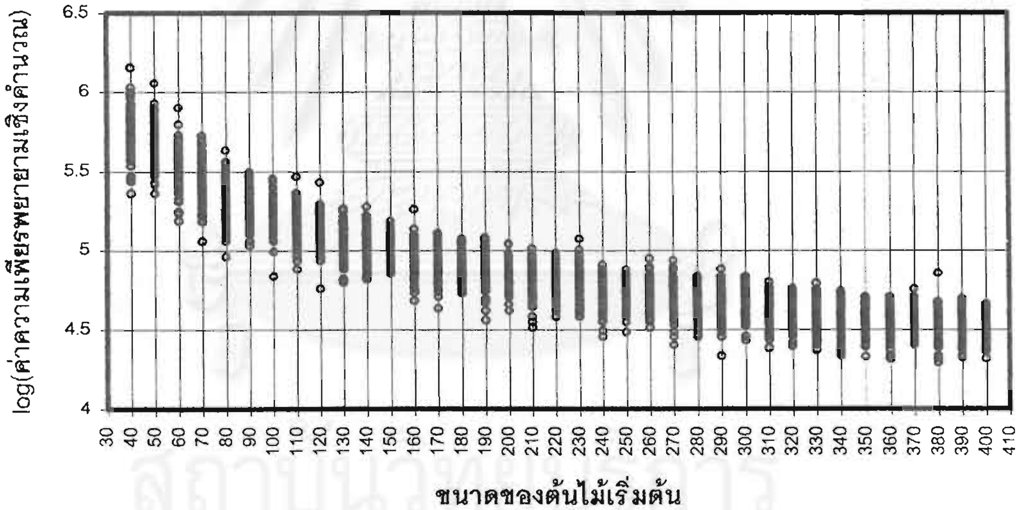
กราฟ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ย
กับค่าความแปรปรวนของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ



(ก) สภาพแวดล้อมที่ 1



(ข) สภาพแวดล้อมที่ 2



(ค) สภาพแวดล้อมที่ 3

กราฟ 3.3 ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ผ่านการแปลงข้อมูลด้วย log ฐาน 10

นำค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ผ่านการแปลงข้อมูลแล้วมาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยการคำนวณค่าสถิติทดสอบตามสูตรคำนวณในตารางที่ 3.3 ผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางต่อไปนี้

แหล่งความแปรปรวน	*df*	*SS*	*MS*	*F*	*P-value*	$F_{0.05;36,3774}$
ระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้น	36	76.4561	2.12378	2836.13	0	1.41984
ระหว่างชุดของพารามิเตอร์	104	0.56593	0.00544	7.26684	1.2E-88	1.24291
ความคลาดเคลื่อน	3744	2.80362	0.00075			
ผลรวม	3884	79.8256				

ตารางที่ 3.5 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 1

จากตารางที่ 3.5 เมื่อกำหนด $\alpha = 0.05$ ค่าวิกฤตคือ $F_{0.05;36,3774} = 1.41984$ เนื่องจากค่า F ที่คำนวณได้จากข้อมูลมีค่าเท่ากับ $2,836.13$ ซึ่งมากกว่าค่าวิกฤตดังนั้นจึงปฏิเสธ $H_0 : \mu_{40} = \mu_{50} = \ldots = \mu_{400}$ และยอมรับ $H_1 : \mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่ เมื่อ $i \neq j$ จึงสรุปได้ว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ต่างกันมีผลทำให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

แหล่งความแปรปรวน	*df*	*SS*	*MS*	*F*	*P-value*	$F_{0.05;36,3774}$
ระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้น	36	175.376	4.87156	3887.28	0	1.41984
ระหว่างชุดของพารามิเตอร์	104	0.23755	0.00228	1.82264	1E-06	1.24291
ความคลาดเคลื่อน	3744	4.69201	0.00125			
ผลรวม	3884	180.306				

ตารางที่ 3.6 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 2

จากตารางที่ 3.6 เมื่อกำหนด $\alpha = 0.05$ ค่าวิกฤตคือ $F_{0.05;36,3774} = 1.41984$ เนื่องจากค่า F ที่คำนวณได้จากข้อมูลมีค่าเท่ากับ $3,887.28$ ซึ่งมากกว่าค่าวิกฤตดังนั้นจึงปฏิเสธ $H_0 : \mu_{40} = \mu_{50} = \ldots = \mu_{400}$ และยอมรับ $H_1 : \mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่ เมื่อ

$i \neq j$ จึงสรุปได้ว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ต่างกันมีผลทำให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น *95%*

แหล่งความแปรปรวน	***df***	***SS***	***MS***	***F***	***P-value***	$F_{0.05;36,3774}$
ระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้น	36	431.497	11.986	1426.93	0	1.41984
ระหว่างชุดของพารามิเตอร์	104	1.56534	0.01505	1.79186	2.1E-06	1.24291
ความคลาดเคลื่อน	3744	31.4491	0.0084			
ผลรวม	3884	464.511				

ตารางที่ 3.7 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 3

จากตารางที่ 3.7 เมื่อกำหนด $\alpha = 0.05$ ค่าวิกฤตคือ $F_{0.05;36,3774} = 1.41984$ เนื่องจากค่า F ที่คำนวณได้จากข้อมูลมีค่าเท่ากับ *1,426.93* ซึ่งมากกว่าค่าวิกฤตดังนั้นจึงปฏิเสธ $H_0 : \mu_{40} = \mu_{50} = \ldots = \mu_{400}$ และยอมรับ $H_1 : \mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่ เมื่อ $i \neq j$ จึงสรุปได้ว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ต่างกันมีผลทำให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น *95%*

จากการทดสอบสมมติฐานพบว่าผลสรุปที่ได้เหมือนกันเมื่อรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ภายใต้สภาพแวดล้อมแขนหุ่นยนต์ทั้ง 3 สภาพแวดล้อม แต่จะต้องตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลก่อนที่จะนำผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้อ้างอิง

4. ตรวจสอบความถูกต้องของโมเดล

จากรายละเอียดเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้กล่าวถึงการกำหนดโมเดลและข้อสมมติของโมเดลไว้ในข้อ 1 และ 2 ตามลำดับ และดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าความเชื่อถือได้ของผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลว่าเป็นไปตามข้อสมมติหรือไม่ ดังนั้นจึงควรตรวจสอบข้อสมมติที่กำหนดไว้ว่าสอดคล้องหรือไม่กับข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน แล้วจึงเชื่อมั่นและใช้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการอ้างอิงสรุปผลการทดลอง

วิธีการตรวจสอบข้อสมมติใช้การตรวจสอบ residual (e_{ij}) โดยกำหนด residual สำหรับค่าสังเกตของปัจจัยระดับที่ i กลุ่มที่ j ไว้ดังนี้

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}$$

โดยที่ $\hat{y}_{ij}$ คือค่าพยากรณ์ของ y_{ij} และคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \hat{y}_{ij} &= \hat{\mu} + \hat{\tau}_i + \hat{\beta}_j \\ &= \bar{y}_{..} + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) + (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..}) \\ &= \bar{y}_{i.} + \bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..} \end{aligned}$$

โดยที่ $\hat{\mu}$ คือค่าประมาณของค่าเฉลี่ยโดยทั่วไป ซึ่งเท่ากับ $\bar{y}_{..}$

$\hat{\tau}_i$ คือค่าประมาณของค่าพารามิเตอร์แสดงผลที่ได้รับจากปัจจัยระดับที่ i ซึ่งเท่ากับ $(\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})$

$\hat{\beta}_j$ คือค่าประมาณของค่าพารามิเตอร์แสดงผลที่ได้รับจากกลุ่มที่ j ซึ่งเท่ากับ $(\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..})$

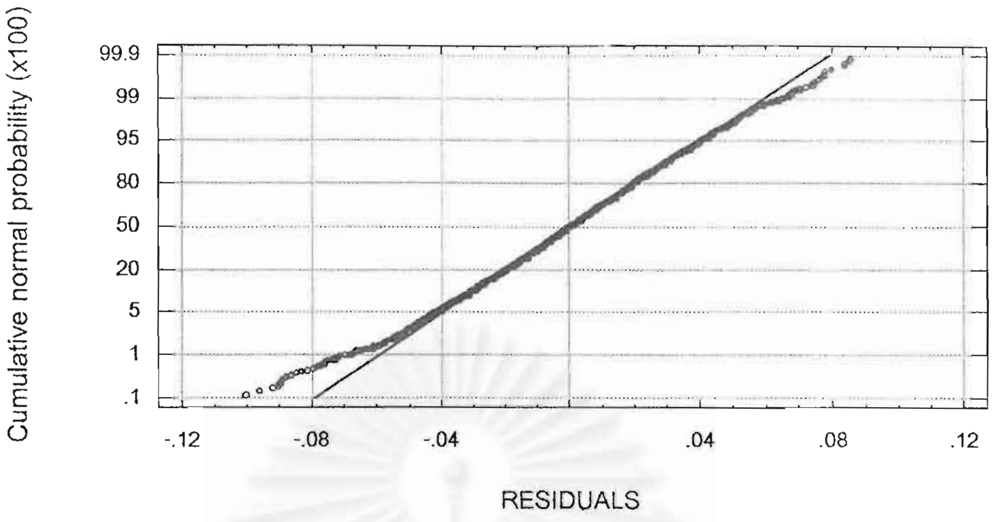
$\bar{y}_{i.}$ คือค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตที่ได้รับปัจจัยระดับที่ i

$\bar{y}_{.j}$ คือค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตในกลุ่มที่ j

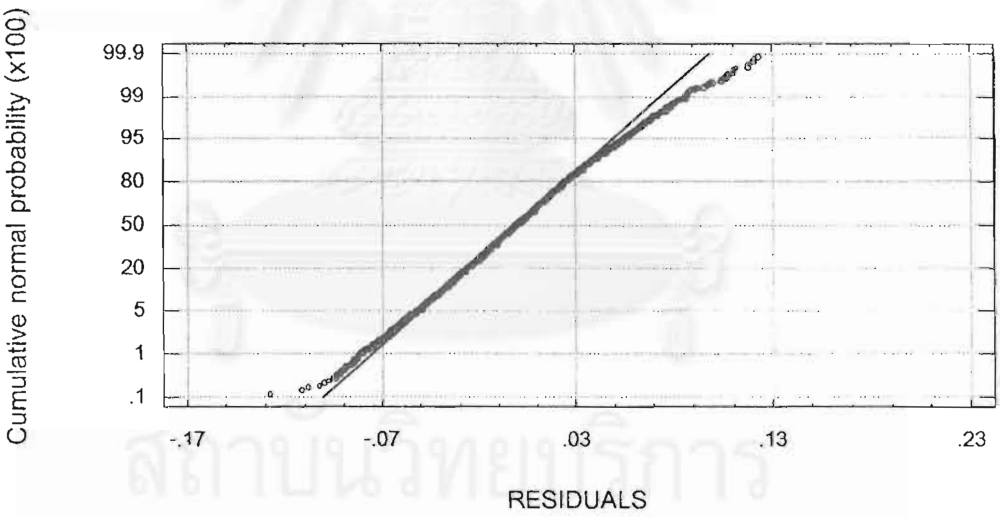
$\bar{y}_{..}$ คือค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมด

การตรวจสอบ residual ทำโดยการสร้างกราฟของ residual กับตัวแปรต่างๆ ดังนี้

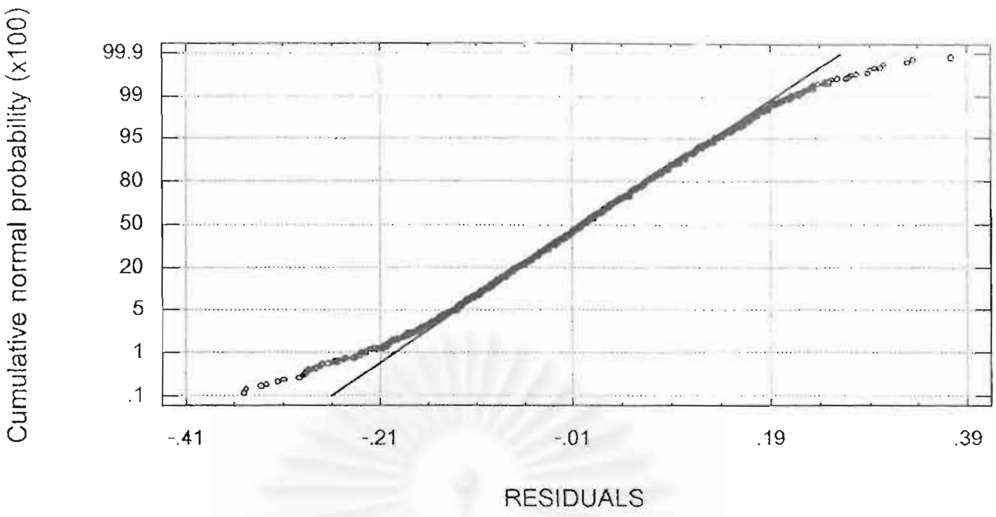
4.1 การตรวจสอบว่า ε_{ij} มีการแจกแจงแบบปกติด้วยค่าเฉลี่ย 0 และค่าความแปรปรวน σ^2 ทำได้โดยสร้างกราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติสำหรับค่า residual (normal probability plot for residual) หาก ε_{ij} มีการแจกแจงแบบปกติกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตามหากมีลักษณะเบี่ยงเบนจากเส้นตรงไปบ้างก็ไม่ถือว่าเป็นการผิดข้อสมมติที่รุนแรง แต่ถ้าค่า residual ส่วนใหญ่ไม่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงจะถือว่าผิดจากข้อสมมติและต้องทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติม จากกราฟ 3.4 แกนตั้งคือค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของการแจกแจงแบบปกติ (the cumulative distribution function of a Normal distribution) คูณด้วย 100 แกนนอนคือค่าของ residual เส้นตรงสีแดงใช้คาดคะเนว่าค่า residual มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงหรือไม่ โดยเส้นคาดคะเนนี้จะลากผ่านค่ามัธยฐาน , ค่าควอไทล์ 1 และค่าควอไทล์ 3



(ก) สภาพแวดล้อมที่ 1



(ข) สภาพแวดล้อมที่ 2



(ค) สภาพแวดล้อมที่ 3

กราฟ 3.4 ความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติสำหรับค่า residual

กราฟ 3.4 (ก), (ข) และ (ค) มีลักษณะเหมือนกันคือทางด้านซ้ายของกราฟค่า **residual** เรียงตัวโค้งขึ้นแสดงว่าการแจกแจงของค่า **residual** มีความหนาที่ปลายซ้ายมากกว่าที่ควรจะเป็นสำหรับโค้งปกติ และด้านขวาของกราฟ 3.4 ค่า **residual** เรียงตัวในลักษณะโค้งลงแสดงว่าการแจกแจงของค่า **residual** มีความหนาที่ปลายขวาน้อยกว่าที่ควรจะเป็นสำหรับการแจกแจงแบบปกติ ลักษณะดังกล่าวไม่ได้ทำให้ค่า **residual** มีการแจกแจงผิดไปจากการแจกแจงแบบปกติมากนัก จึงไม่มีผลกระทบต่อการวิเคราะห์ความแปรปรวน

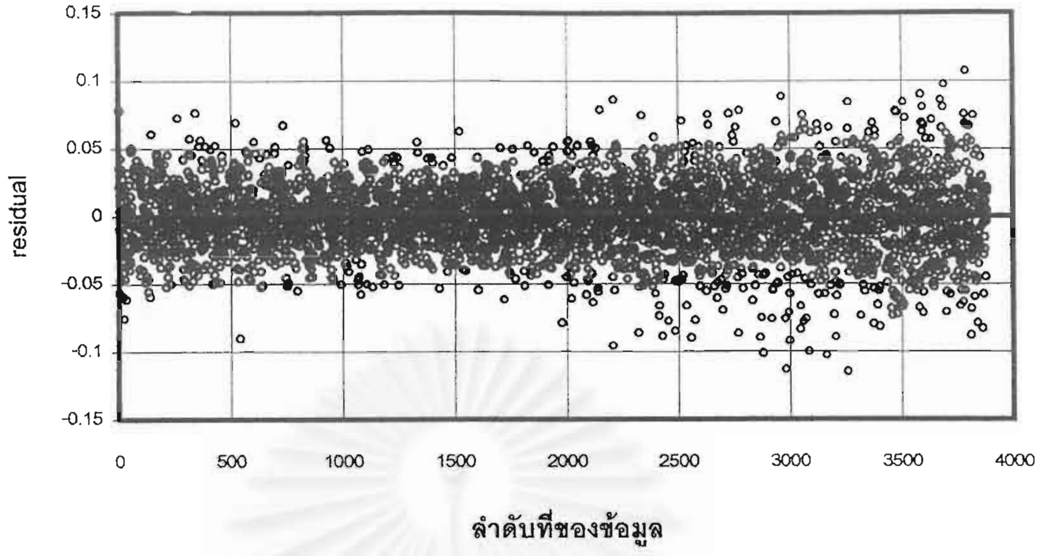
4.2 การตรวจสอบว่า ε_{ij} เป็นอิสระต่อกันทำได้โดยพล็อต (**plot**) ค่า **residual** ของแต่ละข้อมูลกับลำดับเวลาที่ได้รับข้อมูลนั้น จุดมุ่งหมายในการใช้ลำดับเวลาคือเพื่อตรวจสอบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้รับในเวลาใกล้กันมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ เช่น ในบางการทดลองเมื่อเวลาผ่านไปผู้ทำการทดลองมีความชำนาญในการทำการทดลองมากขึ้นจึงมีผลทำให้ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองลดลง หรือบางครั้งเมื่อเวลาผ่านไปสภาพแวดล้อมในการทดลองเปลี่ยนไปอาจทำให้ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้ลำดับของข้อมูลแทนลำดับเวลาโดยกำหนดลำดับของข้อมูลจาก **1** ถึง **3,885** โดยจะเรียงลำดับข้อมูลตามขนาดของต้นไม้เริ่มต้นและชุดของ

พารามิเตอร์ ดังนั้นข้อมูลลำดับที่ 1 คือค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 40 โหนดใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 1 ในการรันโปรแกรม, ข้อมูลลำดับที่ 2 คือค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 40 โหนดใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 2 ในการรันโปรแกรม เป็นดังนี้จนกระทั่งถึงข้อมูลลำดับที่ 3,885 ซึ่งคือข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 400 โหนดใช้พารามิเตอร์ชุดที่ 105 ในการรันโปรแกรม การใช้ลำดับของข้อมูลแทนลำดับเวลาเนื่องจากในขณะที่ทำการทดลองผู้วิจัยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องในการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมสำหรับแต่ละขนาดของต้นไม้เริ่มต้นโดยจะทำการรันโปรแกรมไปพร้อมๆ กันทุกเครื่อง และแต่ละเครื่องจะรันโปรแกรมเรียงตามชุดของพารามิเตอร์ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณจึงน่าจะสัมพันธ์กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการรันโปรแกรมและลำดับเวลาที่ได้รับผลการรันโปรแกรมซึ่งก็คือลำดับของชุดของพารามิเตอร์นั่นเอง

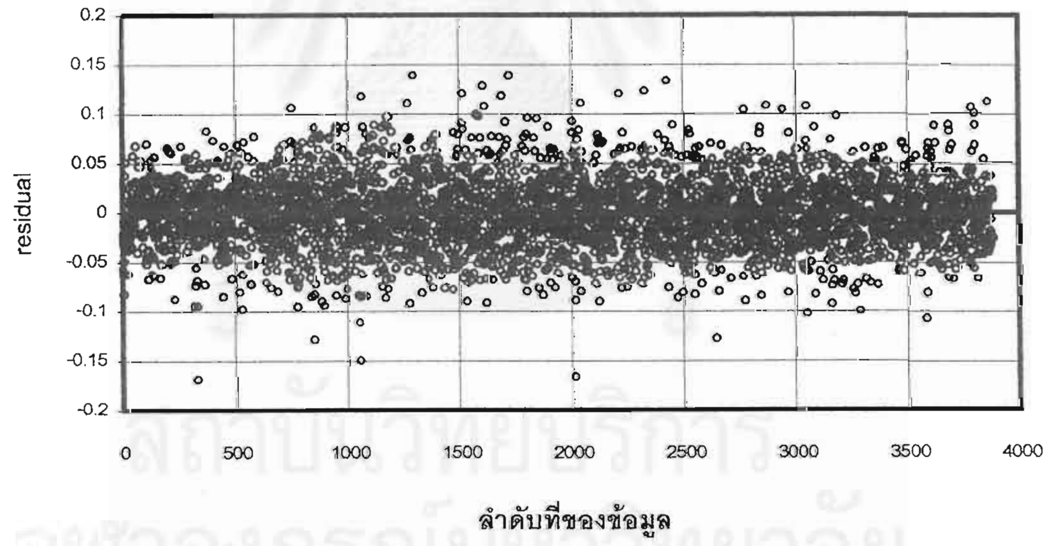
ลักษณะของกราฟที่ได้ควรจะมีการกระจายของ residual อย่างสม่ำเสมอ และไม่แสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเวลา การกระจายอย่างสม่ำเสมอของ residual ยังแสดงถึงความคงที่ของค่าความแปรปรวนของ ε_{ij} ด้วย หาก residual มีการกระจายเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเวลาผ่านไปลักษณะกราฟที่ได้จะคล้ายรูปกรวยคือมีปลายด้านใดด้านหนึ่งบานกว่าอีกด้าน

จากกราฟ 3.5 แสดงค่าของ residual ตามลำดับของข้อมูลพบว่าไม่มีลักษณะที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกันและมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นแต่ละ ε_{ij} จึงเป็นอิสระต่อกันและมีค่าความแปรปรวนคงที่

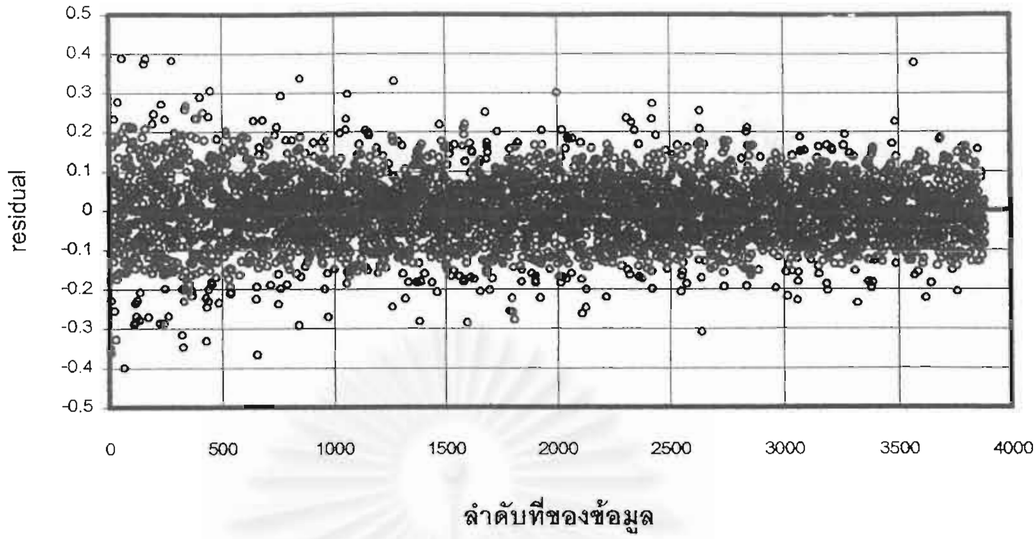
4.3 การตรวจสอบความสัมพันธ์ของ ε_{ij} กับค่าพยากรณ์ ทำได้โดยพล็อตค่า residual กับค่าพยากรณ์ $\hat{y}_{ij}$ จุดมุ่งหมายในการตรวจสอบคือเพื่อสังเกตรูปแบบของ ε_{ij} เนื่องจาก ε_{ij} ไม่ควรมีความสัมพันธ์กับค่าพยากรณ์ ลักษณะของกราฟที่ได้ควรจะมีการกระจายของค่า residual อย่างสม่ำเสมอ หาก ε_{ij} มีความสัมพันธ์กับค่าพยากรณ์กราฟที่ได้อาจมีลักษณะเป็น Curvilinear Shape ตัวอย่างเช่น residual มีค่าเป็นลบเมื่อ $\hat{y}_{ij}$ มีค่าน้อย แล้ว residual กลับมีค่าเป็นบวกเมื่อ $\hat{y}_{ij}$ มีค่าปานกลาง จากนั้น residual กลับมีค่าเป็นลบอีกเมื่อ $\hat{y}_{ij}$ มีค่าสูง กราฟที่มีลักษณะดังกล่าวแสดงว่ากลุ่มและปัจจัยมีผลกระทบซึ่งกันและกัน นอกจากนี้กราฟอาจมีลักษณะคล้ายรูปกรวยปลายเปิดหาก ε_{ij} มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับการเพิ่มของค่า $\hat{y}_{ij}$ หรือการที่กราฟมีลักษณะเป็นรูปกรวยอาจเป็นเพราะค่าสังเกตไม่มีการแจกแจงแบบปกติ เนื่องมาจากการแจกแจงของค่าสังเกตมีความเบ้



(ก) สภาพแวดล้อมที่ 1



(ข) สภาพแวดล้อมที่ 2



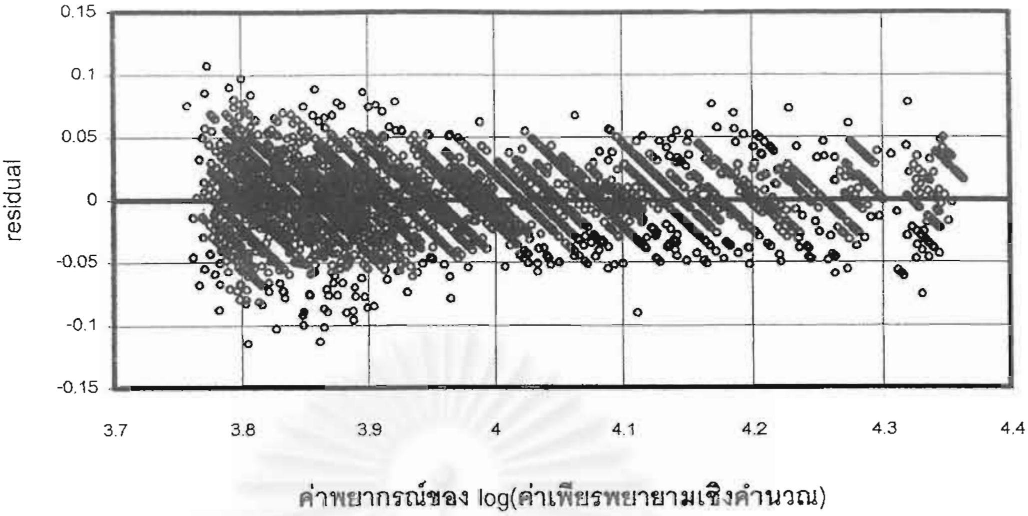
(ค) สภาพแวดล้อมที่ 3

กราฟ 3.5 ค่า residual ตามลำดับที่ของข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ

