บทที่ 6

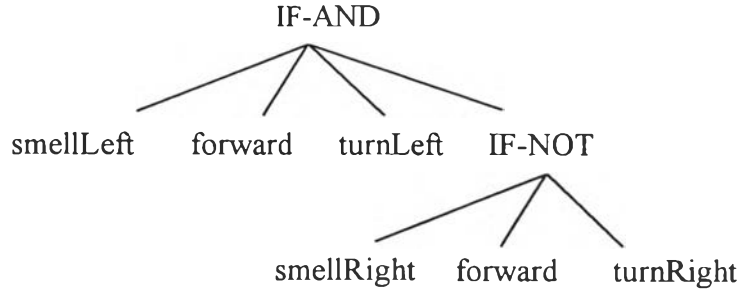
การวิเคราะห์ความทนทานของคำตอบ

จากบทที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า การปรับปรุงกระบวนการวิวัฒนาการในระหว่างการหาคำตอบ มีผลทำให้ความทนทานของคำตอบมีสูงขึ้น ในบทนี้เป็นการวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้คำตอบเหล่านั้นมีความทนทานสูงขึ้น โดยใช้การทดลองในบทที่ผ่านๆมาเป็นกรณีศึกษา โดยในระหว่างการทดลองในบทที่ 4 และ 5 ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ ในระหว่างการทดลองให้มากเท่าที่จะเป็นไปได้ และได้นำมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อความทนทานของคำตอบ โดยได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับ Trace หรือ ลำดับของการปฏิบัติคำสั่งภายในคำตอบและผลของการปฏิบัติคำสั่งเหล่านั้น หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นประสบการณ์ที่คำตอบนั้นได้เรียนรู้มา ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่มีผลต่อความทนทานของคำตอบ ดังจะได้กล่าวในเนื้อหาต่อไป ผลของการวิเคราะห์จะเป็นประโยชน์ในการหาวิธีเพื่อเพิ่มความทนทานให้กับคำตอบวิธีอื่นๆ ต่อไป

6.1 ความหมายของ Trace

โครงสร้างของผลเฉลย หรือคำตอบในวิธีกำหนดการเชิงพันธุกรรมสามารถแทนด้วยโครงสร้างแบบต้นไม้ และการนำคำตอบไปประมวลผลก็คือ การประมวลผลคำสั่งต่างๆ ในต้นไม้ เริ่มต้นตั้งแต่ตำแหน่งรากของต้นไม้ เมื่อประมวลผลไปจนสิ้นสุดต้นไม้จะเรียกว่าเป็น 1 รอบของการประมวลผลต้นไม้ หลังจากนั้นก็จะเริ่มต้นทำการประมวลผลในตำแหน่งรากใหม่ ซึ่งจะดำเนินการซ้ำไปซ้ำมาเช่นนี้ไปจนกระทั่งถึงเกณฑ์ของเงื่อนไขในการวนซ้ำที่กำหนดจึงจะหยุดการประมวลผล สำหรับปัญหาหุ่นยนต์เดินหลบหลีกสิ่งกีดขวางเพื่อไปหาเป้าหมายในงานวิจัยนี้ ดังตารางที่ 4.1 เงื่อนไขในการวนซ้ำ คือจะหยุดประมวลผลต้นไม้เมื่อหุ่นยนต์สามารถไปหาเป้ามายได้ หรือประมวลผลคำสั่งต่างๆ ในต้นไม้นั้นเกิน 5,000 คำสั่ง ซึ่งอาจจะเป็นจำนวนรอบเท่าไรก็ได้

ในการประมวลผลต้นไม้แต่ละรอบนั้น ลำดับการประมวลผลคำสั่งในต้นไม้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสถานการณ์ของหุ่นยนต์ขณะนั้น ซึ่งทำให้ผลของการปฏิบัติคำสั่งแต่ละครั้งแตกต่างกันออกไป ยกตัวอย่างดังต้นไม้เล็กๆ ในรูปที่ 6.1 ซึ่งแทนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (IF-AND smellLeft forward turnLeft (IF-NOT smellRight forward turnRight))