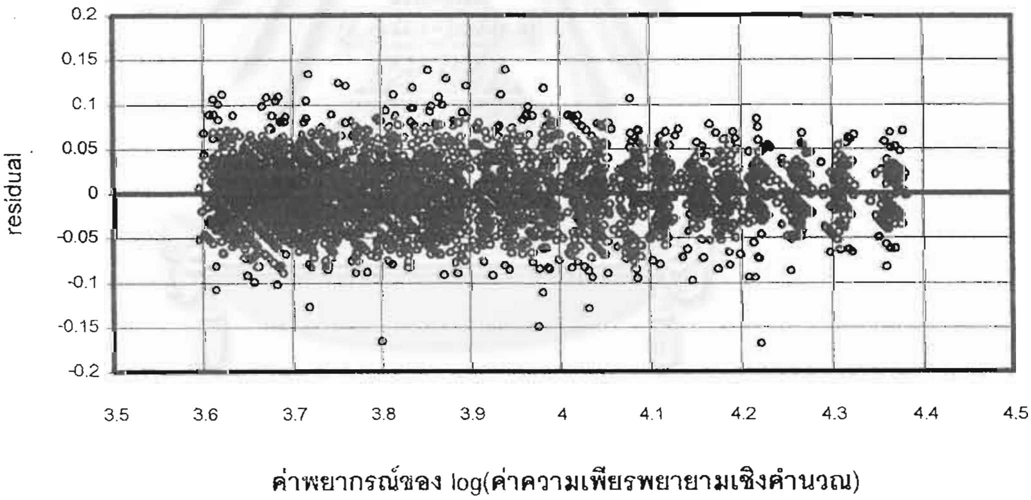
ซึ่งจะทำให้ค่าความแปรปรวนของค่าสังเกตมีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยของค่าสังเกต ทั้งสองสาเหตุนี้ทำให้ ε_{ij} มีค่าความแปรปรวนไม่คงที่ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการแปลงข้อมูลเนื่องจากค่าความแปรปรวนของค่าสังเกตมีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตไปแล้ว ดังนั้นกราฟที่ได้จึงไม่ควรมีลักษณะเป็นรูปกรวย

อย่างไรก็ตามหากข้อมูลจะมีลักษณะผิดไปจากข้อสมมติที่ว่า ε_{ij} มีค่าความแปรปรวนคงที่ก็จะมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อ fixed effects model ในกรณีที่มีจำนวนหน่วยทดลองเท่ากันทุกระดับของปัจจัยการที่ข้อมูลไม่เป็นไปตามข้อสมมติจะไม่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์มากนัก

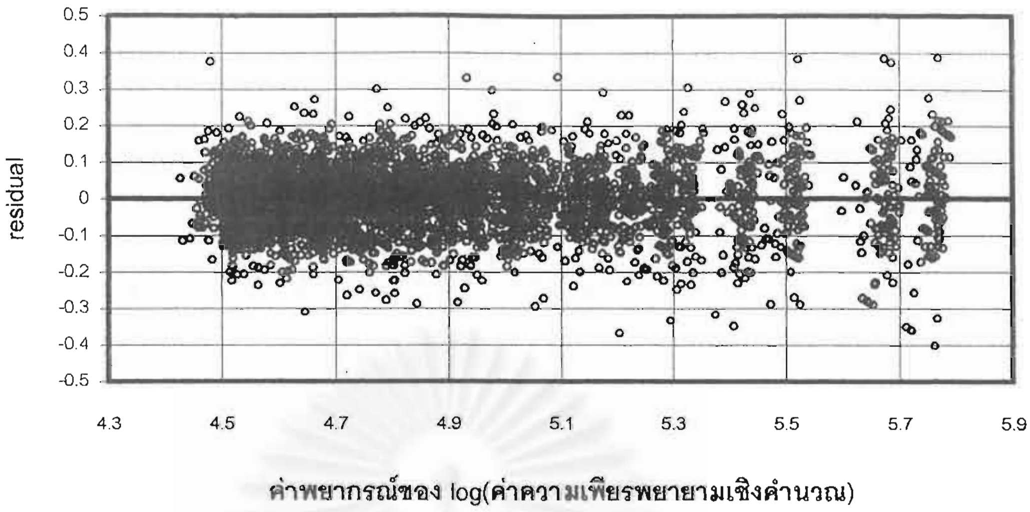
จากกราฟ 3.6 พบว่าค่า residual มีลักษณะกระจายสม่ำเสมอและไม่แสดงลักษณะของความสัมพันธ์ใดๆ แสดงว่าการแปลงข้อมูลช่วยทำให้ค่าความแปรปรวนของ ε_{ij} มีความคงที่มากขึ้น



(ก) สภาพแวดล้อมที่ 1



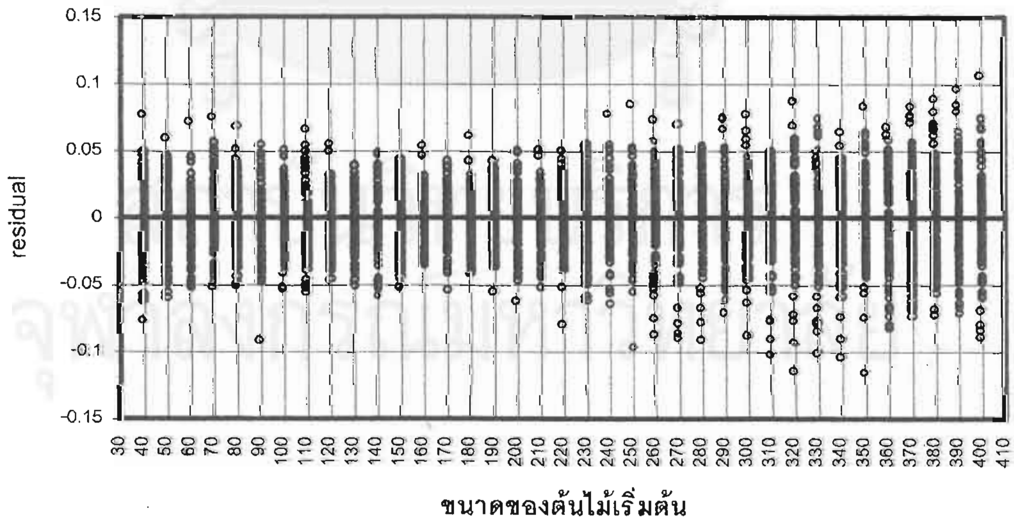
(ข) สภาพแวดล้อมที่ 2



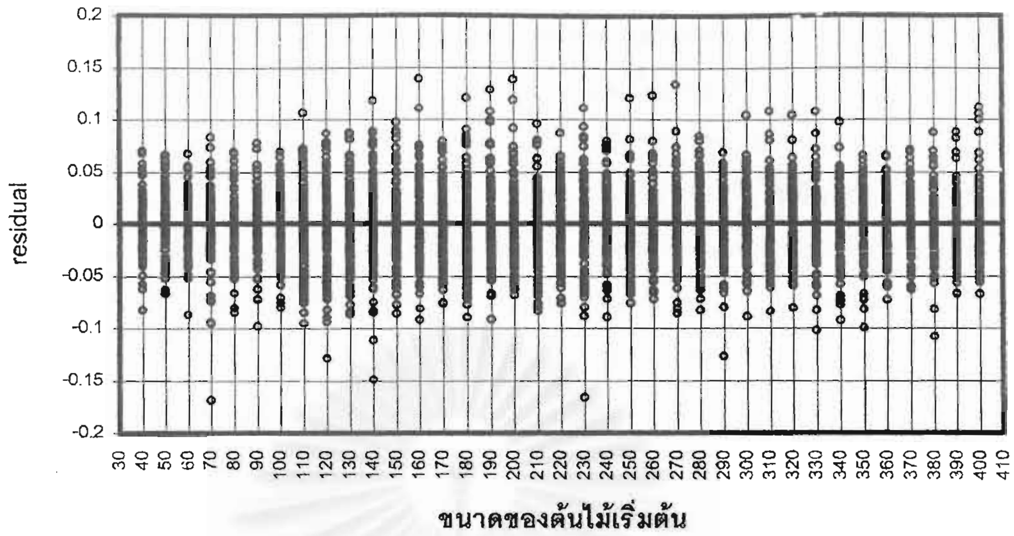
(ค) สภาพแวดล้อมที่ 3

กราฟ 3.6 ความสัมพันธ์ของค่า residual กับค่าพยากรณ์

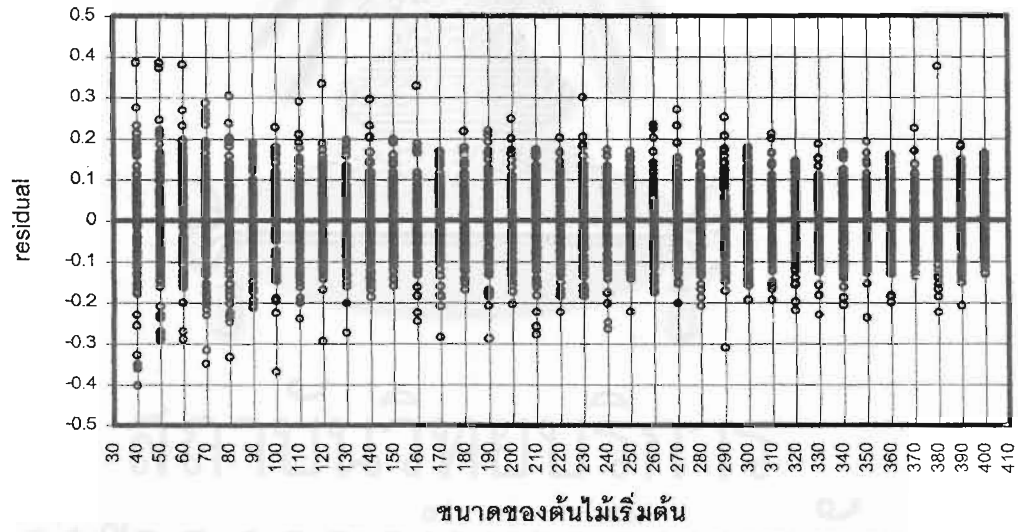
4.4 การตรวจสอบว่า ε_{ij} มีค่าความแปรปรวนคงที่ ทำโดยการทำได้โดยพล็อตค่า residual กับค่าของปัจจัยแต่ละระดับ หาก ε_{ij} มีค่าความแปรปรวนคงที่กราฟที่ได้ควรมีการกระจายของ residual เท่ากันทุกระดับของปัจจัย จากกราฟ 3.7 การกระจายของค่า residual ในแต่ละระดับของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นค่อนข้างเท่ากัน



(ก) สภาพแวดล้อมที่ 1



(ข) สภาพแวดล้อมที่ 2



(ค) สภาพแวดล้อมที่ 3

กราฟ 3.7 ค่า residual ในแต่ละระดับของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น

จากการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ผ่านการแปลงข้อมูลด้วย log ฐาน 10 มีลักษณะค่อนข้างสอดคล้องกับข้อสมมติ อย่างไรก็ตามเนื่องจากในงานวิจัยนี้เลือกใช้ fixed effects model ในการอธิบายข้อมูลและมีจำนวนหน่วยทดลองเท่ากันทุกระดับของปัจจัย การที่ ε_{ij} ไม่มีการแจกแจงแบบปกติเนื่องมาจากการแจกแจงมีความเบ้ หรือค่าความแปรปรวนของ ε_{ij} ไม่คงที่จึงไม่มีผลกระทบมากนัก เพราะการวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้สถิติทดสอบ F ซึ่งมีความทนทานต่อการที่ข้อมูลไม่มีการแจกแจงแบบปกติและมีความทนทานต่อการที่ข้อมูลมีค่าความแปรปรวนไม่เท่ากัน หากมีจำนวนหน่วยทดลองเท่ากัน ผลกระทบที่ได้รับจากการไม่เป็นไปตามข้อสมมติจึงเป็นเพียงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเล็กน้อยของระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ เช่นหากกำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ระดับนัยสำคัญจริงอาจจะเป็น 0.04 หรือ 0.065 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในงานวิจัยนี้จึงเชื่อถือได้ที่ระดับความเชื่อมั่นที่กำหนดไว้นั่นคือขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีผลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยด้วยความเชื่อมั่น 95% ในแต่ละสภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์

3.4 การทดสอบสมมติฐานข้อ 2.

เนื่องจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนปฏิเสธ H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ และยอมรับ H_1 นั่นคือยอมรับว่ามีความแตกต่างของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้นอย่างน้อย 1 คู่ จึงต้องการหาว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นคู่ใดบ้างที่แตกต่างกัน และแตกต่างกันในลักษณะใด เนื่องจากผู้วิจัยสันนิษฐานว่าเมื่อกำหนดให้ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีขนาดเพิ่มขึ้นค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณจะลดลง จึงได้ทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติต่อไปนี้

$$H_0 : \mu_d = 0 \qquad ; \mu_d = \mu_i - \mu_j \text{ และ } i < j$$
$$H_1 : \mu_d > 0 \qquad ; \mu_d = \mu_i - \mu_j \text{ และ } i < j$$

μ_i และ μ_j คือค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยจากประชากรที่มีขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเท่ากับ i และ j โดยกำหนดให้ i, j มีค่าตั้งแต่ 40 - 400 โหนด และขนาดของต้นไม้เริ่มต้นต่างกันระดับละ 10 โหนด

โดยต้องทำการทดสอบสมมติฐานทั้งสิ้น 666 คู่ในแต่ละสภาพแวดล้อม กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ α หารด้วยจำนวนคู่ของสมมติฐาน $= \dfrac{0.05}{666} = 7.51 \times 10^{-5}$ ที่กำหนดระดับนัยสำคัญแบบนี้เพราะว่าถ้ากำหนดให้ $\alpha = 0.05$ ในการทดสอบสมมติฐานแต่ละคู่ ระดับความเชื่อมั่นของการทดสอบสมมติฐานแต่ละคู่จะเท่ากับ $1-\alpha = 0.95$ เนื่องจากการทดสอบสมมติฐานแต่ละคู่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานทั้ง 666 คู่จึงไม่สามารถตัดสินได้ว่าจะใช้ระดับความเชื่อมั่นของสมมติฐานคู่ใดยืนยันความเชื่อมั่นของการทดสอบสมมติฐานทุกคู่ จึงกำหนดระดับนัยสำคัญที่ทำให้ความน่าจะเป็นร่วมในการยอมรับ H_0 เมื่อ H_0 จริงไม่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดคือ $1-\alpha = 0.95$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการกำจัดอิทธิพลของตัวแปรอื่นที่มีผลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเช่นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรม ซึ่งไม่ใช่ตัวแปรที่สนใจศึกษาผลกระทบ ดังนั้นจึงใช้การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรแบบจับคู่ โดยจับคู่ระหว่างค่าสังเกตที่มีลักษณะเหมือนกันของแต่ละระดับของปัจจัย แล้วหาค่าความแตกต่าง d_k ของแต่ละคู่ ในงานวิจัยนี้จับคู่ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ได้จากพารามิเตอร์ในการรันโปรแกรมชุดเดียวกันระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้นสองระดับ (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ) จากนั้นนำค่าความแตกต่างที่ได้มาคำนวณค่าสถิติทดสอบ

ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น i โหนด		ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น j โหนด
y_{i1}	d_1	y_{j1}
y_{i2}	d_2	y_{j2}
y_{i3}	d_3	y_{j3}
$\vdots$		$\vdots$
y_{i105}	d_{105}	y_{j105}

รูปที่ 3.1 แสดงแนวคิดในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแบบจับคู่

คำนวณค่าสถิติทดสอบได้ดังนี้

$$t = \frac{\bar{d} - d_0}{S_d / \sqrt{n}}$$

ให้ y_{ik} และ y_{jk} เป็นค่าสังเกตคู่ที่ k จากปัจจัยระดับที่ i และ j ตามลำดับ

$d_k = y_{ik} - y_{jk} \quad ; \; k = 1,2,3,\ldots,n$

$\bar{d} = \dfrac{\sum_{k=1}^{n} d_k}{n}$ คือค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่าง 2 กลุ่มที่ได้จากตัวอย่าง

$S_d^2 = \dfrac{\sum_{k=1}^{n} \left(d_k - \bar{d}\right)^2}{n-1}$ คือค่าความแปรปรวนจากตัวอย่าง

d_0 คือค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่าง 2 กลุ่มที่ได้จากประชากร หรือคือค่าคงที่ที่กำหนดไว้ใน $H_0 : \mu_i - \mu_j = d_0$ โดยให้ $\mu_d = \mu_i - \mu_j$ แทนที่ μ_d ลงใน H_0 ได้เป็น $H_0 : \mu_d = d_0$

<u>เขตปฏิเสธ</u> จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $t > t_{1-\alpha}$ สำหรับ $H_1 : \mu_d > 0$ โดย $t_{1-\alpha}$ มีองศาอิสระ $n-1$ โดย n คือจำนวนผลต่าง และ α คือระดับนัยสำคัญซึ่งในการทดสอบนี้กำหนดให้เท่ากับ 7.51×10^{-5}

<u>ข้อสมมติ</u> d_k ; $k = 1,2,3,\ldots,n$ เป็นอิสระต่อกันและมีการแจกแจงแบบปกติด้วยค่าเฉลี่ย μ และค่าความแปรปรวน σ^2

จากทฤษฎีลิมิตสู่ส่วนกลาง (central limit theorem) ซึ่งกล่าวว่า *"เมื่อสุ่มตัวอย่างขนาด n จากประชากรที่มีค่าเฉลี่ย μ และค่าความแปรปรวน σ^2 ถ้าตัวอย่างมีขนาดใหญ่ค่าเฉลี่ยจากตัวอย่างจะมีการแจกแจงเข้าสู่การแจกแจงแบบปกติด้วยค่าเฉลี่ย μ และค่าความแปรปรวน σ^2/n"* ในการทดสอบสมมติฐานทุกคู่แต่ละคู่มีจำนวนผลต่าง $n = 105$ ซึ่งเปรียบได้กับจำนวนตัวอย่างที่สุ่มมาจากประชากร และเนื่องจากจำนวนตัวอย่างมีขนาดใหญ่ ($n > 30$) จึงสรุปได้ว่า $\bar{d}$ มีการแจกแจงแบบปกติโดยไม่ต้องคำนึงถึงว่า d_k ; $k = 1,2,3,\ldots,105$ มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ และทำให้สามารถสรุปผลการทดสอบสมมติฐานได้โดยไม่ต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมติก่อนที่จะนำผลการทดสอบไปใช้อ้างอิง

ผลการทดสอบสมมติฐาน

$H_0 : \mu_d = 0$; $\mu_d = \mu_i - \mu_j$ และ $i < j$

$H_1 : \mu_d > 0$; $\mu_d = \mu_i - \mu_j$ และ $i < j$

จำนวน 666 คู่ในแต่ละสภาพแวดล้อม ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 7.51×10^{-5} แสดงในตารางที่ 3.8

สภาพแวดล้อม	ผลการทดสอบสมมติฐาน	
	ปฏิเสธ H_0	ยอมรับ H_0
สภาพแวดล้อมที่ 1	637	29
สภาพแวดล้อมที่ 2	640	26
สภาพแวดล้อมที่ 3	618	48

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 2 คู่

ผลการทดสอบสมมติฐานในแต่ละสภาพแวดล้อมปฏิเสธ H_0 ยอมรับ $H_1 : \mu_d > 0$ ด้วยความเชื่อมั่น 95% คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 95.65%, 96.10% และ 92.79% ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าประมาณ 90% ของจำนวนสมมติฐานทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบในแต่ละสภาพแวดล้อมขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ใหญ่กว่ามีค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยน้อยกว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่เล็กกว่า

จากผลงานวิจัยของชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ (2540) ได้อธิบายเกี่ยวกับความยากง่ายของแต่ละสภาพแวดล้อมแขนหุ่นยนต์ด้วยค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณพบว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับจากสภาพแวดล้อมที่ 1, 2 และ 3 แต่ผู้วิจัยต้องการยืนยันว่าเมื่อรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่มีพารามิเตอร์ในการรันโปรแกรมต่างๆ กันค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของแต่ละสภาพแวดล้อมจะยังคงเรียงตามลำดับเช่นนี้หรือไม่ จึงทำการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรแบบจับคู่ โดยจับคู่ระหว่างค่าสังเกตที่มีลักษณะเหมือนกันของแต่ละสภาพแวดล้อม จะจับคู่ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ได้จากพารามิเตอร์ในการรันโปรแกรมชุดเดียวกันและมีขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเหมือนกันระหว่าง 2 สภาพแวดล้อม แล้วหาค่าความแตกต่าง จากนั้นนำค่าความแตกต่างที่ได้มาคำนวณค่าสถิติทดสอบ t ดังเช่นกระบวนการทดสอบสมมติฐานก่อนหน้านี้

ให้ μ_1 , μ_2 และ μ_3 คือค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยจากประชากรในสภาพแวดล้อมแขนหุ่นยนต์ที่ 1 , 2 และ 3 ตามลำดับ

ทดสอบความแตกต่างของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยระหว่างสภาพแวดล้อมที่ 1 และ 2 โดยสันนิษฐานว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของสภาพแวดล้อมที่ 1 น้อยกว่าสภาพแวดล้อมที่ 2 สมมติฐานที่จะทำการทดสอบเขียนได้ดังนี้

$$H_0 : \mu_d = 0 \qquad ; \mu_d = \mu_1 - \mu_2$$
$$H_1 : \mu_d < 0 \qquad ; \mu_d = \mu_1 - \mu_2$$

ทดสอบความแตกต่างของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยระหว่างสภาพแวดล้อมที่ 1 และ 3 โดยสันนิษฐานว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของสภาพแวดล้อมที่ 1 น้อยกว่าสภาพแวดล้อมที่ 3 สมมติฐานที่จะทำการทดสอบเขียนได้ดังนี้

$$H_0 : \mu_d = 0 \qquad ; \mu_d = \mu_1 - \mu_3$$
$$H_1 : \mu_d < 0 \qquad ; \mu_d = \mu_1 - \mu_3$$

ทดสอบความแตกต่างของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยระหว่างสภาพแวดล้อมที่ 2 และ 3 โดยสันนิษฐานว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของสภาพแวดล้อมที่ 2 น้อยกว่าสภาพแวดล้อมที่ 3 สมมติฐานที่จะทำการทดสอบเขียนได้ดังนี้

$$H_0 : \mu_d = 0 \qquad ; \mu_d = \mu_2 - \mu_3$$
$$H_1 : \mu_d < 0 \qquad ; \mu_d = \mu_2 - \mu_3$$

จึงต้องทำการทดสอบสมมติฐานทั้งสิ้น 3 คู่ กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ α หารด้วยจำนวนคู่ของสมมติฐาน $= \dfrac{0.05}{3} = 0.016$

<u>เขตปฏิเสธ</u> จะปฏิเสธ H_0 ถ้า $t < -t_{1-\alpha}$ สำหรับ $H_1 : \mu_d < 0$ โดย $t_{1-\alpha}$ มีองศาอิสระ $n-1$ และ α คือระดับนัยสำคัญซึ่งในการทดสอบนี้กำหนดให้เท่ากับ 0.016

<u>ข้อสมมติ</u> เช่นเดียวกับการทดสอบสมมติฐานก่อนหน้านี้ คือในการทดสอบสมมติฐานทั้ง 3 คู่แต่ละคู่มีจำนวนผลต่าง $n = 3,885$ ซึ่งเปรียบได้กับจำนวนตัวอย่างที่สุ่มมาจากประชากร และเนื่องจากจำนวนตัวอย่างมีขนาดใหญ่ ($n > 30$) จึงสรุปได้ว่า $\bar{d}$ มีการแจกแจงแบบปกติโดยไม่ต้องคำนึงถึงว่า d_k ; $k = 1,2,3,\ldots,3885$ มีการแจกแจงแบบปกติหรือ

ไม่ และทำให้สามารถสรุปผลการทดสอบสมมติฐานได้โดยไม่ต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมติก่อนที่จะนำผลการทดสอบไปใช้อ้างอิง

ผลการทดสอบสมมติฐานคู่ที่ 1 พบว่าค่าสถิติทดสอบ $t = 71.40$ ซึ่งมากกว่าค่าวิกฤต $t_{0.984} = 2.145$ องศาอิสระ $3,884$ ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 สำหรับ $H_1 : \mu_d > 0$ การตั้งสมมติฐาน $H_1 : \mu_d < 0$ โดยที่ $\mu_d = \mu_1 - \mu_2$ จึงไม่ถูกต้อง และผลการทดสอบสมมติฐานคือค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของสภาพแวดล้อมที่ 1 *มากกว่า*สภาพแวดล้อมที่ 2

ส่วนผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติคู่ที่ 2 และ 3 พบว่าปฏิเสธ H_0 ยอมรับ $H_1 : \mu_d < 0$; $\mu_d = \mu_1 - \mu_3$ และยอมรับ $H_1 : \mu_d < 0$; $\mu_d = \mu_2 - \mu_3$ ตามลำดับ ผลการทดสอบสมมติฐานคือค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของสภาพแวดล้อมที่ 1 *น้อยกว่า*สภาพแวดล้อมที่ 3 และค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของสภาพแวดล้อมที่ 2 *น้อยกว่า*สภาพแวดล้อมที่ 3 ตามลำดับ

สรุปได้ว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับจากสภาพแวดล้อมที่ 2 , 1 และ 3 ด้วยความเชื่อมั่น *95%* ดังนั้นการเรียงลำดับความยากง่ายของสภาพแวดล้อมทั้ง 3 จึงเปลี่ยนไปจากผลงานวิจัยของชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์ (2540)

จะพิจารณาผลการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแตกต่างของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเรียงตามลำดับความยากง่ายของสภาพแวดล้อมคือสภาพแวดล้อมที่ 2 , 1 และ 3 ได้ดังนี้ พบว่าที่ความเชื่อมั่น *95%* ยอมรับ $H_1 :$ ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ใหญ่กว่าจะมีค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยน้อยกว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่เล็กกว่า คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ *96.10%* , *95.65%* และ *92.79%* ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์การยอมรับ H_1 จะลดลงเมื่อสภาพแวดล้อมยากขึ้น นอกจากนี้ผลการทดสอบสมมติฐานพบว่าที่ความเชื่อมั่น *95%* ยอมรับ $H_0 :$ ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 2 ระดับไม่แตกต่างกัน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ *3.90%* , *4.35%* และ *7.21%* ตามลำดับ

บทที่ 4

ข้อสังเกต สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

4.1 ข้อสังเกตเกี่ยวกับการเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น

จะแสดงข้อสังเกตที่ได้จากผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ข้อมูลตามลำดับความยากของสภาพแวดล้อมแขนหุ่นยนต์คือสภาพแวดล้อมที่มีความยากน้อยที่สุดไปจนถึงสภาพแวดล้อมที่มีความยากมากที่สุดดังนี้ สภาพแวดล้อมที่ 2 , สภาพแวดล้อมที่ 1 และสภาพแวดล้อมที่ 3

จากตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบสมมติฐานยอมรับ H_0 หมายความว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้นคู่นั้นไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งจากการสังเกตผลการทดสอบสมมติฐานคู่ที่ยอมรับ H_0 พบว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเพิ่มขึ้นระดับละ 10 โหนดเริ่มไม่มีผลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยโดยเริ่มตั้งแต่ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 180 โหนด , 200 โหนด และ 80 โหนดตามลำดับ นอกจากนี้ยังสังเกตว่าเมื่อขนาดของต้นไม้เริ่มต้นใหญ่ขึ้นเริ่มตั้งแต่มากกว่า 280 โหนดในสภาพแวดล้อมที่ 2 , มากกว่า 270 โหนดในสภาพแวดล้อมที่ 1 และ มากกว่า 210 โหนดในสภาพแวดล้อมที่ 3 พบว่ามีแนวโน้มต้องเพิ่มขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมากกว่า 20 โหนดจึงจะมีผลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ย และแนวโน้มนี้จะปรากฏชัดเจนขึ้นเมื่อสภาพแวดล้อมยากขึ้น ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นคู่ที่ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยไม่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.1 , 4.2 และ 4.3

นำข้อมูลจากตารางที่ 4.1 , 4.2 และ 4.3 มาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นได้ดังนี้

$$\frac{y-x}{x} \times 100$$

โดยที่ x และ y คือขนาดของต้นไม้เริ่มต้น ตัวอย่างเช่น ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นคู่ $180-190$ $x=180$ โหนด $y=190$ โหนด เปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเท่ากับ

$$\left(\frac{190-180}{180}\right)\times 100 = 5.56\%$$

แสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นด้วยตารางแจกแจงความถี่ตารางที่ 4.4

คู่ของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น			
คู่ที่	**เพิ่ม 10 โหนด**	**คู่ที่**	**เพิ่ม 20 โหนด**
1	140 – 150	1	280 – 300
2	180 – 190	2	310 – 330
3	190 – 200	3	320 – 340
4	200 – 210	4	350 – 370
5	210 – 220		
6	220 – 230		
7	230 – 240		
8	240 – 250		
9	260 – 270		
10	270 – 280		
11	280 – 290		
12	290 – 300		
13	300 – 310		
14	310 – 320		
15	320 – 330		
16	330 – 340		
17	340 – 350		
18	350 – 360		
19	360 – 370		
20	370 – 380		
21	380 – 390		
22	390 – 400		

ตารางที่ 4.1 ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นคู่ที่ไม่มีความแตกต่าง
ของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของสภาพแวดล้อมที่ 2

คู่ของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น					
คู่ที่	เพิ่ม 10 โหนด	คู่ที่	เพิ่ม 20 โหนด	คู่ที่	เพิ่ม 30 โหนด
1	140 – 150	1	270 – 290	1	360 – 390
2	200 – 210	2	300 – 320	2	370 – 400
3	220 – 230	3	310 – 330		
4	230 – 240	4	350 – 370		
5	240 – 250	5	360 – 380		
6	250 – 260	6	370 – 390		
7	260 – 270	7	380 – 400		
8	270 – 280				
9	280 – 290				
10	290 – 300				
11	300 – 310				
12	310 – 320				
13	320 – 330				
14	330 – 340				
15	340 – 350				
16	350 – 360				
17	360 – 370				
18	370 – 380				
19	380 – 390				
20	390 – 400				

ตารางที่ 4.2 ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นคู่ที่ไม่มีความแตกต่าง
ของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของสภาพแวดล้อมที่ 1

คู่ของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น							
คู่ที่	เพิ่ม 10 โหนด	คู่ที่	เพิ่ม 20 โหนด	คู่ที่	เพิ่ม 30 โหนด	คู่ที่	เพิ่ม 40 โหนด
1	80 – 90	1	210 – 230	1	270 – 300	1	340 – 380
2	110 – 120	2	220 – 240	2	340 – 370	2	350 – 390
3	130 – 140	3	240 – 260	3	350 – 380		
4	140 – 150	4	250 – 270	4	360 – 390		
5	160 – 170	5	270 – 290				
6	170 – 180	6	280 – 300				
7	180 – 190	7	290 – 310				
8	190 – 200	8	310 – 330				
9	200 – 210	9	320 – 340				
10	210 – 220	10	330 – 350				
11	220 – 230	11	340 – 360				
12	230 – 240	12	350 – 370				
13	240 – 250	13	360 – 380				
14	250 – 260	14	370 – 390				
15	260 – 270	15	380 – 400				
16	270 – 280						
17	280 – 290						
18	290 – 300						
19	310 – 320						
20	320 – 330						
21	330 – 340						
22	340 – 350						
23	350 – 360						
24	360 – 370						
25	370 – 380						
26	380 – 390						
27	390 – 400						

ตารางที่ 4.3 ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นคู่ที่ไม่มีความแตกต่าง
ของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของสภาพแวดล้อมที่ 3

ชั้นที่ (i)	ขอบเขตจำกัดชั้น (เปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น)	ความถี่ (f_i)	ค่ากึ่งกลางชั้น (x_i)	$f_i x_i$
1	2 – 3	6	2.5	15
2	3 – 4	8	3.5	28
3	4 – 5	5	4.5	22.5
4	5 – 6	3	5.5	16.5
5	6 – 7	2	6.5	13
6	7 – 8	2	7.5	15
รวม		26		110

ตารางที่ 4.4 (ก) ตารางแจกแจงความถี่ของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น สภาพแวดล้อมที่ 2

ชั้นที่ (i)	ขอบเขตจำกัดชั้น (เปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น)	ความถี่ (f_i)	ค่ากึ่งกลางชั้น (x_i)	$f_i x_i$
1	2 – 3	6	2.5	15
2	3 – 4	9	3.5	31.5
3	4 – 5	4	4.5	18
4	5 – 6	4	5.5	22
5	6 – 7	2	6.5	13
6	7 – 8	2	7.5	15
7	8 – 9	2	8.5	17
รวม		29		131.5

ตารางที่ 4.4 (ข) ตารางแจกแจงความถี่ของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น สภาพแวดล้อมที่ 1

ชั้นที่ (i)	ขอบเขตจำกัดชั้น (เปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น)	ความถี่ (f_i)	ค่ากึ่งกลางชั้น (x_i)	$f_i x_i$
1	1.55 - 3.55	10	3	30
2	3.55 - 4.65	7	4.1	28.7
3	4.65 - 5.75	8	5.2	41.6
4	5.75 - 6.85	6	6.3	37.8
5	6.85 - 7.95	5	7.4	37
6	7.95 - 9.05	5	8.5	42.5
7	9.05 - 10.15	3	9.6	28.8
8	10.15 - 11.25	1	10.7	10.7
9	11.25 - 12.35	2	11.8	23.6
10	12.35 - 13.45	1	12.9	12.9
	รวม	48		293.6

ตารางที่ 4.4 (ค) ตารางแจกแจงความถี่ของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น สภาพแวดล้อมที่ 3

จากตารางแจกแจงความถี่หาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นได้ดังนี้

สภาพแวดล้อมที่ 2 $\dfrac{\sum f_i x_i}{n} = \dfrac{110}{26} = 4.23\%$

สภาพแวดล้อมที่ 1 $\dfrac{\sum f_i x_i}{n} = \dfrac{131.5}{29} = 4.53\%$

สภาพแวดล้อมที่ 3 $\dfrac{\sum f_i x_i}{n} = \dfrac{293.6}{48} = 6.12\%$

การคิดค่าเฉลี่ยแบบนี้คล้ายกับวิธีการคิดค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก (weighted arithmetic mean) โดยใช้ค่าความถี่เปรียบเสมือนค่าถ่วงน้ำหนัก จากตารางแจกแจงความถี่ 4.4 (ค) ชั้นที่มีความถี่สูงสุดคือชั้นที่ 1 ซึ่งเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มีขนาดใหญ่แต่มีการเพิ่มเพียง 10 โหนด เนื่องจากในสภาพแวดล้อมที่ 3 มีแนวโน้มชัดเจนว่าเมื่อขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมากกว่า 210 โหนดการเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นควรจะมากกว่า 20 โหนด ดังนั้นควรสร้างตารางแจกแจงความถี่ใหม่สำหรับสภาพแวดล้อมที่ 3 โดยไม่พิจารณาขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มากกว่า 210 โหนดและมีการเพิ่มขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 10 โหนด สร้างตารางแจกแจงความถี่สำหรับสภาพแวดล้อมที่ 3 ได้ใหม่ดังนี้

ชั้นที่ (i)	ขอบเขตจำกัดชั้น (เปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น)	ความถี่ (f_i)	ค่ากึ่งกลางชั้น (x_i)	$f_i x_i$
1	4.65 - 5.75	7	5.2	36.4
2	5.75 - 6.85	6	6.3	37.8
3	6.85 - 7.95	5	7.4	37
4	7.95 - 9.05	5	8.5	42.5
5	9.05 – 10.15	3	9.6	28.8
6	10.15 – 11.25	1	10.7	10.7
7	11.25 – 12.35	2	11.8	23.6
8	12.35 – 13.45	1	12.9	12.9
รวม		30		229.7

ตารางที่ 4.5 ตารางแจกแจงความถี่ของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นสภาพแวดล้อมที่ 3

หาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นสำหรับสภาพแวดล้อมที่ 3 ได้เท่ากับ

$$\frac{\sum f_i x_i}{n} = \frac{229.7}{30} = 7.66\%$$

จากข้อสังเกตข้างต้นน่าจะสรุปได้ว่า สำหรับสภาพแวดล้อมที่ 2 , 1 และ 3 เมื่อขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีค่าเริ่มตั้งแต่ 180 โหนด , 200 โหนด และ 80 โหนดตามลำดับ การเพิ่มขนาดของต้นไม้เริ่มต้นจะเริ่มไม่มีผลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยถ้ามีการเพิ่มขนาดน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นคือ *4.23%* , *4.53%* และ *7.66%* ตามลำดับ และมีแนวโน้มจะต้องเพิ่มขนาดมากขึ้นเมื่อสภาพแวดล้อมยากขึ้นจึงจะมีผลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ย

4.2 ข้อสังเกตเกี่ยวกับขนาดของต้นไม้คำตอบ

ผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จหมายถึงผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพซึ่งยอมรับว่าเป็นคำตอบของปัญหา สำหรับปัญหาแขนหุ่นยนต์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จคือโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ทำให้แขนหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนไปยังเป้าหมายได้สำเร็จ และขนาดของผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จคือจำนวนโหนดของโครงสร้างแบบต้นไม้ เนื่องจากแทนผลเฉลยหรือโปรแกรมหุ่นยนต์ด้วยโครงสร้างแบบต้นไม้ ดังนั้นผู้วิจัย

จึงขอใช้คำว่า"ขนาดของต้นไม้คำตอบ"แทนคำว่าขนาดของผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จ และ"ต้นไม้คำตอบ"แทนคำว่าผลเฉลยที่ประสบความสำเร็จ

จากข้อมูลผลการทดลองรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์จะพิจารณาขนาดของต้นไม้คำตอบที่ได้จากการกำหนดขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 50 โหนด , 100 โหนด , 150 โหนด , 200 โหนด , 250 โหนด , 300 โหนด , 350 โหนด และ 400 โหนด นำขนาดของต้นไม้คำตอบมาสร้างตารางแจกแจงความถี่ โดยกำหนดให้ขอบเขตจำกัดชั้นคือจำนวนโหนดของต้นไม้คำตอบ และมีกว้างของชั้นเท่ากับ 10 โหนด การกำหนดให้ความกว้างของชั้นเท่ากับ 10 โหนดอาจมีผลให้ในบางชั้นมีความถี่เป็นศูนย์ แต่เนื่องจากผู้วิจัยต้องการจะพิจารณาความแตกต่างระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้นกับขนาดของต้นไม้คำตอบให้ชัดเจนว่าขนาดของต้นไม้คำตอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้นจึงกำหนดความกว้างของชั้นเช่นนี้ ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบแสดงไว้ในภาคผนวก ค

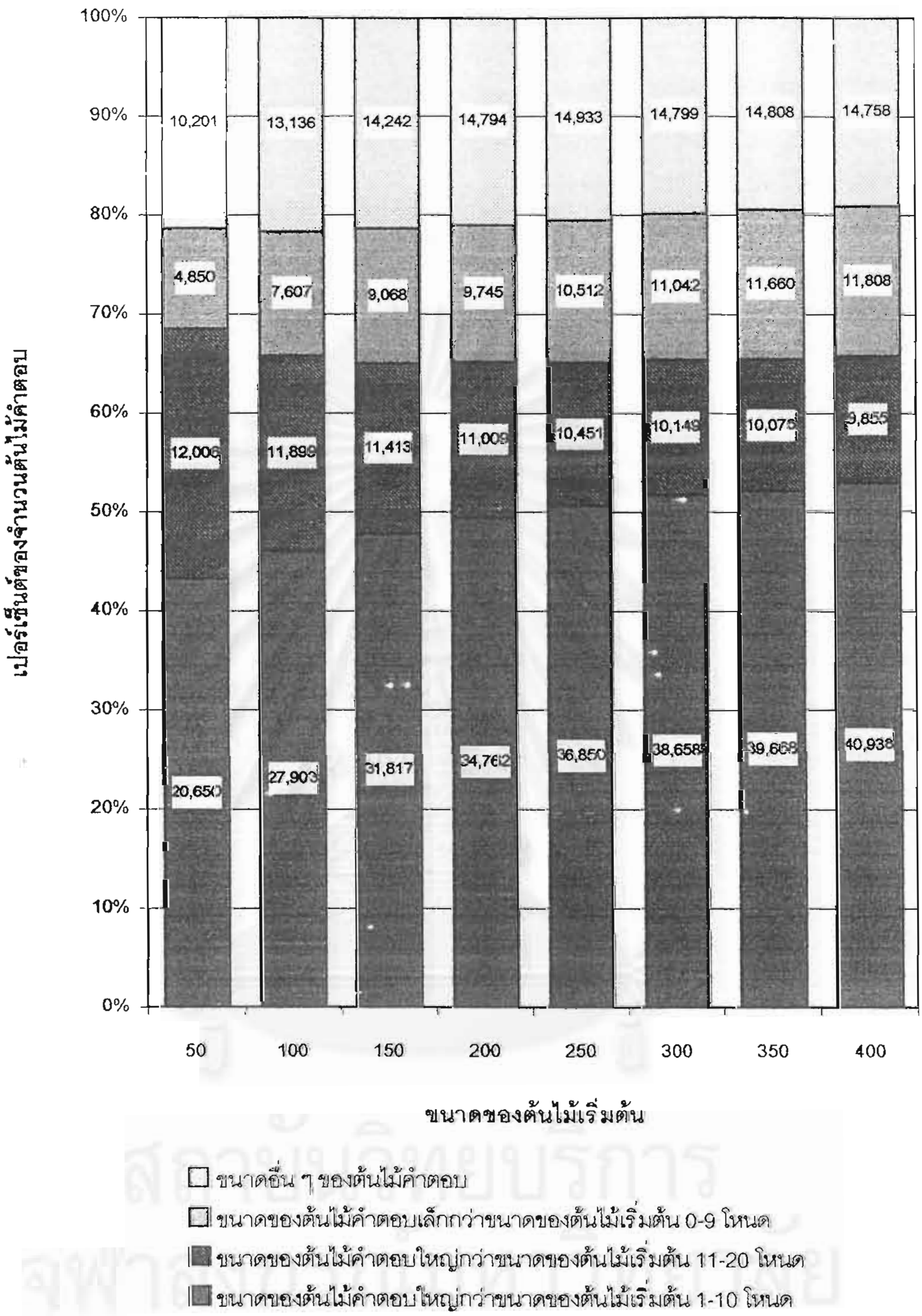
จากตารางแจกแจงความถี่ดังกล่าวนำมาสร้างกราฟที่ 4.1 , กราฟที่ 4.2 และกราฟที่ 4.3 หากพิจารณากราฟที่ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 50 โหนดพบว่าขนาดของต้นไม้คำตอบจะอยู่ในช่วง 51-60 โหนดประมาณ 45 % ของจำนวนต้นไม้คำตอบทั้งหมด และขนาดของต้นไม้คำตอบจะอยู่ในช่วง 61-70 โหนดประมาณ 25 % ของจำนวนต้นไม้คำตอบทั้งหมด และขนาดของต้นไม้คำตอบจะอยู่ในช่วง 41-50 โหนดประมาณ 10 % ของจำนวนต้นไม้คำตอบทั้งหมด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 100 โหนด , 150 โหนด , 200 โหนด , 250 โหนด , 300 โหนด , 350 โหนด และ 400 โหนดก็พบลักษณะเช่นเดียวกันคือประมาณ 50 % ของจำนวนต้นไม้คำตอบทั้งหมดมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 1-10 โหนด และประมาณ 10-20 % ของจำนวนต้นไม้คำตอบทั้งหมดเป็นต้นไม้คำตอบที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 11-20 โหนด และประมาณ 15 % ของจำนวนต้นไม้คำตอบทั้งหมดเป็นต้นไม้คำตอบที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 0-9 โหนด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของต้นไม้คำตอบจะใหญ่กว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้น แต่ขนาดของต้นไม้คำตอบส่วนใหญ่จะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นไม่มากนัก อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 50 โหนดกับ 400 โหนดการเพิ่มขึ้น 10 โหนดของขนาดของต้นไม้คำตอบจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้นนั้นอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของขนาดของต้นไม้คำตอบจะไม่เท่ากันเมื่อพิจารณาจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้น จึงแสดงว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่เล็กกว่าจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของขนาดของต้นไม้คำตอบจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมากกว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ใหญ่กว่า

นอกจากนี้ตัวเลขแสดงจำนวนต้นไม้คำตอบที่ปรากฏอยู่บนแท่งกราฟยังแสดงว่าจำนวนต้นไม้คำตอบของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ใหญ่กว่ามีจำนวนมากกว่าจำนวนต้นไม้คำตอบของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่เล็กกว่า อย่างไรก็ตามการกำหนดขนาดของต้นไม้เริ่มต้นให้ใหญ่เพื่อให้มีโอกาสพบต้นไม้คำตอบได้มากขึ้นนั้นอาจไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากการที่ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นใหญ่มากจะทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้รันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ อีกทั้งยังเพิ่มความซับซ้อนของโครงสร้างต้นไม้ซึ่งจะทำให้ใช้เวลาในการรันโปรแกรมนานขึ้น

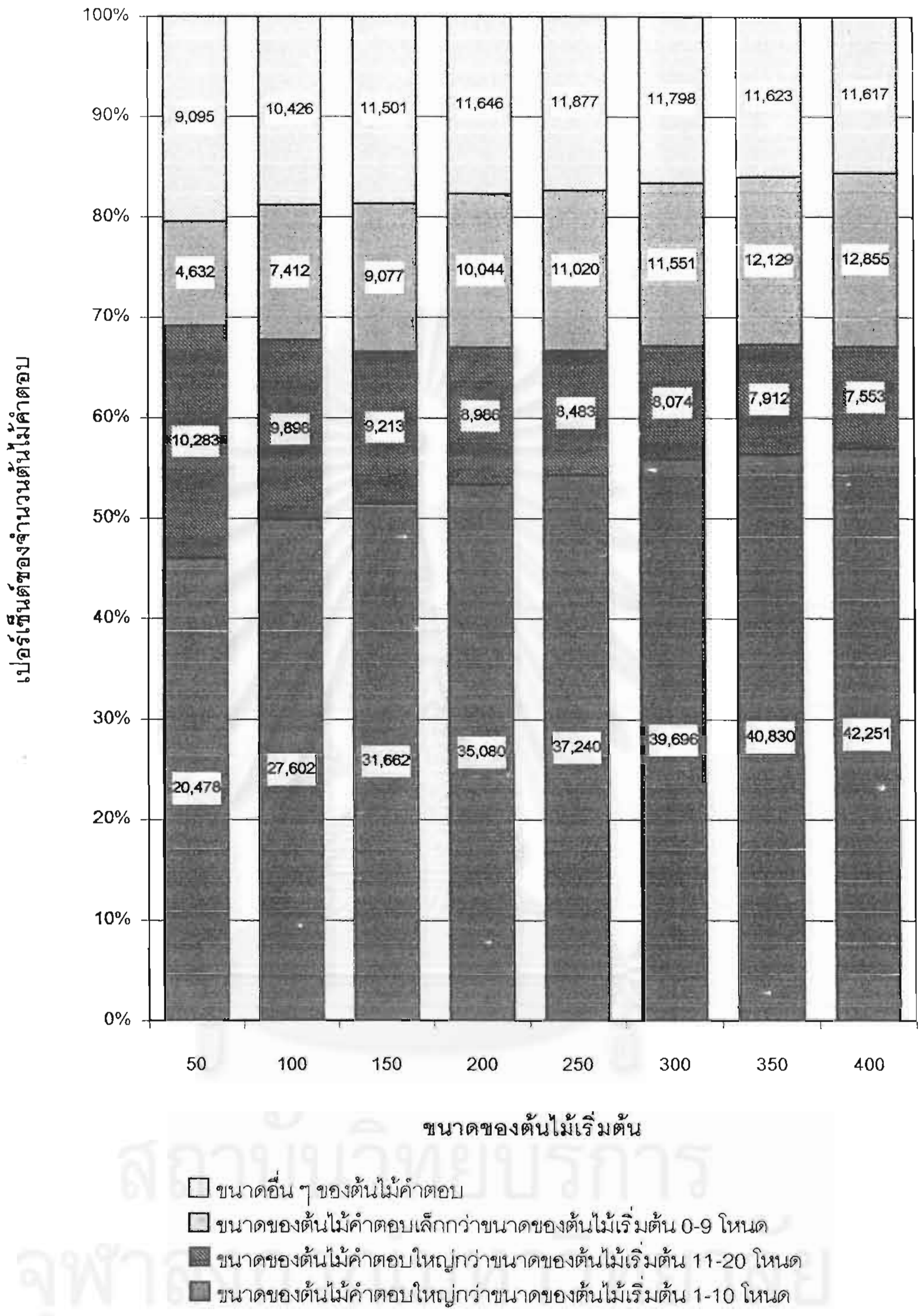
4.3 ข้อสังเกตเกี่ยวกับค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเมื่อกำหนดขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 800 , 1600 , 3200 และ 6400 โหนด

ผู้วิจัยได้ทดลองกำหนดขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเพิ่มขึ้นทีละ 2 เท่าให้กับโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์โดยเริ่มจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้นตั้งแต่ 800 โหนดไปจนถึง 6400 โหนด และเลือกชุดของพารามิเตอร์ชุดที่ 11 , 26 , 41 , 56 , 71 ,86 และ 101 ในการรันโปรแกรม ข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ได้จากการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ภายใต้สภาพแวดล้อมทั้ง 3 สภาพแวดล้อมแสดงไว้ในภาคผนวก ง แสดงลักษณะของข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของแต่ละสภาพแวดล้อมด้วยกราฟที่ 4.4 , กราฟที่ 4.5 และกราฟที่ 4.6

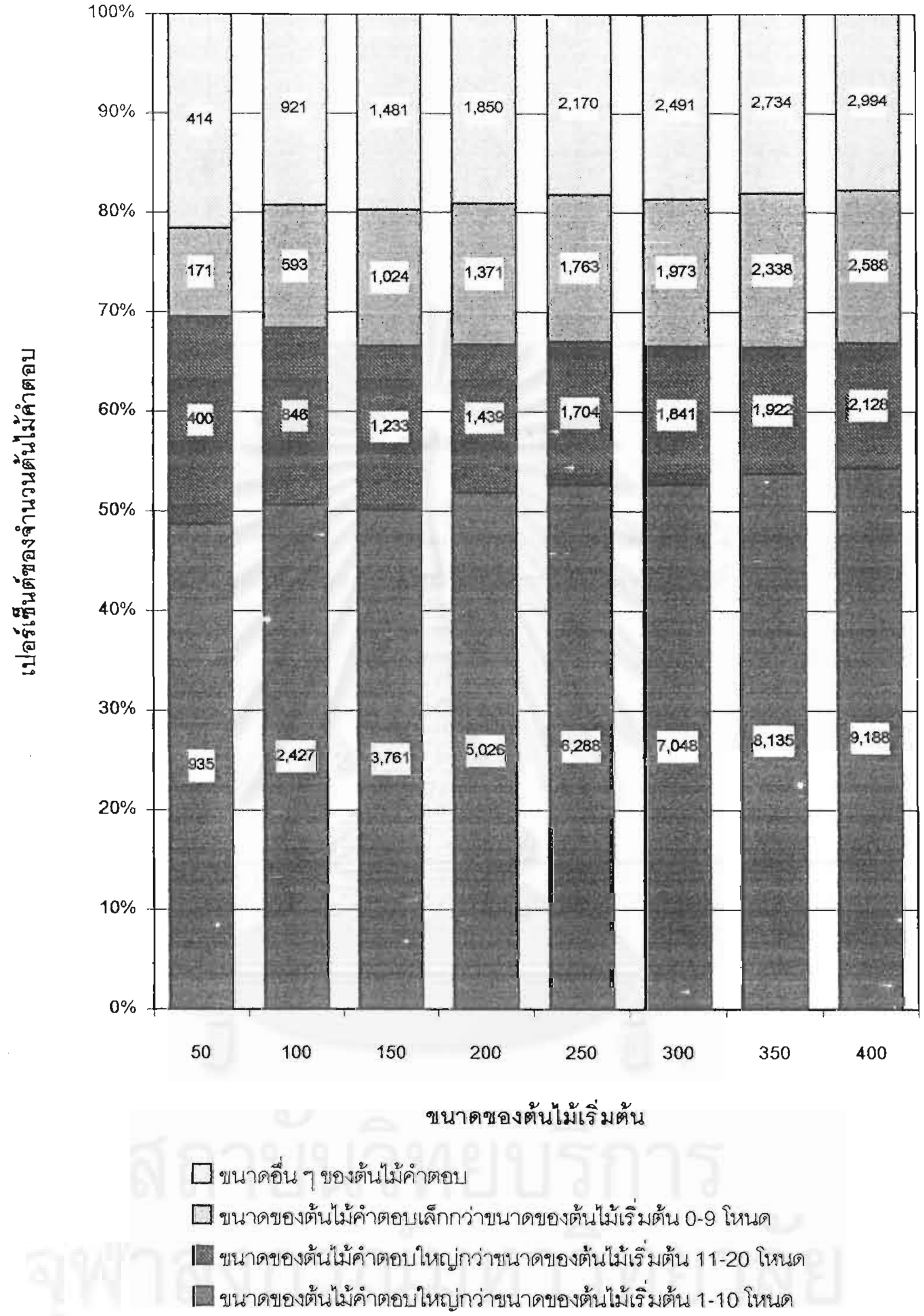
จากกราฟที่ 4.4 , 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณยังคงลดลงเมื่อเพิ่มขนาดของต้นไม้เริ่มต้นให้ใหญ่มากขึ้น อย่างไรก็ตามเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในข้อ 4.2 การเพิ่มขนาดของต้นไม้เริ่มต้นให้ใหญ่มาก ๆ เพื่อให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณลดลงนั้นอาจจะไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ



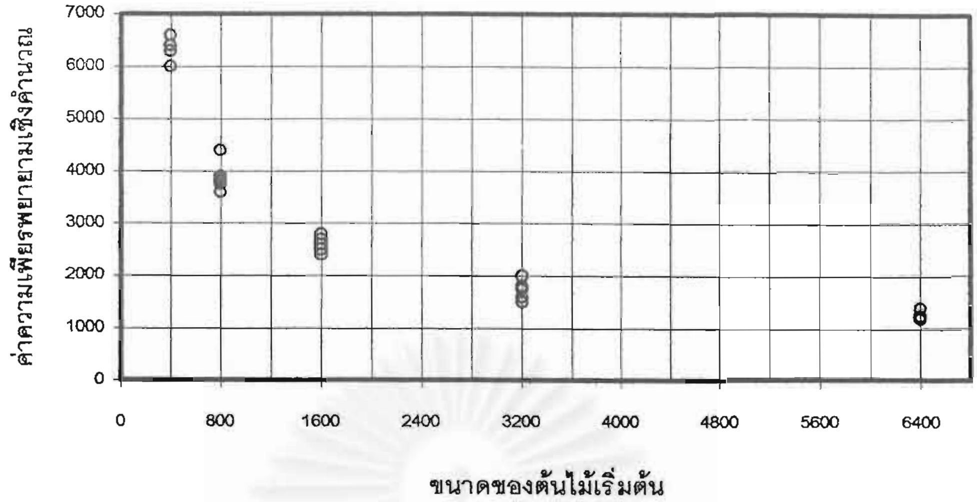
กราฟที่ 4.1 จำนวนต้นไม้คำตอบที่มีขนาดต่าง ๆ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 1



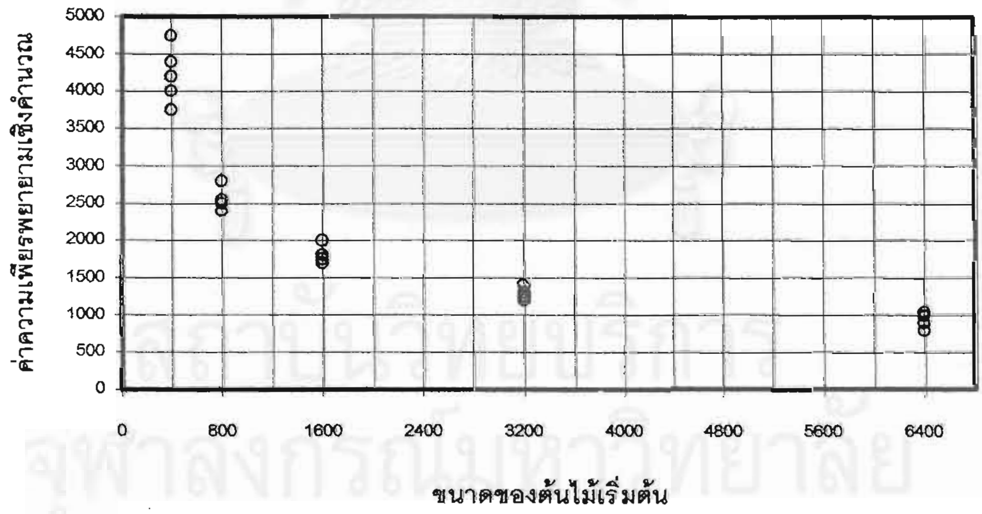
กราฟที่ 4.2 จำนวนต้นไม้คำตอบที่มีขนาดต่าง ๆ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 2