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

ถ้าในรอบการประมวลผลนั้น คำสั่ง smellLeft ส่งคืนค่าจริงนั่นคือมีเป้าหมายอยู่ในทิศทางด้านซ้ายของหุ่นยนต์ และคำสั่ง forward ส่งคืนค่าจริงเช่นเดียวกันคือหุ่นยนต์เดินหน้าได้โดยไม่มีการชน ก็จะไปปฏิบัติคำสั่ง turnLeft สั่งให้หุ่นยนต์หันไปด้านซ้ายและจะส่งคืนค่าจริงให้กับฟังก์ชั่น IF-AND โดยสามารถเขียนลำดับการประมวลผลคำสั่งในรอบการประมวลนั้นได้เป็น smellLeft (true) – forward (true) – turnLeft (true)

หรือถ้าในรอบการประมวลผลนั้น ไม่มีเป้าหมายอยู่ในทิศทางด้านซ้ายของหุ่นยนต์ ค่าส่งคืนของคำสั่ง smellLeft เป็นเท็จ และหุ่นยนต์สามารถเดินหน้าได้ค่าส่งคืนของคำสั่ง forward เป็นจริง ก็จะไปปฏิบัติ IF-NOT และ smellRight ซึ่งเป็นอาร์กิวเมนต์แรกของฟังก์ชัน IF-NOT ถ้ามีเป้าหมายอยู่ในทิศทางด้านขวาของหุ่นยนต์ ก็จะส่งคืนค่าจริงและไปปฏิบัติคำสั่ง turnRight สั่งให้หุ่นยนต์หันไปด้านขวาซึ่งจะส่งคืนค่าจริงให้กับฟังก์ชั่น IF-NOT ในกรณีนี้สามารถเขียนลำดับการประมวลผลคำสั่งในรอบการประมวลนั้นได้เป็น smellLeft (false) – forward (true) – smellRight (true) – turnRight (true)

เห็นได้ว่าลำดับการประมวลผลคำสั่งต่างๆในโปรแกรมในแต่ละรอบการประมวลผล จะขึ้นอยู่กับสถานการณ์ของหุ่นยนต์ในขณะนั้นๆ ผู้วิจัยจะนิยามลำดับการประมวลผลคำสั่งในแต่ละรอบการประมวลผลนั้นว่า Trace ซึ่งรวมไปถึงผลหรือค่าส่งคืนของการปฏิบัติคำสั่งเหล่านั้นด้วย ตัวอย่างของ Trace 2 แบบดังที่ได้ยกตัวอย่างมา คือ

- smellLeft (true) – forward (true) – turnLeft (true)
- smellLeft (false) – forward (true) – smellRight (true) – turnRight (true) เป็นต้น

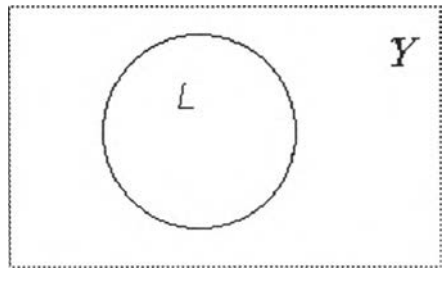
ในการประมวลผลผลเฉลย หรือคำตอบหนึ่งๆนั้น ถ้าต้นไม้ที่แทนผลเฉลยนั้นมีความซับซ้อนมาก Trace ที่เกิดขึ้นสามารถเป็นไปได้มากมาย และอาจมีทั้ง Trace ที่ซ้ำๆ กัน หรือไม่ก็ได้ ค่าส่งคืนที่แตกต่างกันของการปฏิบัติคำสั่งหนึ่งๆ ก็จะทำให้เกิด Trace ที่แตกต่างกันได้เป็นจำนวนมาก หรือการนำผลเฉลยนั้นไปประมวลผลในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป ก็จะได้ชุดของ Trace ที่แตกต่างกันออกไป

เมื่อพิจารณาดูชุดของ Trace สำหรับการประมวลผลผลเฉลยในสภาพแวดล้อมหนึ่งๆ อาจจะมองได้ว่าเป็นรูปแบบการตอบสนองของหุ่นยนต์ต่อสถานการณ์แบบต่างๆ ซึ่งในหัวข้อต่อๆ ไปจะเป็นการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของ Trace ที่มีผลต่อความทนทานของคำตอบ