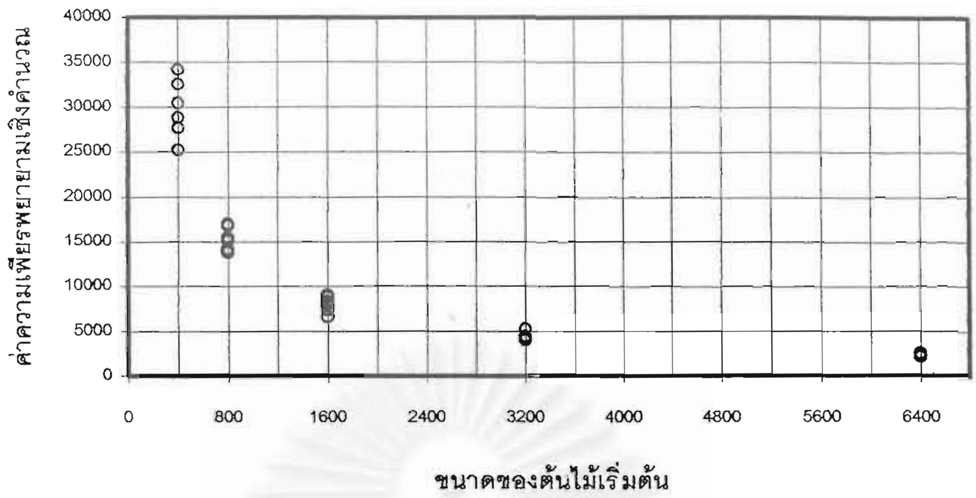
กราฟที่ 4.3 จำนวนต้นไม้คำตอบที่มีขนาดต่าง ๆ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 3



กราฟที่ 4.4 ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 800 , 1600 , 3200 และ 6400 โหนดภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 1



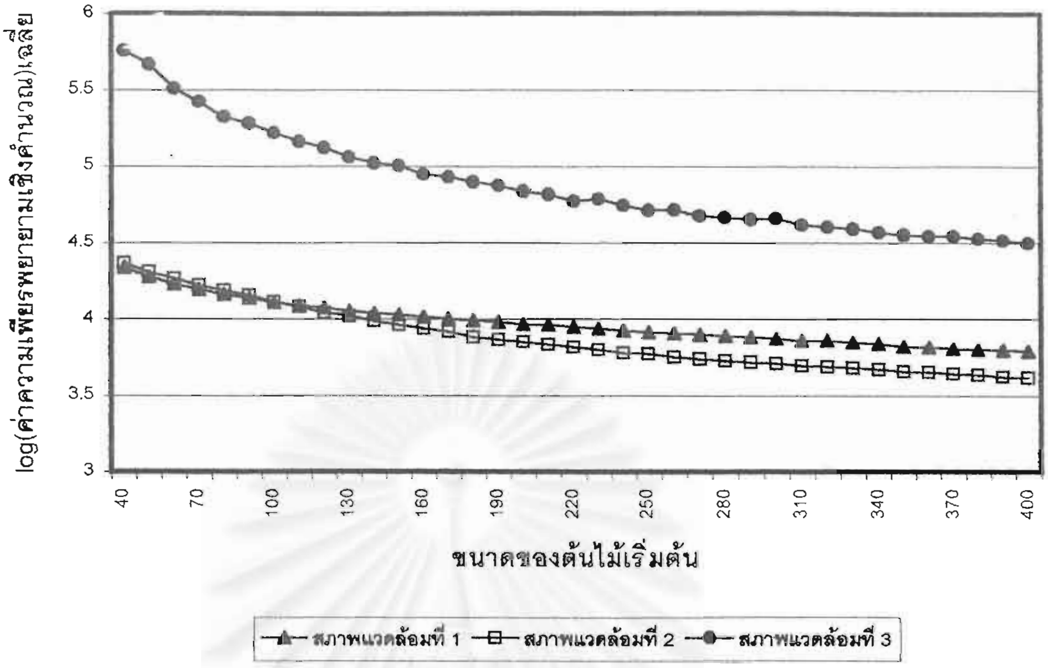
กราฟที่ 4.5 ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 400 , 800 , 1600 , 3200 และ 6400 โหนดภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 2



กราฟที่ 4.6 ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 400 , 800 , 1600 , 3200 และ 6400 โหนดภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 3

4.4 ข้อสังเกตเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้นกับค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ย

จากบทที่ 3 ในการวิเคราะห์ข้อมูลผู้วิจัยได้ทำการแปลงข้อมูลด้วย log ฐาน 10 เพื่อให้ข้อมูลมีลักษณะการแจกแจงใกล้เคียงกับการแจกแจงแบบปกติและมีค่าความแปรปรวนค่อนข้างคงที่ เหตุผลของการกระทำดังกล่าวคือเพื่อให้สามารถใช้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยเป็นตัวแทนของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณในแต่ละระดับของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นและสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ การแปลงข้อมูลด้วย log จึงเป็นเพียงการเปลี่ยนสเกลของข้อมูลให้เป็น log สเกล ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยจึงหมายถึงค่า log (ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ)เฉลี่ย นำค่า log (ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ)เฉลี่ยและขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมาสร้างกราฟเส้นดังต่อไปนี้



กราฟที่ 4.7 log (ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ)เฉลี่ยกับขนาดของต้นไม้เริ่มต้น

ลักษณะของกราฟที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยและขนาดของต้นไม้เริ่มต้นไม่อยู่ในรูปเส้นตรง แต่อยู่ในรูปของ logarithmic model ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้เป็น $y = b_0 + b_1 \log x$ หมายความว่าถ้าตัวแปรอิสระ x คือขนาดของต้นไม้เริ่มต้นอยู่ในรูปของค่า log จะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยและขนาดของต้นไม้เริ่มต้นอยู่ในรูปเส้นตรง และสามารถสร้างสมการเชิงเส้นที่อยู่ในรูป $y = ax + b$ ได้ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยและขนาดของต้นไม้เริ่มต้นอีกครั้งพบว่าสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้เป็น

$\log$ (ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ)เฉลี่ย = $b_0 + b_1 \log$ (ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น)

โดยที่ b_0 และ b_1 เป็นค่าคงที่ ซึ่งหากพิจารณาจากสมการแล้วความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยและขนาดของต้นไม้เริ่มต้นควรจะอยู่ในรูป multiplicative model คือ $y = c_0 x^{c_1}$ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้เป็น $\log y = \log c_0 + c_1 \log x$ โดยที่ $\log c_0$ และ c_1 เป็นค่าคงที่ หรืออาจเขียนสมการดังกล่าวได้เป็น $\log y = b_0 + b_1 \log x$ เมื่อให้ $b_0 = \log c_0$ และ $b_1 = c_1$ แสดงว่าค่า

ความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยซึ่งได้จากข้อมูลผลการทดลองที่ไม่ผ่านการแปลงข้อมูลด้วย log น่าจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของต้นไม้เริ่มต้นในรูปแบบดังกล่าว และเขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้เป็น

log (ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ย) = $b_0 + b_1\, log$ (ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น)

โดยที่ b_0 และ b_1 เป็นค่าคงที่ แต่เนื่องจากในทางคณิตศาสตร์แล้วค่าของ log (ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ)เฉลี่ยไม่เท่ากันกับค่าของ log (ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ย) แต่ก็มีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงน่าจะสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยและขนาดของต้นไม้เริ่มต้นควรจะอยู่ในรูป multiplicative model แสดงว่าเมื่อตัวแปรอิสระและตัวแปรตามอยู่ในรูปของค่า log จะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองอยู่ในรูปเส้นตรง ผู้วิจัยจึงใช้ค่า log (ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ)เฉลี่ยและค่า log ของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นในการหาสมการเชิงเส้นที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยและขนาดของต้นไม้เริ่มต้นในแต่ละสภาพแวดล้อมแขนหุ่นยนต์

ผู้วิจัยจะใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression analysis) ซึ่งเป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวที่สัมพันธ์กันอยู่ในรูปเชิงเส้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X$$

โดยที่ $\hat{Y}$ คือค่าพยากรณ์ของตัวแปรตาม (dependent variable)

b_0 คือค่าคงที่และจะเป็นจุดตัด (intercept) ของสมการถดถอยเชิงเส้น

b_1 คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ของตัวแปรอิสระ ซึ่งแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า X ต่อค่า $\hat{Y}$ หรือคือความชัน (slope) ของสมการ

X คือค่าของตัวแปรอิสระ (independent variable)

หากมีจำนวนข้อมูลที่นำมาใช้สร้างสมการถดถอยเชิงเส้น n ข้อมูล กำหนดให้ $i = 1,2,\ldots,n$ ค่าพยากรณ์ตัวที่ i $(\hat{Y}_i)$ ที่ได้จากสมการจะต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าสังเกตตัวที่ i (Y_i) ให้มากที่สุด สมการถดถอยเชิงเส้นจึงสามารถใช้เพื่อเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามของข้อมูลทั้งกลุ่มได้เนื่องจากกระบวนการใน

การสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นยึดหลักที่ว่าสมการที่ได้จะต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าพยากรณ์ซึ่งได้จากสมการกับค่าสังเกตน้อยที่สุด

จุดประสงค์ของการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยกับขนาดของต้นไม้เริ่มต้นคือ เพื่อสังเกตอิทธิพลของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยเมื่อสภาพแวดล้อมมีความยากง่ายต่างกัน ไม่ได้ต้องการใช้สมการถดถอยเชิงเส้นเพื่อพยากรณ์ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยเมื่อขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเปลี่ยนไปแต่อย่างใด เนื่องจากโดยข้อเท็จจริงแล้วลักษณะความสัมพันธ์ของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยและขนาดของต้นไม้เริ่มต้นไม่ได้อยู่ในรูปเชิงเส้นจึงคิดว่าไม่เหมาะหากจะใช้สมการถดถอยเชิงเส้นในการพยากรณ์ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ย และยิ่งไปกว่านั้นค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณและค่าของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นในทางปฏิบัติจะไม่เท่ากับ 0 ดังนั้นสมการถดถอยเชิงเส้นจึงไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้พยากรณ์ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ย

จากข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยของแต่ละสภาพแวดล้อมนำมาสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นได้ดังต่อไปนี้

สภาพแวดล้อมที่ 2 $MEAN = 5.68 - 0.79(\log SIZE)$

สภาพแวดล้อมที่ 1 $MEAN = 5.17 - 0.52(\log SIZE)$

สภาพแวดล้อมที่ 3 $MEAN = 7.72 - 1.25(\log SIZE)$

โดยที่ $MEAN$ คือค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ย

$SIZE$ คือค่าของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น

การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination หรือ R^2) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดอิทธิพลของตัวแปรอิสระในการลดความผันแปรของตัวแปรตาม กำหนดให้ $SSTO$ คือความผันแปรของตัวแปรตาม และ SSE คือความผันแปรของตัวแปรตามจากสมการถดถอยที่มีตัวแปรอิสระอยู่ในสมการ

$$SSTO = \sum \left(Y_i - \bar{Y}\right)^2$$

$$SSE = \sum \left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2$$

$$R^2 = \frac{SSTO - SSE}{SSTO} = 1 - \frac{SSE}{SSTO}$$

เนื่องจาก $0 \le SSE \le SSTO$ จึงทำให้ $0 \le R^2 \le 1$ อาจกล่าวได้ว่า R^2 เป็นสัดส่วนการลดลงของความผันแปรของตัวแปรตามอันเนื่องมาจากตัวแปรอิสระ ดังนั้นถ้าค่า R^2 ยิ่งมีค่าสูงความผันแปรของตัวแปรตามจะยิ่งลดลงเพราะการใช้ตัวแปรอิสระที่อยู่ในสมการถดถอยอธิบายตัวแปรตาม ค่า R^2 มีความหมายดังนี้คือ

1. ถ้า $R^2 = 1$, $SSE = 0$ ค่าตัวแปรตามจะอยู่บนเส้นถดถอยทุกจุด หมายความว่าตัวแปรอิสระเป็นสาเหตุของความผันแปรทั้งหมดของตัวแปรตาม
2. ถ้า $R^2 = 0$, $SSE = SSTO$ เมื่อความชันของเส้นถดถอยมีค่าเป็นศูนย์เพราะว่า $\hat{Y}_i \equiv \overline{Y}$ นั่นคือตัวแปรตามและตัวแปรอิสระไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้น ตัวแปรอิสระไม่ช่วยในการลดความผันแปรของตัวแปรตาม จึงไม่ควรใช้สมการถดถอยเชิงเส้นนี้ในการประมาณค่าตัวแปรตาม
3. ถ้า R^2 มากหรือเข้าใกล้ 1 แสดงว่าค่าตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง และสมการถดถอยมีแนวโน้มใกล้เส้นตรงมาก
4. ถ้า R^2 น้อยหรือเข้าใกล้ 0 แสดงว่าแสดงว่าค่าตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันน้อย และสมการถดถอยมีแนวโน้มไม่เป็นเส้นตรง

เนื่องจากมักจะเรียก $SSTO$ ว่า"ความผันแปรทั้งหมด" , เรียก SSE ว่า"ความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้" และเรียก $SSTO - SSE$ ว่า"ความผันแปรที่สามารถอธิบายได้" จึงอาจแปลความหมายของค่า R^2 ได้ว่าเป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรตามที่เกิดจากค่าตัวแปรอิสระ คือเป็นการบอกร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรตามที่เกิดจากอิทธิพลของค่าตัวแปรอิสระ ถ้าค่า R^2 มีค่าสูงมากแสดงว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรตามจากตัวแปรอิสระที่อยู่ในสมการถดถอยนั้นได้ดี แต่ถ้าค่า R^2 ต่ำแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระที่มีอยู่ในสมการถดถอย

นอกจากนี้ยังอธิบายลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (coefficient of correlation หรือ r) โดยที่

$$r = \pm\sqrt{R^2}$$

การกำหนดให้ค่า r เป็นบวกหรือลบสัมพันธ์กับความชันของเส้นถดถอยว่ามีความชันเป็นบวกหรือลบ และ $-1 \le r \le 1$ ในขณะที่ค่า R^2 แสดงถึงสัดส่วนการลดลงของความผันแปรของตัวแปรตามอันเนื่องมาจากตัวแปรอิสระ แต่ค่า r กลับไม่ได้ถูกนิยามหน้าที่ไว้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามมักจะใช้ค่า r แทนค่า R^2 ในทางปฏิบัติ เนื่องจากในกรณีที่ค่า R^2 ไม่ใช่ 0 หรือ 1 แล้ว $R^2 < |r|$ ค่า r อาจวัดความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระได้ชัดเจนกว่าค่า R^2 ว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด เช่น ค่า $R^2 = 0.1$ แสดงว่าความผันแปรของตัวแปรตามลดลง 10% เนื่องมาจากตัวแปรอิสระ แต่ $r = 0.32$ อาจสื่อถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามได้ชัดเจนกว่า ความหมายของค่า r มีดังนี้

1. ค่า r เป็นลบ แสดงว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นในทิศทางตรงข้าม คือถ้าตัวแปรอิสระมีค่าเพิ่มขึ้นค่าตัวแปรตามจะลดลง แต่ถ้าถ้าตัวแปรอิสระมีค่าลดลงค่าตัวแปรตามจะเพิ่มขึ้น
2. ค่า r เป็นบวก แสดงว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นในทิศทางเดียวกัน คือถ้าตัวแปรอิสระมีค่าเพิ่มขึ้นค่าตัวแปรตามจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าถ้าตัวแปรอิสระมีค่าลดลงค่าตัวแปรตามจะลดลงเช่นกัน
3. ถ้า r มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นในทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์กันมาก
4. ถ้า r มีค่าเข้าใกล้ -1 แสดงว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นในทิศทางตรงกันข้ามและมีความสัมพันธ์กันมาก
5. ถ้า $r = 0$ แสดงว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกัน
6. ถ้า r เข้าใกล้ 0 แสดงว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันน้อย

สำหรับสภาพแวดล้อมที่ 2 มีค่า $R^2 = 99.65\%$ หมายความว่าสมการถดถอย $MEAN = 5.68 - 0.79(log\,SIZE)$ สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยได้ 99.65% นั่นคือความผันแปรของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยเกิดจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้น$(log\,SIZE)$ 99.65% และค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมาก นอกจากนี้ค่า $r = -.998$ หมายความว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้น$(log\,SIZE)$และค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันในทิศทางตรงกันข้ามและมีความสัมพันธ์กันมาก

สำหรับสภาพแวดล้อมที่ 1 มีค่า $R^2 = 99.68\%$ หมายความว่าสมการถดถอย $MEAN = 5.17 - 0.52(log\,SIZE)$ สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยได้ 99.68% นั่นคือความผันแปรของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยเกิดจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้น$(log\,SIZE)$ 99.68% และค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมาก นอกจากนี้ค่า $r = -.998$ หมายความว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้น$(log\,SIZE)$และค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันในทิศทางตรงกันข้ามและมีความสัมพันธ์กันมาก

สำหรับสภาพแวดล้อมที่ 3 มีค่า $R^2 = 99.64\%$ หมายความว่าสมการถดถอย $MEAN = 7.72 - 1.25(log\,SIZE)$ สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยได้ 99.64% นั่นคือความผันแปรของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยเกิดจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้น$(log\,SIZE)$ 99.64% และค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมาก นอกจากนี้ค่า $r = -.998$ หมายความว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้น$(log\,SIZE)$และค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันในทิศทางตรงกันข้ามและมีความสัมพันธ์กันมาก

ทั้ง 3 สภาพแวดล้อมขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ย และการที่ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากนั้นเนื่องมาจากการที่ทั้งค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณและขนาดของต้นไม้เริ่มต้นถูกแปลงให้อยู่ในรูปของค่า log ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้อย่างมากที่ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีความสัมพันธ์กับค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณในรูปของ multiplicative model และการที่ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นและค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กันในทิศทางตรงกันข้ามสอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ผ่านมาคือเมื่อเพิ่มขนาดของต้นไม้เริ่มต้นจะทำให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยลดลง

นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของทั้ง 3 สมการมาพิจารณาพบว่าสภาพแวดล้อมที่ 2 1 และ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเท่ากับ -0.79 , -0.52 และ -1.25 ตามลำดับ สำหรับสภาพแวดล้อมที่ยากน้อยที่สุดและยากมากที่สุดมีค่าความชันของสมการถดถอยเชิงเส้นหรือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยค่อนข้างมาก ส่วนในสภาพแวดล้อมที่ 1 ซึ่งมีความยากกว่าสภาพแวดล้อมที่ 2 กลับมีค่าความชันน้อยกว่า ลักษณะเช่นน่าจะเป็นเพราะขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีอิทธิพลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณอย่างไม่แน่นอน เนื่องจากเมื่อ

พิจารณาในแต่ละสภาพแวดล้อมขนาดของต้นไม้เริ่มต้นแต่ละระดับจะมีค่าความแปรปรวนไม่เท่ากันคือมีการกระจายของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณไม่เท่ากันในแต่ละระดับของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น เมื่อเป็นเช่นนี้การใช้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยเป็นตัวแทนของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณในแต่ละระดับของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นจึงต้องคำนึงถึงค่าความแปรปรวนที่แตกต่างกันด้วย ยิ่งเมื่อนำค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยมาใช้เปรียบเทียบระหว่างสภาพแวดล้อมซึ่งต้องมีความแตกต่างของค่าความแปรปรวนระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้นระดับเดียวกันและต่างระดับกันด้วยแล้ว จะยิ่งเห็นชัดเจนขึ้นว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีอิทธิพลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณอย่างไม่คงเส้นคงวาเท่าใดนัก ถึงแม้ว่าข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่นำมาวิเคราะห์จะผ่านการแปลงข้อมูลแล้วแต่ก็ไม่สามารถกำจัดลักษณะของค่าความแปรปรวนที่ไม่คงที่ให้หมดสิ้นไปได้เพียงแต่ในสภาพแวดล้อมเดียวกันค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณจะมีความแปรปรวนคงที่มากขึ้นเท่านั้น สำหรับค่าความแปรปรวนของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นระดับเดียวกันระหว่าง 2 สภาพแวดล้อมไม่สามารถมั่นใจได้ว่าค่าความแปรปรวนจะคงที่และมีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่

4.5 สรุปผลการวิจัย

จากข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณซึ่งเป็นผลจากการทดลองรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์โดยกำหนดขนาดของต้นไม้เริ่มต้นตั้งแต่ 40-400 โหนด และใช้ชุดของพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่จำเป็นในการรันโปรแกรมหลาย ๆ แบบ นำข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ได้มาทดสอบสมมติฐานทางสถิติพบว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมีผลกระทบต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยด้วยความเชื่อมั่น 95 % ในทุกสภาพแวดล้อมแขนหุ่นยนต์

การทดสอบสมมติฐานทางสถิติภายใต้ความเชื่อมั่น 95 % เพื่อดูลักษณะผลกระทบของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณพบว่าประมาณ 90 % ของจำนวนสมมติฐานทั้งหมดที่ทำการทดสอบขนาดของต้นไม้เริ่มต้นใหญ่ขึ้นจะทำให้ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มขนาดของต้นไม้เริ่มต้นจะต้องมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นมากพอที่จะทำให้โครงสร้างของต้นไม้เปลี่ยนแปลงจึงจะทำให้เกิดลักษณะดังกล่าวของผลกระทบเนื่องจากผลการทดสอบสมมติฐานพบว่ามีบางระดับของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่เมื่อเพิ่มขนาดเพียง 10 หรือ 20 โหนดแล้วไม่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ (ดังเช่นที่ได้กล่าวไว้ใน 4.1 ข้อสังเกต

เกี่ยวกับการเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น) นอกจากนี้เมื่อปัญหามีความยากเพิ่มขึ้นก็มีแนวโน้มที่จะต้องเพิ่มขนาดมากขึ้นด้วยจึงจะมีผลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ ดังเช่นในสภาพแวดล้อมที่ 3 ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมที่ยากที่สุดการเพิ่มขนาดของต้นไม้เริ่มต้นระดับละ 10 โหนดมีผลต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณน้อยกว่าการเพิ่มขนาดของต้นไม้เริ่มต้นระดับละ 10 โหนดในสภาพแวดล้อมที่ 1 ซึ่งแนวโน้มนี้จะเห็นได้ชัดเจนจากการพิจารณาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น (ดังที่ได้แสดงไว้ในข้อ 4.1 สังเกตเกี่ยวกับการเพิ่มของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น)

ลักษณะความสัมพันธ์ของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเฉลี่ยกับขนาดของต้นไม้เริ่มต้นอยู่ในรูปของ multiplicative model และกำลังของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเป็นลบดังนั้นเมื่อขนาดของต้นไม้เริ่มต้นเพิ่มมากขึ้นอัตราการลดลงของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณจะลดลง

ลักษณะข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณมีการกระจายของข้อมูลไม่เท่ากันในแต่ละระดับของขนาดของต้นไม้เริ่มต้น การที่ค่าความแปรปรวนของค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณไม่เท่ากันนี้ อาจเป็นเพราะอิทธิพลของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่มีต่อค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณเป็นไปอย่างไม่คงเส้นคงวา

ขนาดของต้นไม้คำตอบจะใหญ่กว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้น แต่ขนาดของต้นไม้คำตอบส่วนใหญ่จะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นไม่มากนัก อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบระหว่างขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 50 โหนดกับ 400 โหนดการเพิ่มขึ้น 10 โหนดของขนาดของต้นไม้คำตอบจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้นนั้นอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของขนาดของต้นไม้คำตอบจะไม่เท่ากันเมื่อพิจารณาจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้น จึงแสดงว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่เล็กกว่าจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของขนาดของต้นไม้คำตอบจากขนาดของต้นไม้เริ่มต้นมากกว่าขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ใหญ่กว่า นอกจากนี้จำนวนต้นไม้คำตอบของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ใหญ่กว่ามีจำนวนมากกว่าจำนวนต้นไม้คำตอบของขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่เล็กกว่า อย่างไรก็ตามการกำหนดขนาดของต้นไม้เริ่มต้นให้ใหญ่เพื่อให้มีโอกาสพบต้นไม้คำตอบได้มากขึ้นนั้นอาจไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากการที่ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นใหญ่มากจะทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้รันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ อีกทั้งยังเพิ่มความซับซ้อนของโครงสร้างต้นไม้ซึ่งจะทำให้ใช้เวลาในการรันโปรแกรมนานขึ้น

4.6 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในแง่ของลักษณะโครงสร้างต้นไม้เมื่อมีขนาดของต้นไม้เริ่มต้นต่างกัน เพื่อค้นหาสาเหตุว่าทำไมขนาดของต้นไม้เริ่มต้นที่ใหญ่โปรแกรมหุ่นยนต์จึงมีการวิวัฒนาการไปเป็นโปรแกรมที่เป็นคำตอบของปัญหาได้เร็วกว่า

2. ขนาดของต้นไม้เริ่มต้นคือจำนวนโหนดที่ประกอบเป็นโครงสร้างต้นไม้หรือกล่าวได้ว่าคือจำนวนฟังก์ชันและเทอมินอลของโปรแกรมหุ่นยนต์ การเพิ่มขนาดของต้นไม้เริ่มต้นจึงเป็นการเพิ่มขนาดของโปรแกรมซึ่งนำไปสู่ความซับซ้อนของโครงสร้างโปรแกรมซึ่งเป็นข้อเสียของโปรแกรมที่มีขนาดใหญ่ ถึงแม้ว่าความซับซ้อนของโครงสร้างโปรแกรมจะไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของโปรแกรมเพียงอย่างเดียว แต่ขนาดก็เป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้โครงสร้างของโปรแกรมมีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นถึงแม้ว่าค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณจะลดลงเมื่อเพิ่มขนาดของต้นไม้เริ่มต้น แต่ความซับซ้อนของโครงสร้างโปรแกรมก็จะมากขึ้นด้วย ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้สิ้นเปลืองทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการรันโปรแกรม และจะทำให้ต้องใช้เวลาในการรันโปรแกรมนานขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2539. การวิเคราะห์สถิติ: สถิติเพื่อการตัดสินใจ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2542. การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย SPSS for Windows. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชัยวัฒน์ เจษฎาปกรณ์. 2540. การลดทอนความเพียรพยายามเชิงคำนวณของวิธีการเรียนรู้แบบกำหนดการเชิงพันธุกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริชัย พงษ์วิชัย. 2540. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Bhattacharyya, G. K. and Johnson, R. A. 1977. Statistical concepts and methods. New York: Wiley.

Box, G. E. P., Hunter, W. G., and Hunter, J. S. 1978. Statistics for experimenters. New York: Wiley.

Cochren, W. G. and Cox, G. M. 1957. Experimental designs. 2nd ed. New York: Wiley.

Goldberg, D. E. and O'Reilly, U. M. 1998. Where does the good stuff go, and why? How contextual semantics influence expression structure in simple genetic programming. In W. Banzhaf, R. Poli, M. Schoenauer, and T.C. Fogarty (eds.), Proceedings of the First European Workshop on Genetic Programming, LNCS, Paris. Springer Verlag.

Holland, J. H. 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.

Jassadapakorn, C. and Chongstitvatana, P. 1998. Reduction of Computational Effort in Genetic Programming by Subroutines. Proceedings Of National Computer Science and Engineering Conference, NCSEC 98, Bangkok, Thailand.

Koza, J. R. 1992. Genetic Programming : On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. Fourth printing. Massachusetts: MIT Press.

Koza, J. R. 1996. Genetic Programming II : Automatic Discovery of Reusable Programs. Massachusetts: MIT Press.

Montgomery, D. C. 1996. Design and analysis of experiments. 4th ed. New York: Wiley.

Neter, J., Wasserman, W., and Kutner, M. H. 1985. 2nd ed. Applied linear statistical models: Regression, analysis of variance, and experimental designs. Illinois: Irwin.

Rosca, J. and Ballard, D. H. 1995. Causality in genetic programming. In L. Eshelman (ed.), Genetic Algorithms: Proceedings of the Sixth International Conference (ICGA95), pp. 256-263. Pittsburgh, PA, USA. Morgan Kaufmann.

Rosca, J. 1996. Generality versus size in genetic programming. In J. R. Koza, D. E. Goldberg,D. B. Fogel, and R. L. Riolo (eds.), Genetic Programming 1996: Proceedings of the First Annual Conference, pp. 381-387. Stanford University, CA, USA. Massachusetts: MIT Press.

ภาคผนวก ก

ชุดของพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์

ชุดของพารามิเตอร์	จำนวนประชากร	จำนวนการสืบพันธุ์	จำนวนการไขว้เปลี่ยน	จำนวนการกลายแบบต่อปลาย	จำนวนการกลายแบบต่อยอด	อัตราการสืบพันธุ์	อัตราการไขว้เปลี่ยน	อัตราการกลาย
1	100	5	40	27	28	5	40	55
2	100	5	45	25	25	5	45	50
3	100	5	50	22	23	5	50	45
4	100	5	55	20	20	5	55	40
5	100	5	60	17	18	5	60	35
6	100	8	40	26	26	8	40	52
7	100	8	45	23	24	8	45	47
8	100	8	50	21	21	8	50	42
9	100	8	55	18	19	8	55	37
10	100	8	60	16	16	8	60	32
11	100	10	40	25	25	10	40	50
12	100	10	45	22	23	10	45	45
13	100	10	50	20	20	10	50	40
14	100	10	55	17	18	10	55	35
15	100	10	60	15	15	10	60	30
16	150	7	60	41	42	5	40	55
17	150	7	67	38	38	5	45	50
18	150	7	75	34	34	5	50	45
19	150	7	82	30	31	5	55	40
20	150	7	90	26	27	5	60	35
21	150	12	60	39	39	8	40	52
22	150	12	67	35	36	8	45	47
23	150	12	75	31	32	8	50	42
24	150	12	82	28	28	8	55	37
25	150	12	90	24	24	8	60	32
26	150	15	60	37	38	10	40	50
27	150	15	67	34	34	10	45	45
28	150	15	75	30	30	10	50	40
29	150	15	82	26	27	10	55	35
30	150	15	90	22	23	10	60	30
31	200	10	80	55	55	5	40	55
32	200	10	90	50	50	5	45	50
33	200	10	100	45	45	5	50	45
34	200	10	110	40	40	5	55	40
35	200	10	120	35	35	5	60	35

ตารางที่ ก.1 ชุดของพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์

ชุดของพารามิเตอร์	จำนวนประชากร	จำนวนการสืบพันธุ์	จำนวนการไขว้เปลี่ยน	จำนวนการกลายแบบต่อปลาย	จำนวนการกลายแบบต่อยอด	อัตราการสืบพันธุ์	อัตราการไขว้เปลี่ยน	อัตราการกลาย
36	200	16	80	52	52	8	40	52
37	200	16	90	47	47	8	45	47
38	200	16	100	42	42	8	50	42
39	200	16	110	37	37	8	55	37
40	200	16	120	32	32	8	60	32
41	200	20	80	50	50	10	40	50
42	200	20	90	45	45	10	45	45
43	200	20	100	40	40	10	50	40
44	200	20	110	35	35	10	55	35
45	200	20	120	30	30	10	60	30
46	250	12	100	69	69	5	40	55
47	250	12	112	63	63	5	45	50
48	250	12	125	56	57	5	50	45
49	250	12	137	50	51	5	55	40
50	250	12	150	44	44	5	60	35
51	250	20	100	65	65	8	40	52
52	250	20	112	59	59	8	45	47
53	250	20	125	52	53	8	50	42
54	250	20	137	46	47	8	55	37
55	250	20	150	40	40	8	60	32
56	250	25	100	62	63	10	40	50
57	250	25	112	56	57	10	45	45
58	250	25	125	50	50	10	50	40
59	250	25	137	44	44	10	55	35
60	250	25	150	37	38	10	60	30
61	300	15	120	82	83	5	40	55
62	300	15	135	75	75	5	45	50
63	300	15	150	67	68	5	50	45
64	300	15	165	60	60	5	55	40
65	300	15	180	52	53	5	60	35
66	300	24	120	78	78	8	40	52
67	300	24	135	70	71	8	45	47
68	300	24	150	63	63	8	50	42
69	300	24	165	55	56	8	55	37
70	300	24	180	48	48	8	60	32

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ชุดของพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์

ชุดของพารามิเตอร์	จำนวนประชากร	จำนวนการสืบพันธุ์	จำนวนการไขว้เปลี่ยน	จำนวนการกลายแบบต่อปลาย	จำนวนการกลายแบบต่อยอด	อัตราการสืบพันธุ์	อัตราการไขว้เปลี่ยน	อัตราการกลาย
71	300	30	120	75	75	10	40	50
72	300	30	135	67	68	10	45	45
73	300	30	150	60	60	10	50	40
74	300	30	165	52	53	10	55	35
75	300	30	180	45	45	10	60	30
76	350	17	140	96	97	5	40	55
77	350	17	157	88	88	5	45	50
78	350	17	175	79	79	5	50	45
79	350	17	192	70	71	5	55	40
80	350	17	210	61	62	5	60	35
81	350	28	140	91	91	8	40	52
82	350	28	157	82	83	8	45	47
83	350	28	175	73	74	8	50	42
84	350	28	192	65	65	8	55	37
85	350	28	210	56	56	8	60	32
86	350	35	140	87	88	10	40	50
87	350	35	157	79	79	10	45	45
88	350	35	175	70	70	10	50	40
89	350	35	192	61	62	10	55	35
90	350	35	210	52	53	10	60	30
91	400	20	160	110	110	5	40	55
92	400	20	180	100	100	5	45	50
93	400	20	200	90	90	5	50	45
94	400	20	220	80	80	5	55	40
95	400	20	240	70	70	5	60	35
96	400	32	160	104	104	8	40	52
97	400	32	180	94	94	8	45	47
98	400	32	200	84	84	8	50	42
99	400	32	220	74	74	8	55	37
100	400	32	240	64	64	8	60	32
101	400	40	160	100	100	10	40	50
102	400	40	180	90	90	10	45	45
103	400	40	200	80	80	10	50	40
104	400	40	220	70	70	10	55	35
105	400	40	240	60	60	10	60	30

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ชุดของพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ได้จาก การรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์

ชุดของพารามิเตอร์	ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น																																				
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
1	18000	17000	15000	13000	13000	12000	12000	13500	11000	10800	10000	9900	9000	9000	9000	9800	8000	8800	8400	8700	8400	8100	7700	8400	8000	7000	7500	6900	7200	7000	7000	6500	6000	5800	6100	7200	5800
2	22000	18000	14000	14000	12000	13000	12000	10300	11700	10400	9900	10400	9000	9000	9000	8400	9000	8400	8800	8800	8400	6900	8000	7400	7200	7000	7200	8400	7400	5400	6800	7000	6000	5400	6100	6300	6800
3	20000	18000	17000	13500	14000	13000	11000	11700	12000	10000	10800	9900	9900	9600	9000	9500	8800	8000	7700	8100	8000	8200	8400	8100	6600	7000	7600	7500	8000	7000	5900	6000	6000	5900	6600	6000	5200
4	25000	18000	17000	17000	13000	12000	11700	11700	10800	9900	10400	9600	9900	9600	9000	9600	8800	8800	8400	8000	8800	8400	8000	7700	8000	7800	6700	7200	6200	7800	7000	4900	6800	5800	6000	7000	5200
5	22000	18000	18000	18000	15000	12000	12800	12000	11700	10800	10400	10200	9800	9800	9900	9000	9000	8400	9000	7900	7800	8000	7500	7700	7100	8000	7500	7700	7500	5800	5800	7000	5800	5400	6600	6400	5700
6	19000	18000	18000	15000	14000	12600	11700	12600	11700	9900	9900	10000	9600	9100	9500	9000	8600	8800	9500	7800	8400	8000	7600	7800	8300	7000	6900	7500	7500	7500	6600	7500	7000	6200	6200	6400	7000
7	21000	18000	17000	14000	14000	14000	11700	12000	11200	10800	10000	9900	9900	9600	9600	8800	8800	9000	8800	8800	8400	9600	7200	7700	8000	7500	8700	7500	8200	7000	6600	6400	7000	5600	5200	5800	5500
8	20000	17000	15000	15000	15000	14000	11000	12000	10800	11000	11000	9600	9900	10000	10000	9000	9000	9100	8400	8400	7400	7000	8400	8400	7500	7500	7800	7200	7000	7400	8000	7800	5700	5700	6200	5800	7600
9	23000	18000	18000	14400	12800	13000	12600	11000	11000	11200	9900	10000	9800	10400	9500	9000	9600	8800	8500	8400	8000	8400	7800	8400	7100	7500	6800	6500	7800	6300	6100	6000	5800	6400	5400	6100	6800
10	20700	18900	18000	17100	13000	14000	13500	11700	10800	10800	10200	9600	9900	9900	10200	9600	8800	8800	9600	9600	9500	8200	8200	7100	8100	9000	6800	6400	6800	6800	7000	6000	5900	7600	6300	7500	6000
11	20000	18000	15000	15000	16000	12000	11200	12600	10800	10800	10800	10800	9900	9600	9800	9600	9600	8800	8300	8300	7500	8000	6500	7900	8500	7600	8000	7000	7200	6600	6900	7000	7500	7500	5600	6700	6800
12	21000	18000	17000	15000	14000	14000	12000	11700	11700	9900	10800	10800	10000	8900	8800	8900	8800	9000	8800	9600	8700	8800	8100	7200	7800	8700	7500	6800	7000	7100	6300	7000	6000	5300	5800	6100	6000
13	23000	19000	18000	18000	15000	14400	12000	10800	11700	11200	10200	11000	9600	9600	9600	9600	8700	9600	9000	8800	8000	7400	7900	6300	7000	7800	7000	7900	6900	7000	6400	6500	6300	6900	5800	5600	7000
14	23000	18000	18000	15000	13000	13000	13000	11700	11000	10800	11000	10800	9600	9600	9600	10330	9900	9000	8500	8000	9000	8400	7200	8000	5600	6500	7500	7200	7500	8400	6800	6800	6800	5800	6800	7900	5800
15	22000	19000	17000	14000	14000	13500	11700	12600	10400	11000	11000	10400	9800	10800	10000	9800	8600	9000	8000	9600	7100	9000	8000	8000	6500	8400	7600	6900	7400	7000	5300	6000	5300	6900	7600	5900	6200
16	18000	17550	15000	13500	13500	10500	12000	10800	12000	10500	10500	10500	9000	9450	9600	8400	8400	8400	8100	7800	9000	7350	8400	7350	7500	8100	8100	7200	7350	7050	7200	6300	6750	6000	6300	6000	5850
17	21000	16200	15000	14850	14400	12000	12000	10500	12000	10500	9450	9450	10500	9450	9000	9450	9000	9450	9000	9000	9000	8400	8100	8400	7050	7350	6750	7500	6750	6600	7350	6900	5550	6300	5550	6300	6750
18	22500	18000	16500	14850	13500	13500	12000	12000	10500	11550	9450	10500	10500	9000	10500	9000	9000	9000	8550	8400	8100	8100	8100	6900	7950	6750	7500	7350	6750	7500	7200	6300	6900	6150	6750	5550	5700
19	21000	16500	16200	13500	13500	14400	12000	11700	10800	12000	10500	9600	9600	10500	9450	9000	9000	9000	8250	8100	7650	9000	7650	8400	8100	7800	7050	7050	6900	5700	7050	6900	7050	7050	7200	5700	5400
20	22500	19500	16500	16200	13500	13500	12000	12000	12000	11550	10500	9600	10500	10200	9000	9450	9000	9450	9450	7800	8100	8100	8400	8100	8100	7800	7200	7350	6600	6600	7200	7200	7500	6750	5700	6150	6150
21	19500	19500	16500	13500	13500	13500	13200	10500	12000	11550	9450	10500	9450	9450	9450	9000	9000	8850	8400	8100	7800	8850	8100	7200	6900	7200	8100	7200	7200	7050	6600	6450	8300	5850	6000	5850	5700
22	19500	18000	16500	14850	13500	13500	12000	12150	11550	10500	10500	10500	9900	10500	9900	9450	9000	9000	8400	8100	8400	9000	8100	8100	7800	7500	6750	7500	7200	8100	7050	6000	7350	6300	7200	5250	6000
23	18000	19500	14850	14850	14850	13200	12000	13200	10500	10500	10500	10500	10500	9900	9000	9000	8400	9000	8100	8700	8100	6250	7200	8250	8100	7800	7500	7050	8100	8100	7350	7200	6750	5400	7500	6000	6300
24	21000	18900	17550	14850	14850	14850	13200	12000	12000	10800	10500	10500	10500	10500	9900	9000	9450	8400	9000	9450	9000	9000	9000	7200	7500	7050	8100	6600	7350	7350	7200	7200	7200	6150	5400	5550	7200
25	22500	18900	16200	16500	13500	13500	12000	12000	11700	12000	10800	10500	10500	9750	10200	9450	9000	9300	9000	9000	8250	7500	8100	7950	7350	6900	8100	6900	8850	8300	6900	6900	6000	6600	5550	7200	6600
26	19500	16500	16200	15000	13500	13200	12000	12000	10800	11550	10500	10500	10500	9000	9000	9450	9000	9000	8400	8100	8250	8400	8550	7350	7950	8100	7200	7200	8100	6450	7800	6900	6150	6450	5850	6000	6300
27	19500	16500	16200	16500	15000	13500	13500	12000	12000	10500	10500	10800	10500	9750	9450	8400	10350	9450	9000	7500	8100	8400	8100	8100	7350	8100	8100	6750	7050	7500	7200	7500	7200	5550	7050	8150	8300
28	21000	19500	18200	15000	13500	13500	13500	12000	11550	10500	10500	9450	10500	10500	10500	10500	9450	8100	8550	9000	8400	7950	7500	7800	8100	7200	7650	7050	7200	8100	7500	6450	6750	8000	7350	5850	6000
29	22500	18000	16500	15000	13500	13500	13500	12000	12000	10500	9450	11550	10500	10200	9300	9450	9450	9000	7800	9000	8100	8400	9450	7650	7500	7800	8550	7050	7500	6900	6600	6000	6000	7200	6450	6000	4950
30	22500	19500	18200	18200	13500	14850	13200	13200	12000	11550	10500	11550	10500	10800	10500	9000	9000	9600	9000	9750	8400	6850	8100	9000	8100	7350	8100	6000	7200	6000	6900	7200	5700	6900	6150	7050	6450
31	18000	18000	18000	17600	14000	12600	12000	11200	11200	10800	9600	10800	9800	9600	9000	9600	9000	8400	8400	8000	9000	7400	8400	8000	7400	7000	6800	7000	7000	8400	6800	7200	5800	6200	5800	6400	5000
32	20000	18000	18000	14000	14000	14000	14000	12000	11200	10800	11200	10800	10000	10000	9600	9600	8400	9000	8400	9000	6400	8000	8400	8000	7600	7200	7200	7200	7200	7000	6000	6200	6000	7000	6800	6400	6400
33	20000	19800	18000	18000	12600	12600	12000	11200	11200	11000	10800	10800	9600	9600	9600	9600	9600	9600	9000	8400	7800	7400	7000	8000	8000	8000	7800	7800	8000	7000	7200	6200	6200	5600	6400	6200	5600
34	21600	16000	16000	16000	14000	12600	12000	11200	12000	10800	10800	10800	9600	10800	8600	9600	8400	9000	9600	8400	9000	8400	8400	8000	7000	6600	8000	7200	7400	6600	6600	7000	5600	6200	5600	5800	6800
35	21600	18000	16000	14000	15400	12600	12600	12600	12000	11200	10800	11200	10000	9000	9600	9400	8800	8400	8000	8800	8000	8400	7600	7400	8000	7400	7200	7600	7200	7200	6800	6200	6400	6400	6800	6800	5800
36	22000	18000	17600	18000	14000	14000	12800	12000	10800	12000	10800	10800	10000	9600	10000	9600	9000	8800	9600	7800	8000	8400	7200	8400	6200	7800	6600	8000	7400	7000	7000	6600	7000	6000	6000	6200	5600
37	20000	18000	18000	14000	14000	14000	12000	12000	12000	10800	12000	10000	10800	10800	9600	9600	9600	9600	9600	7800	8400	7400	8000	8400	7600	7400	6000	8000	8800	7800	7200	6600	7000	5400	6400	7000	6400
38	22000	18000	17600	14000	14000	14000	12000	12000	12000	12000	11200	10000	10800	9600	9600	9000	8000	9000	8800	9000	8000	8800	9000	8200	8000	8000	7400	7800	7000	7800	8400	8400	6800	6400	5800	7000	5800
39	20000	18000	18000	16000	14000	14000	12600	12600	12000	12000	11000	11200	9600	10000	9600	9600	9600	9600	8400	8600	9000	8000	7200	6600	8000	7600	7600	7400	7200	6600	7200	6200	6400	6800	7200	6200	6200
40	22000	20000	18000	16000	14000	14000	12600	12600	12800	12000	10800	12000	10800	10800	9600	9600	9600	8800	9000	9000	7800	9800	8000	8000	7800	8000	8000	8000	8200	7200	6600	6600	7000	7000	6400	5800	6600
41	23400	21800	17600	16000	16000	14000	12000	12000	12000	12000	10800	10800	9800	10000	9600	9800	9600	9600	8400	6000	7400	8400	8000	7600	7200	7800	7800	7200	7000	7800	6400	6600	5400	6600	6400	6400	6000
42	22000	19800	16000	16000	14000	14000	14000	12600	12000	10400	12000	10800	8800	8600	10000	10000	9600	8800	9800	8800	8400	8000	8000	7800	8400	8000	8000	8000	6800	5800	6800	6800	5800	7800	6800	6800	5800
43	21600	18000	18000	16000	14400	14000	14000	12600	12000	11200	10800	10800	10000	10000	9600	9600	8800	9000	8400	8800	8400	8200	8400	8200	8000	7400	8000	8000	7600	6600	7400	6800	6800	5600	6400	7800	7400
44	20000	19800	17600	17600	14000	14000	12600	12000	12000	11200	10800	10800	9800	10800	10000	10000	9000	10400	8200	8800	9000	8400	7600	7400	7400	7400	7000	6600	7200	7400	7200	6800	7000	6000	6800	7200	6200
45	22000	19800	18000	16000	16000	15400	12000	12000	12600	11200	12000	10800	10800	9600	10000	9600	8800	9600	8600	8000	8400	8800	8400	7400	7600	8000	9000	5800	7800	6600	7400	6400	6600	6400	5800	6200	5600
46	22500	17500	15750	15000	13500	12500	12500	12000	11250	11250	11250	10000	10000	10000	9000	8750	9000	9000	8750	8000	8750	8750	8500	7500	7500	6500	7000	7250	7500	7500	6500	7000	7000	7000	6250	7000	5250
47	20000	18000	15750	15000	15000	13500	12500	12500	12000	10000	11250	10000	10000	10000	10000	8750	9000	9000	8750	8750	8750	8000	7250	8000	8750	8000	7000	7750	6750	6750	6500	7250	6750	7000	7000	7000	6250
48	20000	17500	17500	15000	15000	13500	12500	11250	11250	12000	10500	10000	10500	10000	10000	10000	10000	9000	8750	8000	8000	8000	8000	8750	7500	7500	7500	7000	7500	6500	7000	6750	6500	8000	5750	7000	6750
49	20250	17500	15750	15000	13500	15000	12000	12000	12250	11250	10500	10000	10000	10000	9000	10000	9000	9000	6750	8750	6750	6750	8750	7500	8000	8000	7500	7000	7500	8000	5750	6500	6750	6750	8000	8000	5750
50	20000	17500	17500	17500	15000	13500	12500	12000	12000	11250	11250	11250	10000	10000	10000	9000	8750	8750	8750	8750	10000	8000	6250	8000	7250	6750	6750	6500	7500	6750	7000	7000	6500	7500	5750	8000	5750
51	22500	20000	17500	15000	13500	13500	12500	12000	12250	11250	11250	11250	10500	10000	10000	10000	10000	8750	8750	8750	8000	7500	8750	8000	7750	7000	7500	7250	7000	8250	8250	6000	7000	7000	6750	6250	6500

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ได้จากการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่ 1