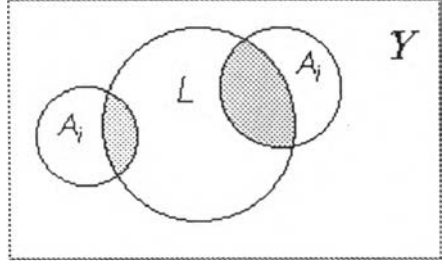
6.2 วิธีวิเคราะห์ความทนทานของคำตอบ

ในส่วนนี้อธิบายถึงวิธีการวิเคราะห์ความทนทานของคำตอบ โดยพิจารณาถึงชุดของ Trace ที่คำตอบนั้นได้ผ่านการเรียนรู้มาว่ามีผลต่อความทนทานของคำตอบอย่างไรโดยผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูล Trace ของคำตอบจากการทดลองที่ผ่านมาในบทที่ 4 และ บทที่ 5 ทั้งหมด ทั้งในส่วนขั้นตอนการเรียนรู้ และในขั้นตอนการทดสอบความทนทาน เพื่อนำมาวิเคราะห์ดังนี้

เริ่มจากการทดลองหาคำตอบที่ยังไม่มีการปรับปรุงกระบวนการใดๆในบทที่ 4 ซึ่งทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 20 ครั้ง ในการทดลองแต่ละครั้งได้โปรแกรมควบคุมที่ประสบความสำเร็จที่เป็นคำตอบมา 1 ตัว โดยที่ในแต่ละการทดลองผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลของ Trace สำหรับการประมวลผลคำตอบนั้นในสภาพแวดล้อมที่ได้เรียนรู้มา ซึ่งในที่นี้มีเพียง 1 สภาพแวดล้อม หรืออาจกล่าวได้ว่า เป็น Trace ที่แสดง **ประสบการณ์** หรือรูปแบบการตอบสนองของหุ่นยนต์ต่อสถานการณ์แบบต่างๆที่คำตอบนั้นได้เรียนรู้มา โดยเก็บรวบรวมเฉพาะ Trace ที่ไม่ซ้ำกันในการทดลองนั้นเท่านั้น และจะแทนชุดของ Trace เหล่านี้ด้วยสัญลักษณ์เซต L เป็น subset ของ Trace ที่เป็นไปได้ทั้งหมดสำหรับการประมวลผลคำตอบนั้นในสภาพแวดล้อมใดๆซึ่งแทนได้ได้ด้วยเซต Y ดังรูปที่ 6.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของเซต L และเซต Y



รูปที่ 6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซต L และเซต Y



รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซต L และเซต A_i ใดๆ

ในการนำคำตอบที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้งไปทดสอบความทนทานตามวิธีที่กล่าวในหัวข้อ 4.3 นั้น คำตอบแต่ละตัวถูกนำไปทดสอบเพื่อควบคุมหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่สร้างขึ้นมาใหม่เป็นจำนวนมาก โดยแบ่งกลุ่มสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบความทนทานตามค่า d_{Test} หรือ ค่าเปอร์เซนต์สิ่งกีดขวางที่ถูกขยับตำแหน่งไปจากตำแหน่งเดิม ซึ่งมีจำนวนกลุ่มละ 1,000 สภาพแวดล้อม การนำคำตอบไปทดสอบกับสภาพแวดล้อมแต่ละแบบเหล่านี้จะได้ชุดของ Trace ที่แตกต่างกันออกไป ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลของ Trace ที่เกิดขึ้นและจะแทนชุดของ Trace ที่เกิดขึ้นเมื่อนำคำตอบนั้นไปควบคุมหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่ใช้ทดสอบที่ i และเป็น Trace ที่ไม่ซ้ำกันด้วยเซต A_i ความสัมพันธ์ของเซต A_i ใดๆ กับเซต L นั้นแสดงได้ดังรูปที่ 6.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เซต A_i เป็น subset ของเซต Y เช่นกัน และเซต A_i มีบางส่วนที่ซ้อนทับ (intersect) กับเซต L นั่นคือ ในการนำคำตอบนั้นไปประมวลผล ควบคุมหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่ใช้ทดสอบที่ไม่เคยเรียนรู้มาก่อน มี Trace ที่เกิดขึ้นบางส่วนไปซ้ำกับ Trace ที่คำตอบนั้นได้เรียนรู้มา หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า มีการนำความรู้ที่ได้เรียนรู้หรือประสบการณ์ไปใช้ในการแก้ไขสถานการณ์ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เคยเรียนรู้มาก่อนได้ ซึ่งในส่วนนี้เองที่ผู้วิจัยเห็นว่าน่าจะมีความสัมพันธ์กับความทนทานของคำตอบ โดยได้ตั้งสมมติฐานดังนี้

- คำตอบที่มีความทนทานสูง จะมีการนำประสบการณ์ที่ได้เรียนรู้มาใช้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เคยพบเป็นอัตราส่วนที่สูง

เราจะเรียกแทน อัตราส่วนการนำประสบการณ์ของคำตอบที่ได้เรียนรู้มาใช้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เคยพบที่ i ว่า S_i ซึ่งหาได้จาก

$$S_i = \frac{|L \cap A_i|}{|A_i|} \times 100\% \qquad \ldots\ldots (1)$$

เมื่อ $|L \cap A_i|$ แทนขนาดของเซต $L \cap A_i$ หรือจำนวน Trace ในเซตนั้น ดังพื้นที่แรเงาในรูป 6.3 และ $|A_i|$ คือจำนวน Trace ในเซต A_i

การวิเคราะห์ความทนทาน เพื่อทดสอบสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ จะแยกวิเคราะห์ตามส่วนการทดลอง 3 ส่วน ดังต่อไปนี้ ซึ่งแบ่งตามหัวข้อการทดลองในบทที่ 5

- **ส่วนที่** 1 เป็นส่วนการทดลองที่เพิ่มความทนทานของคำตอบโดยการเพิ่มจำนวนสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการเรียนรู้ ซึ่งได้ผลการทดสอบความทนทานดังรูปที่ 5.1

- **ส่วนที่** 2 เป็นส่วนการทดลองที่เพิ่มความทนทานของคำตอบ โดยการเพิ่มความแตกต่างของสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการเรียนรู้ให้มากขึ้น สำหรับการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อมจำนวน 50 สภาพแวดล้อม ซึ่งได้ผลการทดสอบความทนทานดังรูปที่ 5.2

- **ส่วนที่** 3 เป็นส่วนการทดลองที่เพิ่มความทนทานของคำตอบ โดยการเพิ่มความแตกต่างของสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการเรียนรู้ให้มากขึ้น สำหรับการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อมจำนวน 10 สภาพแวดล้อม ซึ่งได้ผลการทดสอบความทนทานดังรูปที่ 5.3

ในแต่ละส่วนที่กล่าวมานั้นยังมีการแบ่งการทดลองออกเป็นหลายๆ กลุ่มย่อยอีก ดังเห็นได้จากเส้นกราฟในผลการทดลองแต่ละส่วนซึ่งมีหลายเส้น แต่ละเส้นแสดงถึงการทดลองในกลุ่มย่อยซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในการทดลองต่างๆ กันไป แต่ละเส้นแสดงความทนทานของคำตอบที่แตกต่างกันออกไป ในการวิเคราะห์แต่ละส่วนนั้นมีขั้นตอนแบบเดียวกัน โดยจะทำการวิเคราะห์ความทนทานในกลุ่มย่อย ณ ที่ d_{Test} แต่ละค่าซึ่งมีสภาพแวดล้อมที่ใช้ทดสอบความทนทานเป็นจำนวน 1,000 สภาพแวดล้อม

ให้ $S_i(k)$ เป็นอัตราส่วนการนำประสบการณ์ของคำตอบที่ได้จากการทดลองครั้งที่ k ที่ได้เรียนรู้มาใช้ในสภาพแวดล้อมที่ใช้ทดสอบความทนทานที่ i หรือ S_i ของการทดลองครั้งที่ k