ชุดของ	ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น																																			
พารามิเตอร์	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
52	20000	20000	17500	15000	13500	13500	12500	12000	11250	11250	11000	11250	10000	10000	11250	9000	10000	9000	8750	8750	8500	8750	8000	7500	8000	7500	7250	8750	8500	7500	7250	6000	7000	6500	6250	8000	8250
53	22500	17500	17500	15750	15000	12500	13500	11250	12000	12000	11250	10500	10000	10500	10000	9000	10000	8750	8750	8750	8750	8000	7500	8750	8000	7250	6750	6750	6750	7000	7250	7500	6750	6500	6250	6750	5750
54	22500	17500	20000	15000	15000	15000	12500	12250	11250	11250	12000	10500	10500	10000	9750	9000	10000	9000	10000	8750	8250	8500	8500	6250	6500	6000	7000	7750	7500	6500	6250	6500	6750	6000	5750	6000	5500
55	22500	20000	17500	15750	15000	15000	14000	12500	11250	12000	10000	10500	11000	10500	10000	9750	10000	8500	8750	8750	9000	8750	7750	8000	8750	8250	7500	8750	8000	7250	5750	7000	6750	7000	7000	8250	6500
56	25000	20000	17500	15000	15000	15000	13500	12000	12500	11250	11250	10000	10500	10500	10000	9000	8750	9750	8750	10000	8000	8750	8750	8000	8250	7750	8000	7750	7250	6500	6750	7000	6750	6500	6750	6250	6000
57	22500	18000	17500	15000	15000	12500	12500	12500	12000	11250	12000	11250	11250	10500	10000	10000	8750	10000	8750	8750	8750	8750	8000	6250	8750	7500	8000	7000	6250	7500	6250	7000	7250	7000	6750	5750	6000
58	24750	20000	17500	15000	15000	13500	14000	12500	12000	11250	11250	11250	10000	10000	10000	10000	8750	8500	8750	8750	8750	8000	8750	7500	8000	8000	7500	8000	7250	7500	7000	7250	6500	6000	6250	6000	7000
59	22500	20000	17500	17500	15000	13500	13500	13500	12500	12000	12000	11250	10500	10500	10000	10000	9250	8750	10000	8750	8750	8000	8750	8000	8250	8000	7500	7750	8000	8000	8250	7250	6500	7000	6250	6500	5750
60	25000	20000	18000	17500	15000	13500	12250	12500	12500	12000	11250	11250	10000	10000	10500	10500	10000	8750	8750	8750	8500	8500	8750	7500	8000	7750	6750	8250	6500	7250	8000	5750	7000	7000	6000	7250	5250
61	21000	18000	16200	15000	14400	13500	12000	12000	12000	12000	10500	10500	10500	9600	9000	9000	9600	9000	8400	8100	8400	7500	7500	8100	7200	7500	7200	7500	5700	7200	7200	6300	6600	8000	6300	6300	6300
62	21000	18000	18000	15000	14700	13500	12600	10800	12000	10800	10800	10500	10500	9600	9600	9000	8400	8400	8400	9000	8100	8400	8400	8100	7800	8400	7200	7200	7200	7200	7200	6600	7200	6900	7200	6300	6300
63	21000	18000	16200	15000	13500	12000	12000	12600	12000	10800	12000	10500	10500	9600	9600	9000	9000	8400	8100	8400	8400	8400	8400	8100	7800	8400	7200	7500	7500	6600	6600	6000	6300	6900	6000	6000	5700
64	21000	18000	18000	15000	14400	14400	13500	12000	12000	12000	10500	10500	9600	9600	9000	9600	9000	9600	9000	9000	8400	8400	7800	8100	8400	7800	7500	7200	7200	7200	6900	6600	6900	6300	7500	6600	5700
65	21000	18900	18000	14400	14400	13500	13500	12000	12000	12000	10800	10500	10500	9000	10500	9600	9600	9000	9000	9600	8400	8400	8400	9000	7500	7800	7500	8100	8100	6600	7200	6300	6300	6900	6600	6300	6000
66	21000	21000	16200	16200	13500	14400	14400	12000	12000	10500	12000	10800	10500	9600	9600	10500	9600	9600	8700	8700	8400	7800	8100	8400	7500	6900	7200	8100	8100	6900	7200	6600	7200	5700	5700	6300	6300
67	21000	21000	16200	15000	14400	12600	13500	12000	12600	12000	12000	10800	9600	10500	10500	9000	8400	9600	9000	8400	8400	8400	8400	8100	7500	7500	7800	7500	7200	6900	7200	6300	6000	7200	6300	6000	6000
68	21000	18000	18000	15000	14400	13500	12000	12000	12000	12000	10500	10500	10500	10500	9600	9500	9000	9600	9600	9600	8700	7500	8400	7800	8400	7500	7800	6900	8400	6900	7200	6900	7200	7200	6600	6000	6300
69	24000	21000	16200	15000	14400	13500	14700	12000	12600	10800	12000	10500	10800	10500	10500	9000	9000	9600	9000	9000	8400	8400	8400	8100	7200	7800	8100	8100	6900	6900	7200	6300	6900	6600	6600	6000	6000
70	21000	18000	18000	15000	14400	13500	12000	13500	12000	10800	10800	10800	10500	10500	10500	10500	9600	9600	9000	9000	8700	8400	8400	8400	7500	7500	7500	7200	6600	7200	7200	6300	6000	7200	5700	6300	6300
71	24000	21000	18000	16200	15000	14400	12600	12600	12000	10500	12000	10500	10500	10500	10500	10500	9600	9000	9000	9000	8400	9000	8400	6600	7200	8400	7200	7500	7200	6600	6900	6600	6600	6600	5700	5700	6600
72	21000	18900	18000	15000	14700	14400	13500	12600	12000	12000	12000	12000	10500	10500	10200	9000	9900	9600	9000	8400	9000	8400	8100	7200	7500	6600	7500	6900	7200	6600	7500	6000	7200	6900	6000	6900	6900
73	24000	18000	18000	16200	15000	13500	13500	12000	12000	12000	12000	12000	12000	10800	10500	10500	9900	10500	9600	8400	8100	8400	8700	7800	7200	7800	7800	7200	7200	7200	6300	6600	6900	6000	6000	6300	6000
74	24000	21000	18000	18000	14400	14400	13500	13500	12000	12000	12000	12000	10500	10500	9600	9600	9000	9600	9600	9000	8100	9000	7800	7800	9000	7500	7500	8100	6900	6900	6300	6300	6000	6300	6600	6600	6000
75	24000	21000	18000	16200	15000	13500	13500	13500	12000	12000	12000	12000	12000	10500	10500	10500	9600	9600	9000	8400	9600	8400	7500	8400	7200	7500	8100	8400	8100	7200	7500	6300	6300	6000	6600	6600	6300
76	21000	17500	17500	14000	14000	14000	12250	12250	12250	11200	10500	9450	9800	9800	8750	9450	8400	8750	9450	8400	8400	8400	8050	8400	7350	7000	7350	7000	7000	7000	7000	7350	6650	6300	6650	5600	6300
77	21000	18900	16800	15750	15750	14000	14000	12250	11200	12250	10500	10500	9800	9800	9800	9800	8750	9450	9450	8400	8400	7700	8050	8400	8400	8400	7700	7350	7350	6650	7000	6650	6300	7000	6650	5950	6650
78	21000	18900	17500	15750	14000	12600	12600	12250	12250	11200	11200	10500	10500	10500	9800	9450	9450	9800	8750	8400	8750	8400	8750	8400	8400	8400	7350	7000	7350	7000	7000	7000	6300	6650	6300	6650	6300
79	21000	18900	15750	15750	15750	15750	14000	12250	12250	12250	11200	10500	10500	10500	9450	9800	9800	9800	8400	8750	9100	8400	7350	8050	7700	8050	7700	7350	7000	7350	7000	5950	6300	6300	7000	6650	6300
80	24500	18900	16800	16800	15750	14000	14000	12250	12250	10500	11200	10500	10500	10500	10500	9800	9800	9450	8750	8750	8400	7700	8400	8400	8050	7700	7350	7000	7350	8400	6650	6650	6650	6300	5950	7000	6300
81	21000	17500	18900	15750	14000	14000	14000	12600	12250	11200	10500	10500	10500	9800	9800	9450	10500	9450	8400	8750	8400	8400	8050	8400	7350	7700	8400	7000	7000	7000	7700	7000	7000	6300	6300	5950	6650
82	21000	18900	16800	15750	14000	14000	12600	12600	12250	11200	9800	10500	11200	9800	10500	10500	9800	8400	8750	8400	8750	8400	8400	8400	8400	7350	7350	7350	7000	7350	6650	7000	6650	6650	6650	5950	6650
83	24500	21000	15750	15750	14700	14000	12600	14000	12600	12250	12250	10500	10500	9800	9800	10500	10500	9300	9450	8400	8400	8050	8050	8400	8750	7350	7350	6300	7350	8400	7350	7700	6650	6650	6650	6650	5250
84	24500	21000	17500	15750	14700	14000	14000	12600	11200	11200	11200	11200	10500	11200	9800	9800	9100	10150	9450	9450	8750	7700	9450	7700	8750	8400	7350	7000	7000	6300	7350	6650	6650	5950	5950	5950	6300
85	24500	18900	17500	16800	15750	14000	14000	14000	12600	12250	12250	12250	10500	10500	9800	10500	9800	9800	9800	9450	8750	8400	8400	7350	8050	7000	7700	8050	7350	7350	6650	6300	6300	6300	6650	5600	6300
86	21000	21000	17500	15750	14000	14000	12600	14000	12250	12250	10500	10500	10500	9800	9800	9800	9800	8750	9450	8400	8400	8400	7350	8400	8050	7000	7700	7350	8400	7000	7000	7000	6650	6300	5950	6650	6300
87	24500	21000	15750	17500	15750	14000	14000	12250	12250	12250	12250	11200	10500	10500	10500	10500	9450	9450	9450	9100	8400	8400	7350	8750	7350	7700	7350	7000	7000	7000	7000	6300	6650	7350	7000	6650	6650
88	24500	21000	17500	15750	15750	14000	14000	14000	14000	11200	11200	11200	11200	10500	10500	9450	9450	8750	8750	8750	8750	8400	8750	7700	8400	7700	8400	6650	8050	6650	7350	7000	7000	6650	6300	6650	5600
89	24500	21000	17500	16800	15750	15750	14000	14000	12250	12250	11200	11200	10500	10500	10500	9800	9800	9800	7700	8750	8400	8400	8400	8050	8050	8050	7350	6650	7350	7000	7700	7000	7000	5950	6300	6300	6300
90	24500	21000	17500	15750	14700	14000	12600	12600	12600	12250	12250	11200	10500	10500	10500	9450	9800	9800	9450	9450	8750	8400	7700	7350	8400	7350	7350	7700	7700	7350	7350	6300	7350	6650	5950	6300	5950
91	21600	19200	18000	18000	14400	14000	12000	12000	11200	11200	11200	11200	9600	10000	10000	9600	8400	9600	9600	9600	8000	8000	8000	8000	8000	7600	7600	7200	7200	7600	6800	6400	7200	6800	6800	8400	6400
92	20000	19200	16000	16000	14400	14000	12800	14000	12000	11200	10800	10800	10800	9600	9600	9600	9600	9600	9600	7600	8400	8400	7600	8000	8000	6800	7200	8000	7200	7200	7200	7600	5600	6400	6400	6400	6400
93	21600	19200	18000	18000	14400	14000	12800	12000	11200	12000	10800	9600	10800	9600	10000	9600	9600	9600	9600	9600	8000	8000	8000	8400	8000	7600	7600	8000	7200	8000	7200	6400	6800	6000	6800	5600	8000
94	21600	19200	18000	18000	18000	14000	14000	12800	12000	11200	10800	11200	10800	10000	9600	9600	9600	9600	9600	9600	8800	8000	7600	9200	7600	7600	7200	7600	8000	6800	7200	7200	7200	6400	7200	8400	6000
95	24000	20000	18000	18000	14400	14000	14000	14000	12000	11200	11200	12000	11200	9600	9600	9600	9600	9600	9600	8400	9200	8400	8000	8400	8000	7200	7200	8000	6800	7200	7200	6400	7600	6400	6800	8000	8400
96	20000	20000	16000	14400	16000	14000	12800	14000	11200	10800	10800	10800	10800	10800	9600	10000	9600	9600	9600	9200	8000	8800	9200	7200	8000	7600	7600	7600	7600	6400	6800	7200	5600	8400	6400	7200	6400
97	24000	18000	18000	18000	16000	12800	14000	12000	12800	11200	10800	11200	10800	10800	9600	9600	9600	9600	8800	8000	8400	8000	8000	8000	7600	6000	7600	7600	6800	7200	6800	7200	6000	6800	6400	8000	5600
98	24000	20000	18000	18000	18000	14000	14000	14000	12000	11200	11200	10800	11200	9600	10000	10000	9600	9600	9600	8000	9600	8000	8000	7600	8000	7200	8000	7200	8000	7200	7200	6800	6400	6400	8000	8000	6400
99	24000	20000	18000	18000	16000	14400	14400	12800	12800	12000	11200	11200	11200	10800	9600	10000	9600	9600	9600	8400	9200	8400	8400	8000	8000	7600	8000	7200	8000	7200	7200	8000	8000	6000	8400	8400	8400
100	24000	21600	19200	16000	16000	14400	14000	12000	12000	12000	12000	11200	10800	9600	10800	9600	9600	9600	8800	9600	8800	8800	9200	8000	8800	8000	8000	7600	7200	6800	7600	6800	6400	7600	6000	8000	6400
101	24000	20000	18000	18000	14400	14400	14000	12800	12000	12000	11200	11200	10800	10800	10800	10000	9200	9600	9600	8000	8400	8000	8000	9600	7600	8400	8000	7200	7200	8000	6800	6400	6800	6800	8400	5800	6400
102	24000	19200	16800	18000	16000	14000	14000	14000	12000	12000	12000	11200	11200	10800	10800	9600	10000	9600	9600	9200	8400	8400	8800	8800	7600	8000	6800	7600	8000	7200	7600	6400	6800	7200	6400	8000	6800
103	24000	20000	18000	18000	16000	14000	14000	12800	12800	12000	12000	12000	10800	10800	9600	9600	10000	9600	9600	9600	8400	8000	7200	8000	8000	9600	7200	7600	7600	7600	7200	6800	6800	6400	7200	6800	6800
104	24000	20000	20000	18000	18000	16000	14000	12800	12800	12000	12000	11200	11200	10800	10800	9600	9600	9600	9600	9600	8400	8000	8400	7600	8000	8000	7600	7200	7600	8000	7600	7200	6800	8000	6400	6000	6800
105	24000	20000	18000	16000	16000	14400	14000	14000	14000	12000	12000	11200	10800	10800	10800	10800	9600	10000	8800	9600	9200	8400	8400	6400	7200	8400	7200	8000	8000	7200	8800	6400	6000	8000	8800	6400	6800

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ได้จากการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่ 1

ชุดของพารามิเตอร์	ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น																																				
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
1	20000	18000	16000	17000	13500	11200	12800	12800	11100	8500	7400	10500	8200	9200	8200	6900	6000	7000	8300	6100	5900	6500	5600	6400	4700	5200	5300	4400	6100	5600	4800	4200	4300	4100	4200	4000	5200
2	20000	18000	18000	18000	15000	13600	14400	12000	9600	11500	9600	11200	9000	8800	9200	7000	6900	5900	7400	5400	6300	5700	6000	5000	4700	4700	5800	5900	4900	4200	4800	5200	4400	4100	4000	4100	4500
3	21000	17000	17000	13000	15200	12000	11300	10500	12600	11500	8700	9600	7900	7100	8000	8900	6600	7900	6800	6000	5600	7600	5500	5200	6300	5000	4800	4300	5400	6000	4700	4500	4200	4200	4600	5000	3800
4	22000	18400	17000	14000	18000	13000	11600	12800	12000	12600	8000	10300	6500	8800	6400	7800	7900	8700	8000	7800	5500	5200	6500	6300	5700	5500	5600	6000	5400	3800	4600	4600	3800	3900	4100	3600	4200
5	22000	21000	17000	16000	15000	13800	14000	12000	10100	9600	9400	10000	9800	7400	7400	9300	7800	6600	6900	7900	6400	6800	6600	5200	5200	4800	4800	4700	5600	4900	5600	3800	4800	4200	4200	3900	3700
6	18900	18400	17000	14400	14000	14000	12600	10800	10500	10800	10500	8700	11100	9600	7100	7800	8100	7100	6000	5900	6800	6000	4700	5500	5600	5200	5000	4000	4700	5300	4600	4200	5000	4300	4200	5000	4700
7	20000	18000	18000	15000	14000	14000	13000	10100	8800	9000	9600	7800	8500	8500	8200	7000	9000	7800	6200	5700	5800	6000	5500	5500	6200	4800	5000	4600	4800	5400	4800	4200	4200	5000	4300	3800	3800
8	22000	19200	16000	16800	16200	14000	13200	11300	8000	12500	8800	9400	10100	8000	7800	7600	6800	5700	6200	6700	5000	6100	5200	6000	4900	5800	5000	4300	4300	4400	5200	4400	5100	4700	3900	4500	3900
9	21600	21000	18000	15300	14200	16000	10500	11800	11900	9600	9200	7200	8700	7800	8400	8000	6800	6200	5800	6500	5400	6000	6000	7100	4500	4900	4900	5100	4800	4500	3600	4700	4000	4900	3200	4300	3500
10	25000	21600	19000	15300	13400	15000	13800	12800	10500	12600	12600	8000	7900	7400	6800	7500	7100	6200	5700	6400	6000	6800	5600	4900	4600	4500	4900	4900	5000	4500	4200	4900	4400	4200	4800	4800	4200
11	21000	18000	19000	15200	14000	14200	12300	11900	12600	10500	10300	10500	6800	7200	7200	7600	7000	6500	6000	7000	5800	5800	6000	4900	5200	4900	4500	4400	5000	5000	3800	4600	4400	3800	3900	4000	4400
12	22000	21000	17000	13500	14700	13800	10800	13500	12800	11600	10300	10100	7800	6600	6800	6200	7100	5400	5300	6800	6900	6100	6000	5000	5100	5000	5800	5400	4400	4000	3900	4000	4400	4200	3400	4200	4000
13	22000	21600	19000	11300	16000	14400	13500	10300	10500	10100	8000	8800	8200	7900	6800	8000	8200	8200	7000	5800	6300	5100	7500	6000	4900	5700	5000	4900	4800	4800	5000	4900	5000	4400	4700	4200	4600
14	21000	21000	18000	18200	15200	15200	14000	12800	9200	8800	8300	7900	8500	8300	7400	7900	7200	7400	7500	6300	7000	4900	5700	6300	5400	5600	4600	5300	4400	4900	4800	4000	4800	4500	3900	4300	4400
15	28000	23000	18300	19000	15200	13800	11900	15300	11100	11700	9000	11300	7600	8500	7800	8700	8300	5800	7800	4300	5800	5900	5800	4600	5800	3900	4700	4700	5200	5300	5300	4800	4100	4000	4900	3900	5200
16	21000	18000	14700	15600	14400	14700	11700	11250	10050	10800	8850	9300	10200	9600	7950	9000	7850	6900	6300	6000	7050	5550	6450	5250	5400	5400	4800	4200	4200	4500	4350	4350	4650	4800	4050	3750	4050
17	21000	19500	16200	14850	15150	14400	12000	10500	11250	9450	11400	8550	8100	7950	8400	6900	7350	6750	8300	4950	8000	5700	5550	5550	5850	4650	4500	4950	4350	5250	4050	3900	3900	4350	4800	3750	4650
18	21000	18000	19200	15000	13500	13500	13200	11550	10500	10350	9300	9300	9450	7950	7850	6750	7200	6600	7350	5250	4800	6150	5850	4950	5700	5250	5400	4800	5400	4950	3900	3750	4200	4350	4200	4800	4950
19	20250	20250	18500	18200	14700	14700	12300	12300	11400	10500	11250	9150	7950	9750	7500	6300	6900	8550	7200	8300	8300	6000	5700	6450	5400	5550	5100	4650	4350	4800	4350	4500	4800	4200	5100	4200	4050
20	24000	22500	18000	15750	15600	14850	12450	10350	11100	11100	10350	8850	8400	7500	6700	7500	7500	6300	6300	5550	6150	6300	4800	6000	5100	5100	5700	4500	5250	5100	4950	4200	4050	4200	4200	4050	4050
21	21000	20250	18200	13200	13650	13500	13050	12000	11100	11100	10200	7800	9150	8100	7350	7500	7350	6750	5850	6600	7050	7050	5100	6000	5550	5700	5100	4500	4950	4650	4650	4950	4500	4050	4500	4350	3600
22	22500	21000	18000	16950	12300	13200	12300	11250	11100	9750	10050	10350	9900	8100	8700	6450	8000	8000	6300	5850	5550	6450	6300	5100	5100	5250	5400	5100	5400	4200	4650	4650	4350	3750	4050	4050	4350
23	22500	22500	17550	15600	14100	14700	13500	11850	10800	11250	10500	7800	8400	8400	9300	7500	8850	6750	7500	6750	5700	5700	5700	5400	5850	4950	5400	4800	4800	4800	4800	4350	4350	4050	4500	4350	4050
24	21600	19500	18000	17550	15600	14400	13500	10800	11250	10500	9900	9450	9450	8850	7500	7350	6750	5850	6300	5700	6000	5700	5400	5400	4350	5550	5100	4650	4650	4650	4350	4950	4650	4500	4650	3900	4200
25	22500	22500	19950	17550	14700	15300	13500	12600	13200	10500	8700	11550	7950	8850	7200	7350	6900	6750	5850	7050	6150	6000	5100	5250	5100	6250	4650	5100	4050	4500	5100	4250	4800	4200	4800	3600	4050
26	21000	18000	17850	15000	13800	12600	10650	10800	11700	10200	7800	8400	8850	9150	7500	7800	6100	6900	6150	7050	5700	6300	5100	5100	4650	5700	5700	5400	4650	4650	5100	4950	4350	4200	4050	4500	3750
27	22500	18000	18900	16800	14400	13800	12750	14400	10350	9900	9450	8550	8250	8400	8400	10050	7500	6900	6900	7850	6600	6300	5400	6450	5400	4800	5700	4950	5400	4500	4800	4350	4500	4500	4200	4350	4050
28	24000	18000	17550	18000	17400	14400	11250	12450	10350	11250	9300	8550	8700	7950	6600	7050	6300	5850	6000	6800	5850	5550	5550	5100	4500	5400	4800	5400	4200	4350	4650	4650	5100	4950	4350	4350	3900
29	22500	19500	18000	17550	14400	16200	14250	13500	11100	9000	10650	11250	12000	7200	7050	6750	7050	6450	7200	7050	5250	5250	4950	5100	5100	4350	4800	4650	5850	4800	4950	3600	4800	4200	4950	4350	4050
30	24000	23550	18900	18900	14100	14850	12450	13500	11850	11250	11850	9150	8700	9300	7500	7950	6150	6750	6900	6150	7200	6000	5700	4950	5250	4950	5700	4650	4500	5550	4650	4350	4200	4050	4050	4350	3600
31	21600	17800	18000	16000	14400	14400	12800	12800	10600	11200	11200	9000	7800	7400	7200	7000	8400	6600	7800	7000	6600	6000	5400	5400	6200	5000	4400	4800	4800	5400	5200	4200	4600	4200	4200	4200	4200
32	21800	19800	16800	16000	14400	15200	13000	10200	10400	12000	11200	8600	7800	6800	6000	6800	6800	8200	6400	6200	5800	6800	6000	5800	4800	5600	5200	4400	5200	4800	5800	4000	4800	4200	3800	4000	4000
33	21800	18000	17600	18000	14400	15000	11600	12400	10200	8800	9000	9200	8800	9200	7600	8400	7800	8800	5400	5800	6200	5800	6200	5400	5200	5000	4800	6200	4400	4600	5200	4800	4200	4600	4800	4200	3800
34	22000	20800	18000	18200	14200	14400	12000	11200	11000	11000	9600	9400	9600	7800	7800	9400	7200	6200	6000	7000	6000	5200	5000	5800	5400	5200	5200	4600	6000	4600	5000	4800	4800	4600	4200	4600	4400
35	22400	20000	19200	16800	15400	14000	14000	10600	11200	9400	8600	8600	9000	7400	7200	8000	6400	6800	7000	7800	5400	5800	5200	5800	6000	5400	5200	4800	5400	5000	4400	4800	4400	4200	4000	4200	4200
36	21600	19800	16800	16000	15400	14400	11800	12000	10800	10800	10000	8400	8800	9600	6600	7800	6600	7400	6200	6600	7200	5200	5400	6800	5200	5200	5000	5600	4600	5400	4400	5000	4600	4200	4600	4400	3800
37	22400	20800	17800	16800	16800	14400	13800	11200	12600	10400	9400	8400	8400	7800	7600	6400	6800	7000	6800	8400	5600	5400	4800	5600	6000	5400	4600	5400	4600	5800	4400	4000	4600	4200	4000	4000	4000
38	25200	20000	19200	17600	15000	14800	14000	9800	11400	10000	9400	9600	8200	7800	9600	6600	7200	7400	7200	6200	5600	6600	5800	5800	5400	4600	6600	4800	5000	4600	5000	4200	5000	5000	4200	3800	4200
39	24000	20800	16000	17600	16000	14400	12000	12000	11400	11800	10000	9400	8600	9000	7400	6600	9600	7000	6400	7000	5800	5000	5400	5800	5200	4600	5800	4600	4400	4000	4200	4800	4600	4600	4600	4400	4200
40	23400	19600	19200	16000	14200	11600	14000	12000	12800	10200	9200	7600	9200	7400	7200	6600	7000	6400	6000	6800	5200	6200	5600	5400	5200	5200	4000	4800	4400	4800	4600	4400	4400	4400	4200	4000	3800
41	22000	19600	19200	18000	14000	14400	14400	12600	9200	8800	11200	9400	8400	9400	10400	6600	7600	7000	7000	5400	6200	6200	5800	5200	5600	5000	5800	5200	5200	4600	5400	5200	4200	4600	4600	4400	4000
42	23400	20800	19800	18000	18000	12200	13200	14000	11200	10800	10000	8000	10000	9200	7400	6000	7200	7200	7200	6800	6400	5600	5200	5000	5600	6200	5400	5600	5000	4600	4600	4200	5000	4300	4400	4000	4000
43	24000	22800	19600	17800	15400	13000	13800	13400	13600	10400	9400	8600	9600	7600	9600	7600	7200	6600	6600	8400	6000	8400	5800	5400	6000	5400	4800	5000	5000	4800	4800	4800	4400	4200	4300	3800	4000
44	23400	20800	19200	16600	18800	14000	11600	12000	12000	12800	9000	11000	8800	7600	7400	7400	6800	5800	6400	7000	5800	6200	5400	5600	5800	5000	4800	4800	4200	4800	4800	4400	4400	4200	3800	3800	4000
45	24000	21000	21000	18000	16200	15200	13400	10200	11200	9800	9400	8600	8200	8400	8000	6600	6600	8200	8200	6000	6600	6200	5200	5400	5800	5800	5400	4400	4800	4600	4800	4600	4800	5000	4400	4200	3800
46	22500	20000	17500	14000	14000	14000	13500	10500	12000	9250	11500	9250	8250	8250	7750	6150	6750	6750	6250	7250	5500	6250	5750	6250	5250	5250	5500	5000	4500	4750	5250	4250	4750	4750	5250	4250	4000
47	22500	20000	17500	15000	15000	14500	12500	10250	11250	9500	10500	9000	8750	9250	8250	8500	7000	6250	7250	6250	6000	5750	5750	5750	6250	5250	5250	4500	5250	4500	4500	4500	4750	4500	4500	4250	4250
48	26000	20000	17500	15750	15750	15000	12500	12000	11750	10250	8750	8500	8250	7000	7250	6750	7250	7000	6250	6000	6000	5250	5750	5250	5000	5750	4750	5000	5000	5000	4750	5000	4250	4250	4250	4250	3750
49	22000	22000	17500	17500	14500	14000	12000	12500	10750	10500	11000	9250	8500	9250	7250	7750	7500	7000	6250	5500	5750	5500	6000	5500	5000	4750	5000	5250	5000	4750	4750	4250	4250	4250	4250	4250	4000
50	22500	19250	17500	17500	15000	13000	12000	10000	10000	9500	8750	9500	8250	8000	6500	7500	7250	7000	6750	7000	6250	6000	5750	6000	5750	4750	4750	5000	4500	5000	4750	4500	5000	4500	5000	4250	4250
51	22500	20000	18000	17500	13500	13750	12500	12500	8750	10750	9250	9500	9750	8250	6750	8000	7250	7750	5750	8500	5750	6000	5250	5750	5250	5000	4750	5500	4500	4750	4500	4750	4250	4750	4250	4000	4000

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ได้จากการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่ 2