$L(k)$ เป็นเซตของ Trace หรือประสบการณ์ที่คำตอบที่ได้จากการทดลองครั้งที่ k ได้เรียนรู้มา

ในแต่ละกลุ่มย่อยซึ่งทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 20 ครั้งได้รวบรวมข้อมูล $S_i(k)$ เพื่อนำไปหา ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนการนำประสบการณ์ของคำตอบที่ได้เรียนรู้มาใช้ในสภาพแวดล้อมที่ใช้ทดสอบความทนทาน ณ ที่ d_{Test} หนึ่งๆ สำหรับการทดลองในกลุ่มย่อยนั้น แทนได้ด้วย S_{All} ซึ่งหาได้จาก

$$S = \frac{\sum_{k=1}^{20}\sum_{i=1}^{n} S_i(k)}{20 \times n} \qquad \ldots\ldots(2)$$

โดยที่ n คือจำนวนสภาพแวดล้อมทั้งหมด ณ ที่ d_{Test} หนึ่งๆ ที่ใช้ทดสอบความทนทานซึ่งมีค่าเป็น 1,000

ถ้าพิจารณาเฉพาะในกลุ่มสภาพแวดล้อมที่คำตอบประสบความสำเร็จเท่านั้น ค่า n จะมีค่าเป็นจำนวนสภาพแวดล้อมที่ประสบความสำเร็จ ณ ที่ d_{Test} หนึ่งๆ ค่า S ที่คำนวณได้จะเรียกว่า S_{Succ}

และถ้าพิจารณาเฉพาะในกลุ่มสภาพแวดล้อมที่คำตอบไม่ประสบความสำเร็จ ค่า n จะมีค่าเป็นจำนวนสภาพแวดล้อมที่ไม่ประสบความสำเร็จ ณ ที่ d_{Test} หนึ่งๆ ค่า S ที่คำนวณได้จะเรียกว่า S_{Fail}

จะทำการหาค่า S_{All} S_{Succ} และ S_{Fail} ในการทดลองทุกส่วนและทุกการทดลองกลุ่มย่อยแล้วนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง S และ ความทนทาน $R(d_{Test})$ โดยจะไม่ทำการวิเคราะห์ที่ทุกค่า d_{Test} แต่จะเลือกวิเคราะห์ ณ ที่ d_{Test} เป็น 10% และ 30% เพราะค่าความทนทาน ณ ที่ d_{Test} มากกว่า 30% มีความแตกต่างจากที่ d_{Test} เป็น 30% ไม่มากนักในการทดลองเกือบทุกส่วน

และได้ทำการรวบรวมค่า $L(k)$ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของ $|L|$ หรือขนาดของ Trace หรือประสบการณ์โดยเฉลี่ยที่คำตอบได้เรียนรู้มาในการทดลองทุกส่วนและทุกการทดลองกลุ่มย่อยเช่นกัน เพื่อวิเคราะห์ว่าขนาดของประสบการณ์ หรือ จำนวน Trace ที่คำตอบได้เรียนรู้มามีผลต่อความทนทานของคำตอบเช่นไร

ค่า | L | คำนวณได้จาก

$$|L| = \frac{\sum_{k=1}^{20} |L(k)|}{20} \qquad \ldots\ldots (3)$$

และหาความสัมพันธ์ระหว่าง | L | กับ S ใดๆ สำหรับผลการวิเคราะห์ความทนทานสำหรับการทดลองในส่วนต่างๆ และในการทดลองกลุ่มย่อยๆ กล่าวในหัวข้อต่อไป

6.3 ผลการวิเคราะห์ความทนทานของคำตอบ

ในส่วนนี้เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์ความทนทานของการทดลองต่างๆ โดยจะแยกแสดงผลตามการทดลองในส่วนต่างๆ ตามวิธีที่ได้กล่าวมา

6.3.1 ผลการวิเคราะห์ความทนทานในการทดลองส่วนที่ 1

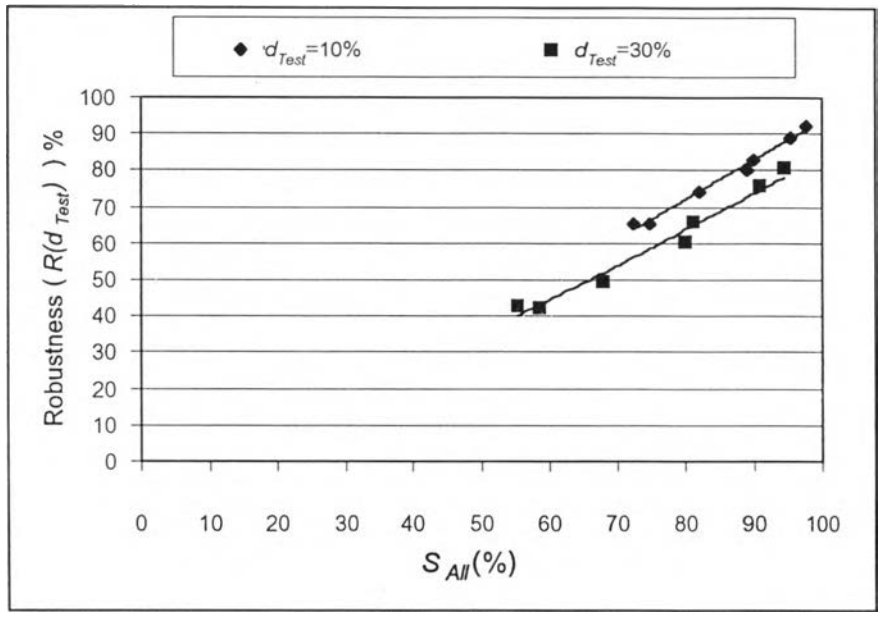
การทดลองในส่วนที่ 1 นี้เป็นส่วนการทดลองที่เพิ่มความทนทานของคำตอบโดยการเพิ่มจำนวนสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการเรียนรู้ ซึ่งได้ผลการทดสอบความทนทานดังรูปที่ 5.1

จากผลการวิเคราะห์ความทนทานซึ่งแยกตามค่า d_{Test} ที่ 10% และ 30% ของการทดลองในกลุ่มย่อยๆ ซึ่งอ้างอิงค่าความทนทานจากตารางที่ 5.1 ได้ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 6.1 ดังนี้

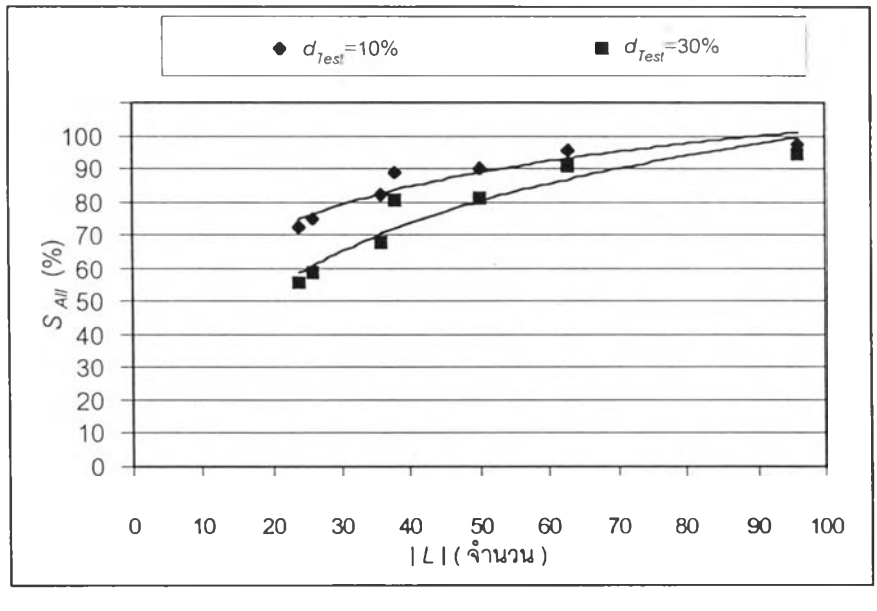
ผล / การทดลอง	ที่ d_{Test} =10%				ที่ d_{Test} =30%				| L |
	$R(d_{Test})$	S_{All} %	S_{Succ}%	S_{Fail}%	$R(d_{Test})$	S_{All} %	S_{Succ}%	S_{Fail}%	
ก่อนปรับปรุง	65.19	72.23	83.17	52.61	42.90	55.35	64.19	48.71	24
กลุ่มที่ 1	65.11	74.77	87.42	52.99	42.15	58.57	69.09	50.88	26
กลุ่มที่ 2	74.41	82.06	90.77	59.00	49.45	67.75	78.16	57.76	36
กลุ่มที่ 3	80.17	88.86	93.64	71.26	60.25	80.09	86.29	70.8	38
กลุ่มที่ 4	82.84	89.89	93.71	72.35	65.85	81.22	85.44	74.21	50
กลุ่มที่ 5	89.24	95.37	97.09	82.18	75.86	90.86	93.72	82.17	63
กลุ่มที่ 6	92.52	97.51	98.20	89.59	80.95	94.27	95.85	87.77	96