ชุดของ	ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น																																				
พารามิเตอร์	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
52	24000	22000	18000	15750	15750	12750	12250	11750	10000	10750	9750	9250	9750	7500	7250	7000	7500	7250	5750	6500	6250	5750	5500	5500	5250	5750	6000	5000	5000	5000	4750	5000	4500	4750	4250	4500	4250
53	22500	20250	19250	16500	15000	15000	12250	14000	10000	8750	9500	9500	9750	8000	7500	7250	7000	6500	7000	6250	6250	6000	6500	4500	5250	5250	5750	4750	5500	4750	4750	4250	4500	4500	4000	4250	4000
54	24000	19500	19500	17500	17500	16250	12500	14000	10500	11500	9500	9250	7750	9000	8250	7000	6250	6750	6000	6000	5750	6250	6000	5750	5250	5500	5000	4500	4500	5000	4000	4500	5000	4500	4500	4500	4500
55	24750	21000	19250	20000	15750	14000	10750	10750	11000	9000	10500	9000	8750	9000	8500	8750	6250	6500	7000	6250	5500	5500	5750	5000	4500	5000	5000	5250	5500	4500	4250	5250	4750	4750	4000	4500	4250
56	22500	19250	17500	15750	15750	15000	11750	10500	11500	9750	11750	10250	8250	8000	9000	8500	8250	7250	6000	6750	6500	6000	6250	5500	5250	5750	5250	5000	5000	4750	4500	4500	4500	4750	4500	4000	4750
57	24750	18000	18000	17000	15750	17500	14250	13500	10000	11000	9000	9250	8750	8750	8750	7000	7500	7750	7000	6250	5750	5250	5500	6250	5250	6000	5250	5250	5250	5000	5000	4000	4500	4500	4500	4250	4500
58	22500	22500	20000	17500	16000	15000	11500	13500	11250	11500	10000	9500	9250	8500	7000	7000	6500	7250	7000	6000	6000	5250	5750	5750	5000	5000	4750	5250	5500	5000	4500	4750	4500	4250	4500	4250	4250
59	27000	20750	17500	17250	17500	14000	14000	12250	11250	10500	9500	9250	9250	7250	8000	7500	8500	7000	6500	6750	5250	6250	5500	5000	5000	5250	5000	5000	4500	4500	4250	4500	4500	4250	4500	4000	4250
60	25000	22000	18500	18500	14000	13500	13250	13750	12500	11250	9250	10750	9500	8500	6250	7250	6250	8500	6000	8000	6000	6000	5750	5250	5250	5000	4750	4500	4750	5500	4000	4500	4250	4750	4000	4000	4250
61	24000	18900	18000	16200	13200	14400	14700	12000	11400	10500	10500	8700	8400	8700	8100	8900	7500	8600	6300	8600	6300	5400	5700	5700	5100	5400	5100	4800	5100	5100	5100	4500	4500	4200	4500	4500	4200
62	24000	21000	18000	18000	15000	14100	12600	10800	9600	12000	8700	8100	9900	7800	8100	7800	7800	8600	7500	5700	5700	6900	5700	5400	5400	5700	4500	5100	5400	4200	4500	4500	4500	4500	4500	4200	3900
63	24000	21000	18000	18000	16200	14400	12600	12300	11100	10800	10200	9900	9900	9300	6900	8700	7200	7800	6600	7200	5400	6300	5400	5400	5100	5700	6000	5700	5100	4800	5100	5100	4200	4800	4200	3900	3900
64	24000	21000	18000	18200	14700	13500	12000	12000	11700	12000	10200	8400	9900	7800	8100	8100	7200	6600	6600	6300	6000	5400	5700	5100	5400	5700	5400	4800	5400	4500	4500	4500	4500	4500	4200	4200	4200
65	24000	21000	19800	16200	16200	15600	12600	12300	9900	11400	9300	8100	8400	8400	8400	7200	7200	5700	6600	6300	6600	5400	6000	5700	5400	5400	5100	4800	5100	5100	4800	4500	4500	3900	3900	3900	4200
66	21000	18000	18000	16800	14100	14700	14700	12000	11100	10200	9000	10500	7200	7200	7200	8700	7200	6000	7200	6600	5700	6000	5400	5700	6000	5100	5400	5400	4500	4500	4800	4500	4200	4500	4500	4200	4200
67	24000	21000	18000	16200	15000	14400	12000	12000	12300	10800	10800	8700	8100	9000	8100	8900	7200	6300	6000	6600	6600	5400	5700	5100	5400	4800	5400	5100	5700	5100	4500	4800	4800	4800	4200	4500	3900
68	24000	21000	18900	18800	15800	14100	13500	12900	9900	9900	11700	9000	8400	8100	8100	6300	6600	6900	6600	6900	6000	5100	6000	5700	5700	5400	5400	5400	4500	5400	4500	4800	4500	4200	4200	3900	4200
69	24000	21000	18000	16800	16200	14400	12600	14400	11100	11400	9600	9300	8100	8700	7800	6900	6900	6300	7200	6000	6300	5700	5400	5400	5400	5400	4800	5100	5400	5100	5100	4800	4500	5100	4200	4200	4200
70	25200	21600	18900	18900	16500	14400	13500	10800	11700	11400	9300	9000	9000	7800	6600	6600	7500	6600	6900	6900	6600	6000	5700	5400	5400	5400	5100	5100	4800	4500	4800	4800	4500	4500	4800	4200	3900
71	24000	21000	21000	16200	15600	14400	14100	12000	11700	9900	11400	9000	9000	8700	7500	7200	6600	6600	6600	6300	6300	6000	5400	6000	6000	5100	5400	5100	4800	4800	4500	4500	4800	4200	3900	4200	4200
72	24000	21000	18900	18000	16200	15000	15000	12900	10200	10200	9300	9300	8400	8900	7200	6900	6900	6900	6000	6000	6000	6800	5100	5100	5100	5400	5700	4500	5100	4800	4500	4800	4200	4500	4500	3900	4500
73	24000	21000	18900	18000	16200	14400	15600	11700	10800	9600	11700	9300	8400	8400	8700	8100	8400	7200	6900	5700	6800	6300	5400	5100	5700	5400	5400	4800	5100	5100	5400	4200	4500	4500	4200	4500	4200
74	26400	21000	19200	18000	16200	14100	15000	12900	9600	10200	10800	9900	8700	9300	8700	6600	6300	6900	6300	6600	6000	6600	6900	5700	5100	5100	5400	4500	5100	4200	4800	4800	4500	4500	3900	4200	4200
75	26400	21600	21000	18000	16200	14100	14400	11400	11100	9900	10500	8400	8100	8700	7800	7500	6600	7800	6300	5700	5700	5700	5700	6300	5700	4800	4800	4500	5100	4500	4200	4200	4200	4500	4200	4500	5400
76	22050	21000	17500	16800	14700	14000	12950	12800	12800	10850	11900	9100	9450	7700	8750	7350	7700	6300	7000	5600	6300	5600	6300	4550	4900	5250	4900	5250	4550	4550	4550	3850	4550	4200	4550	4200	4200
77	24500	18900	18900	16800	15750	14000	14000	12250	11900	9800	10150	10150	8750	8400	7000	6650	7000	7350	6650	6300	5250	5950	5250	5600	5950	4900	4550	4900	4550	4550	4900	4900	4900	4550	4550	3850	4200
78	23100	19600	16800	17150	14700	14700	13650	12950	10500	11200	8750	9450	8400	8400	6650	7000	7000	6650	7000	6650	6650	6300	5950	5600	5250	5250	4900	4900	4900	4900	4900	4550	4900	4550	4550	3850	3850
79	24500	18900	18900	16800	15750	14000	14700	11200	10150	11200	9450	9800	8750	8050	7350	7000	7350	7350	6650	6300	5950	6300	5600	5950	4900	5600	4900	4900	4550	4550	4550	4550	4550	4200	4550	3850	4200
80	24500	19600	18900	15750	15750	15050	12600	12250	11550	10150	9100	9100	8400	7700	8050	7350	7000	7000	5950	5950	5950	5250	5950	5250	5250	5950	4900	4550	5250	4900	4900	4900	4200	4550	4200	3850	4200
81	24500	18900	17500	16800	14700	14000	13650	12250	10850	10150	9800	9450	8400	8750	8050	6650	7000	7350	7350	5950	6650	5950	5250	5950	5950	5250	4900	5250	5250	5250	4900	4550	4200	4200	3850	4200	4200
82	24500	18900	18900	16800	16800	14700	12250	13300	13300	10850	9450	9800	7700	7700	7350	7700	8050	6300	6300	6850	6300	6300	5600	5600	4900	4550	5950	5250	4550	4900	4900	4900	4550	4200	4550	4200	3850
83	22050	19600	18900	16800	15750	14700	12250	12600	10850	10150	10500	9100	9100	8400	7000	7000	6300	5600	6300	5950	5600	5600	6300	5250	5950	5950	4900	4900	4550	4900	4900	4900	4550	4550	4550	4200	4200
84	24500	19600	18900	19600	16450	13650	13300	12600	10150	10500	8400	9100	8050	8050	9100	7700	6650	7350	7350	6300	5950	5250	5600	5600	4900	5250	4550	5250	4550	4550	4550	4900	4200	4200	4550	4200	3850
85	24500	21000	18900	17500	17150	14700	12250	12950	10850	10850	10150	9100	6800	7700	8050	7350	7000	7350	6650	6300	6300	5250	5600	5950	5950	5600	5250	4550	4550	4550	4900	4550	4900	4550	3850	4550	3850
86	25200	21000	19600	16800	18200	15400	12950	11900	13300	10850	9100	8750	9100	7350	8650	7350	6650	6650	5950	5600	5950	6300	5950	5950	5250	5250	4550	5250	4550	5600	5250	4900	4550	4550	4550	4550	4200
87	24500	21000	18900	16800	16800	13300	13650	10500	10500	10150	9100	9100	8050	8050	7700	7350	7000	7000	6650	6650	5600	5950	5950	4900	5600	5250	4900	4900	4900	4550	4550	4900	4550	4550	4550	4200	3850
88	25200	22050	17150	18900	15750	14700	12950	11550	11900	10150	9100	9100	9100	8750	8050	7000	6650	7000	7000	6300	7000	5950	5600	4900	5250	4900	5250	4900	5250	4550	4900	4550	4200	3850	4550	4550	4550
89	25200	22050	21000	18900	14700	14000	15400	11900	10150	9800	10150	9800	7700	8400	7700	7000	7350	6650	7000	6300	5600	5950	5950	5600	5600	5950	4900	4550	4550	5250	4900	4550	4550	4550	4200	3850	3850
90	25200	24500	21000	17150	16800	14000	13300	12950	10850	11200	11200	9450	8400	8400	7700	7350	7350	7350	6650	6650	5950	5950	5600	5600	5250	5250	4550	5250	4900	4900	4900	4200	4900	4550	4550	4550	4200
91	21600	21600	18000	16000	16000	14000	14400	12000	11600	10400	8800	9200	8000	8000	7200	7200	6800	7200	6800	6400	6400	6000	6000	5200	5200	5200	5600	5200	4800	5200	4800	4400	4800	4400	4400	4400	4400
92	22400	20000	18000	16000	16000	14000	14000	12000	10000	12000	10000	9600	9600	8400	6800	7200	7200	7200	7200	6400	5600	6400	5200	5600	5600	5600	4800	4400	4800	5200	4800	5200	4800	4400	4000	4400	4000
93	22400	20000	18000	16000	16000	16000	14000	12800	12000	10000	9600	9200	10400	8800	7600	8000	7200	6800	7200	6800	6000	5600	5200	5200	5600	5600	4800	4800	4800	4800	4800	5200	4400	4400	4400	4400	4400
94	25200	21600	19200	16000	12800	16000	12800	10800	12400	10400	10000	9600	8800	8000	8000	7200	7600	6800	6000	6400	6000	6400	5200	4800	5600	5200	5200	4800	4800	5200	4800	4400	4800	4800	4400	4400	4000
95	24000	20000	19200	18800	16000	14000	14000	12000	9600	9200	8200	10000	9600	8800	7200	6800	6400	6800	6400	6400	6000	6000	5200	5600	5200	5600	5600	4800	5200	5200	4800	5200	4800	4000	4400	4400	4400
96	24000	21600	19200	17200	16000	16000	14000	14000	11600	10800	10400	10800	8800	8800	7600	7200	7200	7200	6800	6400	6800	6000	6000	5200	5600	5200	5200	5600	4800	4800	4400	4400	4800	4400	4400	4800	4000
97	24000	21600	18000	16800	16000	14000	13600	12800	9600	10000	10000	9600	8400	8000	8400	6800	8400	7200	6400	6000	5600	6000	5600	5600	5200	5600	5200	4800	4800	5200	4800	4400	4800	4400	4400	4400	4000
98	25200	24000	19200	16800	16000	15200	12400	14000	11600	9600	10000	8400	9200	8800	7600	8400	6800	7600	6000	6400	6000	6000	5600	6000	6400	5200	5200	4800	4800	4800	4400	4800	4000	4400	4400	4000	4000
99	24000	22400	20000	16800	16000	14800	14000	12000	12800	10800	9600	9600	9200	8400	6800	7600	6800	6800	6800	6000	6000	6400	5600	6400	5200	5200	5200	5200	4400	4400	5200	5200	4400	4400	4400	4000	4000
100	25200	22400	18000	17600	18800	14400	14400	10000	11200	10800	10000	9600	8000	7600	7200	7600	6800	6800	6400	6000	6000	6000	5600	5600	5200	5600	5600	5600	5200	5200	4400	4400	4000	4400	4800	4400	4400
101	24000	21600	19200	16800	16000	13600	13600	13200	10000	10800	10000	8400	7600	8000	7200	7600	7200	7200	6800	7200	6800	6000	5200	5600	5600	5200	5600	4800	4800	5200	4800	4400	4400	4400	4400	4400	4400
102	24000	21600	18000	16000	16000	13200	14000	10400	10800	10000	9600	10000	10000	8000	7200	8800	7200	6000	7200	6000	6800	6000	5600	5200	5600	5200	5200	5200	4800	4800	4800	4400	4800	4400	4000	4000	4400
103	28000	21600	19200	19200	17600	14400	12400	10800	12400	10800	8400	9600	8800	8400	8000	8800	8800	7200	6400	6400	6000	6000	5600	5200	5600	6000	5200	5200	5200	4800	4400	4400	4800	4800	4400	4800	4400
104	24000	22400	19200	19200	18000	14400	12800	13600	11200	9600	10000	9200	8000	8400	7600	7600	7200	7600	6800	6400	6000	6400	5200	5600	4800	5200	5200	5200	5200	5200	4000	4800	4400	4400	4400	4400	4400
105	25200	24000	20800	19200	14400	14000	13200	14000	12800	11600	8800	8800	9600	9200	7200	7600	6800	6800	6400	5600	6400	6000	5600	5200	5600	5200	5600	5200	4800	4800	4800	4800	4400	4400	4400	4000	4000

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) ข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ได้จากการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาขนหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่ 2

ชุดของ พารามิเตอร์	ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น																
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
1	344700	688400	228800	327000	183800	166700	183800	124800	122000	76400	113800	99000	76200	76800	65600	62800	110400
2	827100	230100	229800	241000	191000	196800	206500	217000	107800	163500	124800	152800	48200	65600	88200	72300	45900
3	383000	459200	255000	344400	153300	131200	153300	91900	57400	130200	65800	134000	76800	62400	91900	65000	41700
4	230100	459000	242100	114900	183800	114800	152000	114400	104000	118300	83400	114600	65600	91200	91900	98100	83400
5	230100	328000	367200	196800	153300	136800	137700	140000	137700	76600	152800	114100	124800	51000	91900	65600	57400
6	287000	367600	267400	153000	166800	114800	114900	122000	114800	91800	102000	83400	72800	98100	110400	41700	68400
7	229800	306600	344700	153300	114900	188300	183600	183500	120500	91800	163500	91200	91200	51000	76000	76000	93800
8	459000	262400	275400	114900	196200	171800	131200	114900	183800	130800	65800	78600	95000	98400	57400	48200	98400
9	551400	229600	246400	255000	91900	163000	153200	130200	105600	91900	83400	107600	102000	85800	83400	114800	85800
10	417000	459900	383000	229800	229800	114800	131200	173600	269000	131200	68400	130400	125100	91900	57400	57400	91200
11	460300	343800	306000	401800	114900	183800	144800	229500	86800	114900	76600	76000	183000	98100	65200	65100	76400
12	690300	459000	230100	153300	153000	114900	274500	121800	108500	152100	108500	114400	91800	118300	76200	114900	65800
13	768500	230100	153300	153300	229800	161400	166400	91900	187200	107600	76600	104000	86800	102000	70000	57400	62400
14	643300	401800	230100	230100	190000	107600	152400	76600	151900	65600	188300	109900	65600	57000	72800	91000	57400
15	460300	267400	401800	229200	196800	228600	116800	130200	114100	159600	104000	114900	84500	114400	114800	120500	41700
16	690450	393600	401100	275700	206550	137850	137250	182400	148500	178200	98400	93600	93600	91500	68850	62100	66150
17	413550	574500	269200	376300	172350	196200	187650	163000	148500	118800	68850	66100	78750	42900	68850	76500	62550
18	919800	413100	625500	366100	136500	186300	172200	137850	142500	157500	76500	89100	87000	101400	72300	57300	82800
19	574500	516600	382500	250200	121050	196800	161400	108450	171900	98100	98400	129150	76500	114300	66150	76200	73350
20	984000	345150	393600	481950	383150	273600	98400	172350	114000	109200	97650	98400	98400	98400	66150	57300	52200
21	295200	344250	430500	172350	142500	166050	144600	154350	137850	98100	89100	109200	97850	114000	89100	68400	67800
22	590400	437850	345150	343200	171900	250200	98400	114600	148500	125100	76200	98400	85500	89600	80700	38150	76500
23	535500	689400	342900	172200	172350	235500	205200	171900	125100	80700	109200	130200	93600	57300	81900	68850	75600
24	688500	500400	345150	172350	262500	158400	68850	171900	125100	88100	124800	106500	86100	91500	94200	81900	57000
25	690450	229950	229500	459000	137850	187200	158400	86100	153000	85500	88100	105000	97800	91500	72300	57300	68400
26	574500	413550	229800	343350	292950	229800	152400	152400	172350	114600	127800	114300	91200	102600	68850	72300	76500
27	690300	517050	228750	229950	206550	187200	196800	108450	137850	136800	97650	122250	68850	98100	113400	73350	45750
28	275700	295200	228750	316800	430500	292950	137250	121050	114000	137850	132300	89100	68400	85500	97650	76500	56700
29	517050	688500	172350	172350	264000	168400	172200	294300	126750	114300	98400	98400	136800	114900	97800	76500	52800
30	689400	573000	228750	308000	158400	227850	171000	114900	97650	62550	98400	86100	91200	128700	86100	62550	62550
31	459600	376600	456000	264800	281800	215200	114800	140000	145600	116000	102000	83200	76400	88200	82800	83400	50800
32	367800	613200	385600	282400	131200	152400	166800	163000	113600	91200	86400	83400	83400	83000	73800	70400	76400
33	393600	534800	204000	217000	182400	183000	183000	152400	183800	116800	101600	78000	83400	73600	114800	86600	76400
34	459600	524800	534800	168800	131200	161400	152800	151200	140800	91600	115200	100800	65400	76400	55200	73800	76400
35	920400	459000	457200	400400	304800	229200	245000	151200	134000	114800	100800	85200	76400	97800	90000	116800	78400
36	834000	382000	275400	277200	153200	152400	131200	152800	131200	125600	70400	110400	91600	91800	98400	48200	79000
37	458400	612000	305600	275400	228800	183800	229200	166400	114800	91800	98400	140000	76400	65400	53800	60000	66600
38	524800	393600	291200	229800	203200	226000	131200	147000	107200	147000	121600	140000	82800	103000	70400	92800	80800
39	1072400	459600	366000	352000	228000	196200	130200	125600	102000	117600	101400	101400	76400	76000	101600	76400	78000
40	612000	427000	500400	203200	241000	182400	183800	198000	157000	113000	104000	72800	91800	61000	65400	61000	86800
41	459600	735200	250200	254000	229800	158400	166800	131200	107200	117600	114000	114800	91200	95200	61000	76400	53800
42	735200	459200	211200	281600	249600	183800	161400	114800	91800	124800	68200	101600	83200	75200	61000	75000	50800
43	393600	366000	306600	281600	270400	153200	171600	153200	156400	114800	91800	79200	95200	76400	83400	85200	50800
44	510000	610000	367200	260800	183800	161400	190000	187600	117600	136800	76400	100800	70000	94200	72800	107200	78400
45	689400	459000	460200	229800	262400	176400	173600	161400	140000	113000	142000	105000	70400	110400	96400	63000	57200
46	656000	403500	287250	191500	287250	190000	127500	130000	130000	127000	117750	109000	138500	111000	81750	77250	79000
47	635000	328000	228000	164000	285250	164000	127500	171000	138000	101000	94000	118000	80250	84750	67250	104250	87500
48	528000	382000	178000	182750	287250	229750	152000	191500	143500	95500	113000	114000	88000	83000	111000	81500	69000
49	574000	1147500	440000	427500	284000	180750	143500	144000	104250	132000	114750	114000	106250	81750	76250	73500	67000
50	574000	379750	286000	229750	229500	164000	162750	147000	128750	103500	127000	71500	76250	95500	81500	84500	65000
51	688500	542500	286500	241000	229750	196250	127500	127500	113000	88000	114750	103000	88000	76250	112500	49500	82250

ชุดของ พารามิเตอร์	ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น																			
	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
1	80700	65100	54800	51000	35200	65100	38200	45900	30400	50700	24100	44400	38200	24100	28900	41700	32700	20800	26900	24100
2	57400	51000	57200	41700	45900	35200	51000	48200	45900	45900	38200	45900	45900	38400	30500	30500	42000	35200	30500	32700
3	70000	38200	47800	38200	38200	78200	28600	53800	35200	38200	58500	38400	41700	30500	38200	32700	35200	32700	24100	20800
4	32700	51000	53800	57400	38200	57000	41700	45200	54000	28600	47100	38200	45200	22800	32700	30500	41200	72000	35200	32700
5	86400	50800	51000	60600	38200	45900	30500	41600	45900	41700	38200	41700	28600	49000	35200	41700	32700	30500	32700	41700
6	51000	57400	38200	63000	45900	51000	25400	32700	61500	54800	57400	41700	28900	41400	35200	30500	25400	26900	21700	30500
7	76800	53800	57000	76000	54600	38200	41700	35200	57400	26900	41700	49200	45900	39000	26900	30500	41700	28600	30900	28800
8	51000	76400	118800	51000	45900	41700	78500	57400	65100	41700	35200	48200	45900	45900	50400	25400	41500	25400	35200	32700
9	85200	38200	76400	35200	57000	41700	48900	35200	76200	38200	51000	38200	41700	35700	41700	35200	43200	38000	47100	28800
10	51000	65600	65100	28600	65800	45900	38200	32700	28600	65200	57400	41700	28600	35200	32700	21700	30500	30500	28800	32400
11	38200	38200	76200	44100	51000	50400	66400	41700	57400	51000	30500	41700	45900	44100	30500	45900	35200	32700	26900	30400
12	59400	38200	79100	71400	30500	45800	41400	45900	21700	41700	45900	32700	41700	41700	45800	39000	51000	44100	30500	41700
13	71000	45900	71400	51000	35200	32700	45800	45900	57000	62400	33900	47100	35200	41700	40000	39200	35700	35200	28600	25400
14	53800	52000	38200	52500	61500	41700	57000	41700	41600	41700	52500	35200	28600	32700	50800	41700	26900	35200	45900	24100
15	35200	84500	45900	73500	59400	51000	57000	65600	56800	52000	28600	38200	28600	36200	26900	25400	38200	32700	24100	25400
16	78000	49050	66000	52500	49050	45750	67500	52800	38100	67500	36150	44100	23550	44100	29700	31200	39600	39000	38400	44100
17	86100	53850	46750	41400	82550	49050	55350	38100	63000	36000	34200	45750	46350	40350	42900	42300	34200	36150	25350	28500
18	49050	45750	57300	57300	42900	54600	52800	52800	49950	57600	42900	32550	42900	48600	32550	34200	45750	24450	42900	44400
19	60300	73350	49050	55200	66150	49050	40350	36150	49800	45600	28500	45600	25350	38100	40350	31200	32550	45000	40200	38100
20	72300	58500	40350	40350	62550	66850	38100	50850	40350	47250	28500	38150	27300	45750	41400	40350	28500	32550	41400	31200
21	80700	57300	65100	52800	70500	57300	50700	45750	38100	38100	27300	31200	32550	25350	38250	38150	29700	35550	28500	24450
22	82100	42900	78750	48900	67800	53550	52800	55350	36150	38100	34200	43200	31200	42900	25350	20700	29700	33900	27300	42900
23	76500	57300	66100	52800	57300	89100	45750	36150	40350	40350	45750	40350	38150	34200	39600	42600	26250	40350	37350	35550
24	82550	66150	52800	50850	82550	52200	62100	36150	32550	42900	31200	38150	49050	28500	38100	29700	57300	40350	27300	38150
25	32550	57300	72300	52800	49050	57300	40350	45600	44100	56400	34200	45750	36150	29700	34200	45750	34200	43200	40350	25350
26	81800	45750	49050	42900	52800	52800	76050	60300	68400	59400	62550	26250	38100	35100	32550	23550	38100	29700	29700	34200
27	62550	61900	45600	31200	62550	58500	36150	28500	53550	68400	38100	36900	46800	43200	40350	38100	27300	47100	32550	29700
28	73350	57600	100500	49050	42900	52600	40350	52200	46350	49050	45750	57300	32550	49950	34200	50850	49050	28500	33300	29700
29	66150	68850	42900	36150	62100	62550	42900	32550	42900	37800	38100	52200	42900	32550	42900	42900	38100	38100	45750	45750
30	73350	56700	66850	68400	76050	69600	42900	49050	49050	62400	62550	40350	51800	31200	27300	36000	28500	36150	46350	27300
31	53800	61000	53800	53600	58400	48200	50800	31400	39600	36400	51000	35000	53800	43400	34800	38000	33800	31400	32600	28400
32	91200	53800	54000	53800	61800	41600	39600	35000	35000	55200	38400	41600	41600	33800	30400	48200	35000	32600	32800	38400
33	78400	80400	83000	69600	45600	56800	53800	39600	48000	33800	41400	54000	38000	38000	38000	28400	35000	35000	25200	31400
34	70400	70400	66400	56800	53800	61000	57200	43200	45600	39600	39600	45000	30400	33800	48200	25200	38000	27600	38000	30400
35	68000	38000	58800	61000	43400	43400	61000	38400	43400	43400	38000	41600	47400	39200	30400	43400	43400	40200	32600	28400
36	80600	41600	67800	60600	39600	79000	38400	61000	43400	45600	35000	32600	35000	39600	35000	42000	28800	28000	31400	23200
37	70400	60600	61000	61000	55200	47800	58800	38000	41600	45600	39600	29400	41600	30400	28400	39600	29400	27600	32600	30400
38	70400	52800	53800	80800	43400	50800	43400	56800	50400	53800	48200	51000	33800	23800	27600	33800	41600	24800	35000	38000
39	62800	57200	53800	39600	55200	43400	65400	39600	39600	41600	35000	38000	32800	48200	40800	33800	27600	33800	33800	28400
40	102000	58800	61800	62400	39600	53800	43400	45600	52200	53800	49200	52000	39600	38000	39200	45600	33800	38000	27600	36400
41	82800	45600	64800	56400	52200	65400	52800	45600	55200	52200	41600	45600	36400	55200	45600	38000	41600	26000	38000	25200
42	91800	72000	43400	55200	43400	43400	41600	45600	53600	57600	40400	35000	32800	21600	26800	26800	38000	33800	41600	39600
43	78400	53600	37000	57200	52200	48200	39600	48200	41600	52800	36400	46800	31400	36400	33800	38000	38000	29400	35000	33800
44	86400	98000	41600	58800	39600	60600	36400	48000	45600	44400	47400	39600	46400	33800	36400	41600	29400	42600	35000	23800
45	65200	50800	65400	57200	61000	45600	48200	50800	45600	45600	50800	41600	43400	29400	28400	38000	38000	31400	33600	39600
46	76250	92000	80000	80250	42250	43750	54000	57000	54000	57000	42000	39250	48750	34500	30750	39250	38000	33500	35500	30750
47	63750	49500	73500	63500	82250	65000	52500	42250	39250	42250	47000	32500	38000	45500	38000	30750	36750	44000	34500	29750
48	78000	52000	57000	57000	58500	45500	47500	54000	49000	60250	40750	49500	56250	28250	34500	27000	43750	36750	32500	27000
49	49500	71500	52000	45500	49500	51750	43750	42250	47500	40750	47250	42500	33500	38000	33500	35500	32500	32500	36750	37500
50	76250	52500	69000	70500	52500	36750	52000	36750	45500	43750	41500	43750	42250	33500	48000	36750	30750	19750	32500	34500
51	67500	77250	63750	71500	45500	60250	38750	29750	39250	36750	36750	54250	43750	44000	36750	38000	28250	46000	34500	37500

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ได้จากการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่ 3

ชุดของ	ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น																																			
พารามิเตอร์	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400
52	625500	538000	317500	237500	143000	175000	127500	156000	171000	148750	95500	66000	95500	94500	63500	71500	67250	90000	71500	65250	54250	71000	35500	57000	45500	35500	35500	39250	43750	42000	32500	38000	33500	30750	43750	45000	39000
53	689250	766000	382500	198000	254000	182750	283500	95500	104250	114000	138000	83250	97500	78000	84250	60250	71000	81000	63750	69000	69000	49500	59250	65000	57000	32500	43750	29750	36750	32500	39250	43750	40500	34500	28250	43000	28250
54	575250	459000	255000	191500	152000	127500	208000	214500	122250	110250	71500	122500	97500	104250	86000	71500	57000	45500	54250	92250	80000	60250	42250	39250	55500	54000	58250	45500	40750	45500	29000	24500	38000	32500	35500	33500	28250
55	918000	1147500	342000	201750	190500	229750	131250	183500	110250	81750	127500	97500	104250	87500	84750	91000	110000	43750	61000	45500	81000	47500	77250	36750	45500	43750	43750	38000	39250	40750	29000	28250	27000	35500	27750	31500	32500
56	1435000	643500	287250	287250	208000	177500	198250	142000	114000	157500	95500	114750	67250	103500	78500	73500	63750	57000	57000	57000	54250	51500	49500	49500	54250	49500	49500	35500	42000	43750	32500	28250	29000	45000	31500	29750	32500
57	574500	574000	269000	203750	152500	218750	138500	104250	117750	114750	105000	95500	81750	114750	83000	95500	81000	78750	64250	92000	67000	49500	39250	49500	59000	36750	42250	45500	34500	40750	36750	35500	38000	29000	32500	24000	31500
58	521250	688500	383250	201750	312750	169000	152000	127000	114750	143500	142000	71500	81750	78750	87000	67250	65250	49500	67000	63000	49500	60250	54250	49500	42250	47500	33500	34500	43750	33500	35500	42000	29000	38000	42250	26250	35500
59	574500	477500	318500	228750	198000	201750	190000	206000	152000	134000	94500	81750	115000	81000	89250	80000	83500	67250	54250	67000	66000	47500	43750	43750	36750	43750	42250	47500	35500	47500	54250	39250	35500	38000	36750	25750	31500
60	459500	458500	327000	338250	201750	287250	152500	147000	183000	110000	103500	81750	54250	83250	89250	81750	80000	78750	71500	54250	57000	47500	60250	38000	69000	38000	49500	45500	38000	48500	40750	36750	42000	35500	31500	35500	30750
61	590400	429000	228600	316800	237600	141300	228000	147000	115200	137700	98100	79200	91200	67500	81000	76200	72300	68400	78300	54600	52500	57000	55800	54600	55200	45600	47100	44100	39600	32400	38400	39600	33900	29400	33900	30900	34800
62	229800	526000	274500	275400	255600	294300	195300	157500	156600	132300	78200	91200	99600	80700	85800	85800	68400	59400	70500	63900	42600	48900	50700	44100	54600	34800	52500	50700	44100	42600	33300	45600	30000	35700	28800	23400	41400
63	433800	625500	413100	275700	249600	187200	213000	136800	160800	117000	126000	110700	94500	79200	76200	61800	84000	75600	52500	71400	58800	44100	48900	41400	44100	57000	48900	42600	38900	32400	45600	37800	28800	31500	34800	30900	29400
64	516600	366000	802200	273600	216900	218400	170400	157500	114000	127800	104400	94500	85200	80700	57000	72300	65100	68400	88400	54000	62400	48900	57000	44100	45600	47100	54600	58500	42600	48900	64000	21300	33300	35700	31500	33300	32400
65	598600	229800	294300	294300	153000	146700	170400	105600	146700	105600	91200	72300	99600	99600	76200	59400	68400	48900	65100	52500	52500	41400	59400	42600	42600	54600	41400	44100	34800	44100	30900	33300	30900	30900	35700	33900	26100
66	528000	413100	273600	188400	125100	207000	174000	105600	137700	105600	157500	142800	109200	105600	91500	75800	78500	85800	70200	60000	75600	54600	35700	50400	57600	37800	50700	49200	33300	30900	33900	45600	30900	40200	43200	33900	37800
67	688400	633600	250200	237600	249600	196800	176400	114800	125100	113400	117600	120600	112800	72300	73800	85800	57000	85100	65100	44100	70800	65100	55800	52500	53100	57000	37800	48900	48000	39000	39000	28200	27000	40500	30900	37800	43200
68	403500	393600	229200	459900	184500	273600	172200	136800	136800	110700	105600	105600	85800	105000	80700	94500	59400	59400	59400	59400	75600	44100	50700	68400	42600	44100	47100	50700	44100	40200	35700	33900	31500	34600	29400	33900	26400
69	919200	422400	366000	282600	178200	196200	125100	189000	170400	120600	130200	105000	91500	82800	76200	82800	80700	73800	48900	63000	68400	62100	54600	36900	47100	33900	44100	47100	35700	33900	45600	39000	36900	35700	32400	42300	39000
70	750600	393600	429000	262500	228000	157500	153000	136800	137700	109200	97800	132300	80700	85100	85800	85800	85800	59400	50700	50700	59400	44100	58500	39000	39000	42600	45600	33900	39000	45600	41400	41400	33900	45600	36900	33900	33900
71	963900	342000	344700	415800	195600	302400	172200	185600	124800	125100	80700	110700	90900	84600	91200	72300	52500	90000	78000	57000	59400	50700	54600	50700	48900	42600	35700	34800	28800	41400	38900	43200	40200	28200	30300	33900	28800
72	800600	393600	490500	318800	221400	202800	249600	171800	196800	109200	123600	76200	85800	80400	76200	78300	54600	54600	54600	69600	44100	40200	50700	33900	54000	45600	42600	45000	40200	50400	27000	41400	40200	32400	31500	28800	26400
73	787200	392400	457200	459900	257400	226000	161400	125100	112800	91500	91500	104400	80700	68400	117000	72000	88400	86800	59400	94800	59400	54000	41400	47100	40200	44100	52200	36900	47100	33300	39000	36900	36900	27600	35700	24900	23700
74	459000	688800	257400	344700	275700	229800	125100	178500	178200	146700	142800	110400	57000	54600	62400	82800	85800	62400	41400	72300	68400	57000	62400	54900	41400	39000	47100	41400	33900	28800	38900	31500	27000	32400	21600	34800	29400
75	624000	459900	344700	316800	257400	273600	136800	142800	124200	110700	121200	105600	85800	91200	80700	99600	74700	63900	45800	62400	68400	54600	40200	36700	47100	35700	40200	42600	47100	32400	29400	31500	30900	39000	43200	28200	45800
76	437850	598500	402800	308700	180250	227850	199500	144200	166800	98700	110250	98700	99400	110250	84350	75950	51450	79100	84350	57750	54950	51450	57050	48900	43400	40600	45500	33600	24850	40600	30450	36050	34300	43050	36750	29750	32900
77	402150	536550	506100	343350	218400	215250	136500	128800	133000	118650	133700	78750	69300	88900	75950	81200	57050	53200	63700	66500	57050	41650	53200	41650	51450	38850	51450	44100	38050	35350	45150	29750	41650	36850	34300	27300	29750
78	688800	659050	321650	207900	178500	219800	193200	145600	124950	131250	94500	72800	69300	84350	63700	46900	85400	69300	60900	53200	75600	67200	51450	41650	48300	58700	46900	41650	44100	39550	43050	37800	35700	34300	37800	31500	28000
79	533400	582400	291200	300300	300300	182000	160650	123200	136500	129500	121800	119000	84350	123200	64050	88900	81900	59150	54950	75600	45500	45500	44100	57050	58800	49700	45500	37800	43050	49000	49000	33600	30800	32900	29750	35350	36750
80	668500	337400	387500	318500	229600	207900	253050	228200	124950	106750	106050	102900	100100	88900	79800	66500	69300	68250	63700	72800	48300	38850	51450	56700	51450	46900	45500	43050	30450	40600	36050	33600	41650	40600	35350	32200	34300
81	602700	399000	444500	277200	177800	158200	154350	160650	145250	129150	88800	95200	75950	100100	81250	94500	88200	59150	57050	67200	63000	66600	54600	44100	45500	48300	37800	49350	53200	30800	36750	33600	44100	35350	29750	25200	33600
82	492800	600800	376600	332500	282450	177450	160650	193200	133700	117250	84350	102900	94150	84350	69300	102800	72800	72800	59150	54950	51450	58800	54950	58800	40600	46900	38850	39550	41650	45500	40600	29050	38050	29750	35350	29750	25900
83	437850	714000	282450	285250	229600	228200	161000	159600	159600	94150	128800	131600	108400	88900	75950	75950	72800	88100	59150	82950	58800	53200	57050	41850	60900	46900	40600	38750	41650	36750	37800	32900	30800	27300	39550	40600	24500
84	481950	492800	437850	288100	205800	228200	213500	201600	133000	183750	89400	88900	75950	72800	79800	84350	87150	57050	61250	61250	51450	51450	48300	48300	39550	48300	38850	35350	37800	36750	37800	43050	32200	33600	35350	43050	29750
85	604300	600100	248400	207900	234500	180850	159600	157500	151900	88900	123200	102900	88900	72800	94150	94150	59150	75950	46900	66500	49700	49700	65100	46900	57050	43050	64050	38850	41650	49700	40600	36050	41650	32200	38850	21000	27650
86	603600	481950	379750	364000	213500	239400	114450	149100	178500	140700	94150	96600	79800	98000	87150	92400	61250	61250	89250	57050	46900	58800	64050	56700	49700	53550	38850	46900	45500	33600	51450	36050	34300	30450	38850	45500	27650
87	481950	378600	298200	321650	220500	266700	191100	189000	144900	159600	112000	103600	100100	84350	72800	69300	57050	86500	54950	61250	57050	43050	66500	41650	49700	49700	51450	48300	46900	38750	35350	29750	45150	36050	36750	24500	32200
88	729750	427000	364000	532000	239400	145950	171150	128800	118650	129150	102900	106400	102900	79800	79800	91000	66500	75600	63000	67200	59150	56700	53200	49700	60900	37800	34300	35350	37800	48300	37800	30800	33600	46900	30800	26600	30450
89	534800	437850	320250	274750	160650	140700	198800	133000	164850	121800	109200	79800	82950	79800	69300	72800	67200	51450	61250	69300	51450	63700	59150	59150	48300	46900	39550	48300	37800	48300	29750	36750	39550	35350	31500	40950	39550
90	1004500	535500	492800	369600	321650	310800	227850	158200	113400	123200	79800	141400	83300	100100	57050	69300	86500	53200	61600	63700	53200	59150	39550	45500	43050	44100	53200	40600	36050	34300	45500	43050	35350	29750	29050	49350	32900
91	611200	343200	316800	183600	202800	192800	172800	161600	140800	96400	81600	107600	101600	76600	85200	55200	79200	85200	55200	81600	50400	42000	52000	57600	42000	57600	43200	41200	46800	46800	33200	37600	28000	32800	28800	36800	37800
92	550800	854000	333800	338000	214400	218400	173600	156000	158400	96400	107600	104400	67800	79200	83200	88800	78800	76800	59200	73600	64800	58800	57600	52800	40400	35200	54400	43200	31600	34000	34800	36000	34000	32000	38400	30400	32800
93	844800	572000	237600	251200	214400	248000	166800	129600	115200	107600	107600	114400	108000	91200	62800	78000	62800	70800	72000	50400	50400	60800	69600	50400	43200	43200	44400	54000	33200	42000	36800	42000	31200	42000	31600	34600	27200
94	812000	333600	422400	316800	262400	228800	176400	153600	117600	91200	165600	89400	83600	78000	83200	79200	66000	62800	58800	67200	52000	43200	42000	42000	38400	37800	49200	43200	39200	39200	38400	41200	35200	28000	31200	30000	32800
95	812600	704000	332800	364000	209000	193400	221200	105600	123600	122000	117600	89600	107600	89800	79200	72800	76000	63200	70400	80800	64000	62800	40400	40400	55200	49200	51800	38400	43200	33200	31200	37600	34000	44800	36000	36000	25800
96	784800	500400	308400	243200	152800	180800	183600	140800	140800	107600	139200	92800	101800	55200	67600	86400	76000	62800	70800	63600	69600	57600	44400	47600	53600	60000	50400	50400	28800	51800	36800	43200	46800	34000	35200	43200	31600
97	888800	687200	322800	304000	201600	216000	201600	135600	107600	107600	122000	98400	120000	70400	91200	62800	70400	63600	58800	52000	43200	42000	49200	49200	44400	34800	49200	52800	44800	42000	42000	43200	39600	36000	44400	36800	31200
98	678000	532000	305400	305400	210000	152000	195600	138200	140800	97600	133200	104400	91200	70200	84000	79000	86800	70800	80800	67200	83600	52000	56800	68800	56400	40400	34000	39000	38400	38000	34800	37800	40400	31200	28800	34800	28500
99	422400	550800	281600	228000	331200	140800	168000	130800	178400	101600	72800	112000	91200	86800	67600	88800	60800	45200	67600	65200	44400	52000	70000	43200	45200	43200	48000	50400	55200	42000	38400	30000	33200	40400	34800	28000	31600
100	735200	547200	229600	309400	202800	169800	188400	136000	121200	130800	122000	88400	79200	91200	91200	73600	63200	73600	62800	53600	62400	53600	46400	60800	42000	41200	44400	46500	36000	38400	28800	35200	41200	30000	28800	25600	32000
101	806000	364800	392400	496800	291200	228000	168000	218400	142800	113600	101600	107200	122000	79200	79200	76200	65200	69600	78000	49200	67200	43200	53600	50400	52000	56800	45200	40400	37600	43200	34000	31200	33200	34800	31600	32800	27600
102	816000	732000	456800	214400	352800	188400	177600	172800	117600	130800	101600	93000	91200	84400	83200	67600	56800	79200	62800	62800	74400	60800	60800	58800	45200	52000	41200	38000	41200	49200	44400	43200	32800	41200	31600	27200	28000
103	815200	475200	536000	332800	396400	273600	229600	122000	107600	121600	113600	104000	101600	72800	76000	68800	60800	70300	52000	58800	53800	65900	47600	44400	50400	54000	52000	55200	36800	40400	31600	32800	36800	33200	26000	38400	29600
104	612800	523200	367800	204000	198000	204000	152800	122000	107600	99600	91200	106000	91200	69600	79200	55200	88800	58900	67600	65200	69300	45200	43200	53600	67600	33200	55200	46400	42000	34000	35200	34800	34800	34800	36800	28800	33200
105	550800	459200	452000	416000	235200	261600	190400	133200	121600	114400	119400	94800	101600	79200	72800	79200	82800	67800	70000	56800	48400	57600	55200	45200	50400	42000	47800	36000	36800	55200	40400	44400	32000	28800	36800	32800	30000

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ข้อมูลค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณที่ได้จากการรันโปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรมที่ใช้แก้ปัญหาแขนหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่ 3

ภาคผนวก ค

ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบ

ชั้นที่	ขอบเขตจำกัดชั้น (จำนวนโหนดของต้นไม้คำตอบ)	ความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบแยกตามขนาดของต้นไม้เริ่มต้น							
		50	100	150	200	250	300	350	400
1	1-10		1						
2	11-20	63	16	2			1		2
3	21-30	245	23	9		3	4		1
4	31-40	903	60	20	6	5	3	1	1
5	41-50	4850	111	32	10	8	4	4	2
6	51-60	20650	202	59	19	17	11	1	4
7	61-70	12006	416	74	24	12	8	5	4
8	71-80	4078	832	102	40	22	16	11	5
9	81-90	2009	1787	169	43	20	12	7	5
10	91-100	1193	7607	234	70	29	12	11	6
11	101-110	807	27903	374	92	33	18	12	7
12	111-120	472	11899	626	111	47	23	21	12
13	121-130	214	3801	1016	171	49	24	20	9
14	131-140	104	1752	2057	233	80	25	22	13
15	141-150	56	1163	9068	298	85	39	20	11
16	151-160	24	782	31817	463	104	50	21	21
17	161-170	14	531	11413	686	129	62	28	22
18	171-180	9	433	3515	1116	197	72	37	22
19	181-190	7	315	1647	2257	250	71	49	26
20	191-200	2	290	1026	9745	346	94	39	25
21	201-210		253	698	34762	479	123	66	29
22	211-220		156	510	11009	739	143	66	32
23	221-230		72	351	3342	1105	216	65	40
24	231-240		49	305	1539	2393	262	102	57
25	241-250		19	257	995	10512	361	103	62
26	251-260	1	23	190	633	36850	484	116	55
27	261-270		18	200	428	10451	736	169	74
28	271-280		9	177	377	3181	1216	186	75
29	281-290		5	122	291	1468	2210	252	108
30	291-300		6	129	221	956	11042	341	109
31	301-310		1	128	199	612	38658	480	132
32	311-320		2	95	169	425	10149	760	190
33	321-330		5	45	155	306	3133	1156	212
34	331-340			16	113	268	1335	2339	276

ตารางที่ ค.1 ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบสภาพแวดล้อมที่ 1

ชั้นที่	ขอบเขตจำกัดชั้น (จำนวนโหนดของต้นไม้คำตอบ)	ความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบแยกตามขนาดของต้นไม้เริ่มต้น							
		50	100	150	200	250	300	350	400
35	341-350		1	16	118	198	843	11660	361
36	351-360		1	10	88	173	564	39668	515
37	361-370		1	9	67	139	396	10075	708
38	371-380			4	79	143	348	2932	1165
39	381-390			4	71	115	262	1403	2291
40	391-400			3	69	107	189	858	11808
41	401-410			2	84	81	189	579	40938
42	411-420			1	44	67	146	375	9855
43	421-430			4	19	66	109	292	2833
44	431-440			1	14	58	114	274	1356
45	441-450			2	11	55	73	189	836
46	451-460			1	5	50	84	172	545
47	461-470				5	47	62	145	359
48	471-480				4	35	73	130	313
49	481-490				4	30	44	84	266
50	491-500				2	49	55	83	194
51	501-510				1	69	46	69	160
52	511-520				1	32	52	42	120
53	521-530					17	41	63	106
54	531-540				1	9	33	56	76
55	541-550				1	5	29	46	81
56	551-560					2	43	47	56
57	561-570					1	42	43	59
58	571-580						27	36	60
59	581-590				1	6	29	40	48
60	591-600					3	39	39	51
61	601-610				1	1	34	19	45
62	611-620				1		27	17	36
63	621-630					1	10	21	40
64	631-640					2	8	23	36
65	641-650					1	2	16	25
66	651-660					1	3	27	28
67	661-670						2	23	27
68	671-680					1		20	24

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบสภาพแวดล้อมที่ 1

ชั้นที่	ขอบเขตจำกัดชั้น (จำนวนโหนดของต้นไม้คำตอบ)	ความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบแยกตามขนาดของต้นไม้เริ่มต้น							
		50	100	150	200	250	300	350	400
69	681-690						4	18	23
70	691-700							34	20
71	701-710						2	25	17
72	711-720							23	13
73	721-730				1		2	12	20
74	731-740							5	13
75	741-750					1		5	21
76	751-760							3	13
77	761-770						1		13
78	771-780						1	1	21
79	781-790						1	2	25
80	791-800				1		2	1	23
81	801-810								28
82	811-820								13
83	821-830							1	8
84	831-840								3
85	841-850								5
86	851-860								2
87	861-870								1
88	871-880							1	
89	881-890								
90	891-900								
91	901-910								1
92	911-920							1	1
93	921-930							1	
94	931-940								
95	941-950								
96	951-960								
97	961-970							1	
98	971-980								
99	981-990								
100	991-1000								
101	1001-1010								
102	1011-1020								

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบสภาพแวดล้อมที่ 1

ชั้นที่	ขอบเขตจำกัดชั้น (จำนวนโหนดของต้นไม้คำตอบ)	ความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบแยกตามขนาดของต้นไม้เริ่มต้น							
		50	100	150	200	250	300	350	400
103	1021-1030							1	
104	1031-1040								
105	1041-1050								
106	1051-1060								1
107	1061-1070								
108	1071-1080								
109	1081-1090								
110	1091-1100								
111	1101-1110								
112	1111-1120								
113	1121-1130								
114	1131-1140								
115	1141-1150								
116	1151-1160								
117	1161-1170								2
118	1171-1180								1
119	1181-1190								
120	1191-1200								1
	รวม	47707	60545	66540	70310	72746	74648	76211	77359

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบสภาพแวดล้อมที่ 1

ชั้นที่	ขอบเขตจำกัดชั้น (จำนวนโหนดของต้นไม้คำตอบ)	ความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบแยกตามขนาดของต้นไม้เริ่มต้น							
		50	100	150	200	250	300	350	400
1	1-10	1							
2	11-20	38	7	3	3	1			
3	21-30	220	20	5	4	2	2		
4	31-40	809	56	14	3	3	4	1	1
5	41-50	4632	77	22	6	3	3		3
6	51-60	20478	196	34	14	9	4	4	1
7	61-70	10283	323	60	22	14	10	2	6
8	71-80	3543	604	80	33	17	2	4	4
9	81-90	1754	1417	139	40	14	4	7	6
10	91-100	1063	7412	173	45	28	4	8	8
11	101-110	699	27602	281	74	18	13	6	4
12	111-120	459	9898	478	87	33	23	11	8
13	121-130	237	3077	810	122	35	22	12	6
14	131-140	114	1377	1661	151	52	20	14	6
15	141-150	60	839	9077	255	72	41	16	9
16	151-160	41	603	31662	331	72	28	23	10
17	161-170	20	432	9213	531	111	42	30	10
18	171-180	12	331	2882	833	146	36	27	17
19	181-190	8	290	1363	1787	191	53	28	15
20	191-200	4	226	864	10044	246	86	29	19
21	201-210	5	220	513	35080	344	91	41	23
22	211-220	3	132	406	8986	570	125	33	28
23	221-230	1	81	334	2638	947	142	57	33
24	231-240	2	32	229	1247	1836	186	63	38
25	241-250	1	26	203	768	11020	299	63	30
26	251-260		14	178	507	37240	369	118	38
27	261-270		12	144	360	8483	592	122	57
28	271-280		9	104	296	2567	936	124	55
29	281-290		5	104	246	1201	1817	187	61
30	291-300		5	93	182	699	11551	278	77
31	301-310		5	110	152	473	39696	373	100
32	311-320		3	71	116	373	8074	597	132
33	321-330		3	55	92	262	2466	906	162
34	331-340		2	19	89	221	1146	1860	191

ตารางที่ ค.2 ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบสภาพแวดล้อมที่ 2

ชั้นที่	ขอบเขตจำกัดชั้น (จำนวนโหนดของต้นไม้คำตอบ)	ความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบแยกตามขนาดของต้นไม้เริ่มต้น							
		50	100	150	200	250	300	350	400
35	341-350			17	85	167	651	12129	272
36	351-360			8	96	140	484	40830	397
37	361-370		1	9	67	133	341	7912	602
38	371-380		1	7	51	100	261	2299	918
39	381-390	1		5	64	97	180	1075	1889
40	391-400			5	55	78	177	724	12855
41	401-410			4	59	74	152	441	42251
42	411-420			3	55	62	118	349	7553
43	421-430			2	22	51	96	253	2274
44	431-440				20	43	81	170	1063
45	441-450			2	7	38	62	122	630
46	451-460			3	4	46	66	126	445
47	461-470			1	11	41	55	104	284
48	471-480			1	3	33	64	84	253
49	481-490				2	38	39	82	163
50	491-500			1	3	38	39	75	149
51	501-510				1	47	27	54	121
52	511-520				1	36	43	61	94
53	521-530					13	26	49	90
54	531-540					9	30	54	83
55	541-550				1	6	22	20	73
56	551-560			1	1	7	29	45	52
57	561-570				1	2	27	30	57
58	571-580				1	3	20	41	45
59	581-590						21	20	38
60	591-600					4	26	30	46
61	601-610					3	34	24	27
62	611-620						22	21	26
63	621-630				1	1	12	22	31
64	631-640					1	9	19	23
65	641-650						6	19	18
66	651-660						4	20	20
67	661-670				1		1	15	26
68	671-680						1	21	21

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบสภาพแวดล้อมที่ 2

ชั้นที่	ขอบเขตจำกัดชั้น (จำนวนโหนดของต้นไม้คำตอบ)	ความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบแยกตามขนาดของต้นไม้เริ่มต้น							
		50	100	150	200	250	300	350	400
69	681-690					1	2	17	22
70	691-700					2	2	24	12
71	701-710							33	18
72	711-720							15	16
73	721-730						1	7	8
74	731-740					1	1	1	14
75	741-750							3	11
76	751-760					1		1	14
77	761-770					1			13
78	771-780							2	15
79	781-790								12
80	791-800								12
81	801-810							1	25
82	811-820								15
83	821-830							1	7
84	831-840							2	4
85	841-850								1
86	851-860								2
87	861-870								
88	871-880							1	1
89	881-890								
90	891-900								2
91	901-910								
92	911-920							1	1
93	921-930								
94	931-940							1	
95	941-950								1
96	951-960								
97	961-970								
98	971-980								
99	981-990								1
100	991-1000								
101	1001-1010								
102	1011-1020								1

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบสภาพแวดล้อมที่ 2

ชั้นที่	ขอบเขตจำกัดชั้น (จำนวนโหนดของต้นไม้คำตอบ)	ความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบแยกตามขนาดของต้นไม้เริ่มต้น							
		50	100	150	200	250	300	350	400
103	1021-1030								
104	1031-1040								
105	1041-1050								
106	1051-1060								
107	1061-1070								
108	1071-1080								
109	1081-1090								
110	1091-1100								
111	1101-1110								
112	1111-1120								
113	1121-1130								
114	1131-1140								
115	1141-1150								
116	1151-1160								
117	1161-1170								
118	1171-1180								
119	1181-1190								
120	1191-1200								
121	1201-1210								
122	1211-1220								
123	1221-1230								
124	1231-1240								
125	1241-1250								
126	1251-1260								1
	รวม	44488	55338	61453	65756	68620	71119	72494	74276

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบสภาพแวดล้อมที่ 2

ชั้นที่	ขอบเขตจำกัดชั้น (จำนวนโหนดของต้นไม้คำตอบ)	ความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบแยกตามขนาดของต้นไม้เริ่มต้น							
		50	100	150	200	250	300	350	400
1	1-10								
2	11-20				1				
3	21-30	1							
4	31-40	19		1	1	1			
5	41-50	171	4	2	1	2		2	
6	51-60	935	7	1	5				
7	61-70	400	20	5	2	2			
8	71-80	167	45	7	3		2	3	1
9	81-90	88	116	14	2			2	1
10	91-100	51	593	21	9	2			3
11	101-110	47	2427	31	3	2	3	1	1
12	111-120	19	846	54	8		6	1	
13	121-130	9	316	93	11	5	3	1	
14	131-140	5	123	207	27	8		3	3
15	141-150	1	68	1024	25	10		3	7
16	151-160	3	54	3761	38	10	8	1	2
17	161-170	3	36	1233	68	17	7	5	4
18	171-180		39	404	123	18	6	5	
19	181-190		19	182	245	34	9	4	5
20	191-200		28	109	1371	32	15	7	5
21	201-210		16	78	5026	66	15	7	5
22	211-220	1	13	52	1439	77	33	10	2
23	221-230		9	50	481	174	18	10	4
24	231-240		3	26	218	333	34	12	5
25	241-250		2	38	129	1763	59	10	8
26	251-260		1	18	86	6288	67	24	3
27	261-270			12	70	1704	110	36	9
28	271-280		1	14	42	515	184	23	12
29	281-290			14	47	223	395	41	17
30	291-300			17	28	134	1973	68	15
31	301-310			13	19	112	7048	77	22
32	311-320			6	18	67	1841	124	24
33	321-330			2	12	42	539	239	48
34	331-340			4	13	33	246	433	52

ตารางที่ ค.3 ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบสภาพแวดล้อมที่ 3

ชั้นที่	ขอบเขตจำกัดชั้น	ความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบแยกตามขนาดของต้นไม้เริ่มต้น							
	(จำนวนโหนดของต้นไม้คำตอบ)	50	100	150	200	250	300	350	400
35	341-350			2	20	29	144	2338	70
36	351-360			1	20	34	93	8135	102
37	361-370				10	28	75	1922	138
38	371-380		1	1	17	16	59	552	234
39	381-390				5	17	48	252	466
40	391-400				11	6	35	150	2588
41	401-410				12	18	25	122	9188
42	411-420				6	12	25	72	2128
43	421-430				5	15	35	61	573
44	431-440				3	7	18	40	299
45	441-450			1	2	13	19	47	183
46	451-460				1	8	19	35	124
47	461-470			1		5	14	28	92
48	471-480					7	13	22	50
49	481-490					5	11	13	54
50	491-500				2	3	7	19	46
51	501-510					15	9	10	31
52	511-520					2	9	13	30
53	521-530					1	8	18	21
54	531-540					6	8	11	21
55	541-550					3	7	13	11
56	551-560						6	7	19
57	561-570						8	10	9
58	571-580						5	6	11
59	581-590				1		5	18	12
60	591-600						4	4	11
61	601-610						10	7	8
62	611-620						3	2	10
63	621-630						2	6	12
64	631-640						2	4	13
65	641-650						1	3	4
66	651-660						1	2	11
67	661-670							2	4
68	671-680							3	2

ตารางที่ ค.3 (ต่อ) ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบสภาพแวดล้อมที่ 3

ชั้นที่	ขอบเขตจำกัดชั้น (จำนวนโหนดของต้นไม้คำตอบ)	ความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบแยกตามขนาดของต้นไม้เริ่มต้น							
		50	100	150	200	250	300	350	400
69	681-690						1	6	3
70	691-700							4	5
71	701-710							7	6
72	711-720						1	7	2
73	721-730							2	2
74	731-740							3	3
75	741-750								5
76	751-760						1	1	4
77	761-770					1			5
78	771-780								4
79	781-790								2
80	791-800						1		6
81	801-810								4
82	811-820								5
83	821-830								5
84	831-840								1
85	841-850								3
	รวม	1920	4787	7499	9686	11925	13353	15129	16898

ตารางที่ ค.3 (ต่อ) ตารางแจกแจงความถี่ของขนาดของต้นไม้คำตอบสภาพแวดล้อมที่ 3

<u>ภาคผนวก ง</u>

ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ

เมื่อกำหนดขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 800 , 1600 , 3200 , 6400 โหนด

ชุดของพารามิเตอร์	ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น				
	400	800	1600	3200	6400
11	6600	3800	2700	1500	1200
26	6300	3600	2400	1800	1200
41	6000	3600	2600	1600	1200
56	6000	3750	2500	2000	1250
71	6600	3900	2400	1800	1200
86	6300	3850	2800	1750	1400
101	6400	4400	2400	2000	1200

ตารางที่ ง.1 ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ
เมื่อกำหนดขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 800 , 1600 , 3200 , 6400 โหนด ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 1

ชุดของพารามิเตอร์	ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น				
	400	800	1600	3200	6400
11	4400	2500	1700	1300	900
26	3750	2550	1800	1200	1050
41	4000	2400	1800	1200	1000
56	4750	2500	2000	1250	1000
71	4200	2400	1800	1200	900
86	4200	2800	1750	1400	1050
101	4400	2800	2000	1200	800

ตารางที่ ง.2 ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ
เมื่อกำหนดขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 800 , 1600 , 3200 , 6400 โหนด ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 2

ชุดของพารามิเตอร์	ขนาดของต้นไม้เริ่มต้น				
	400	800	1600	3200	6400
11	30400	13800	8300	4100	2100
26	34200	15150	8100	4050	2100
41	25200	17000	6600	4400	2200
56	32500	15500	8000	4000	2500
71	28800	14100	9000	4200	2400
86	27650	16800	7350	4200	2450
101	27600	14000	8800	5200	2400

ตารางที่ ง.3 ค่าความเพียรพยายามเชิงคำนวณ
เมื่อกำหนดขนาดของต้นไม้เริ่มต้น 800 , 1600 , 3200 , 6400 โหนด ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ 3

ประวัติผู้เขียน

นางสาวขนิษฐา หุตะเมขลิน เกิดวันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2514 ที่จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาสถิติ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2534 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2540