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการวิเคราะห์ความทนทาน ในการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อมกลุ่มต่างๆ

จากตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความทนทานสามารถนำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 6.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานของคำตอบกับ S_{All} หรืออัตราส่วนการนำประสบการณ์ของคำตอบที่ได้เรียนรู้มาใช้ในสภาพแวดล้อมที่ใช้ทดสอบความทนทานที่ d_{Test} เป็น 10% และ 30% และกราฟรูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง S_{All} กับขนาดของประสบการณ์ที่คำตอบได้เรียนรู้มา $|L|$ ซึ่งกราฟทั้งสองนี้ได้ผ่านการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) เพื่อประมาณเส้นโค้งให้เหมาะสมกับชุดข้อมูลที่แสดงด้วยจุด



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



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

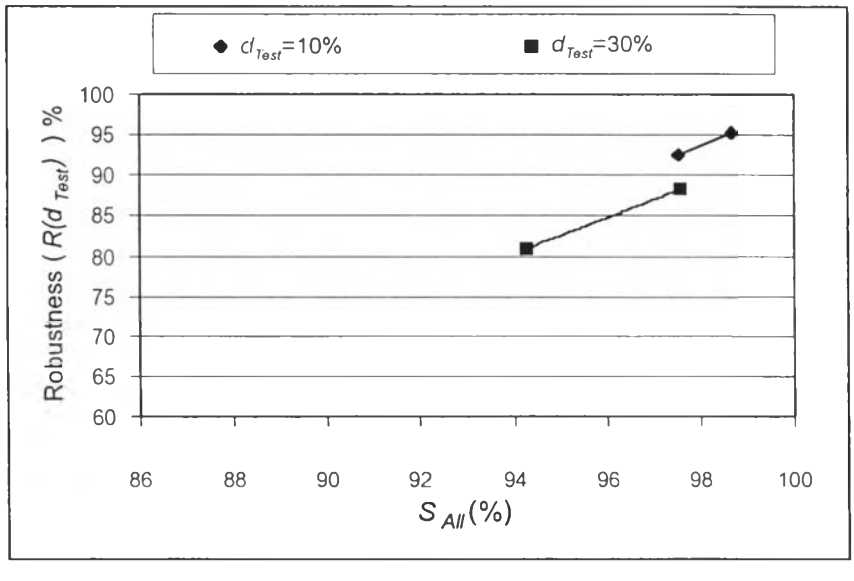
6.3.2 ผลการวิเคราะห์ความทนทานในการทดลองส่วนที่ 2

การทดลองในส่วนที่ 2 นี้ เป็นส่วนการทดลองที่เพิ่มความทนทานของคำตอบโดยการเพิ่มความแตกต่างของสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการเรียนรู้ (d_{Train}) เป็น 10% และ 50% โดยเรียนรู้จากสภาพแวดล้อมจำนวน 50 สภาพแวดล้อม ซึ่งได้ผลการทดสอบความทนทานดังรูปที่ 5.2

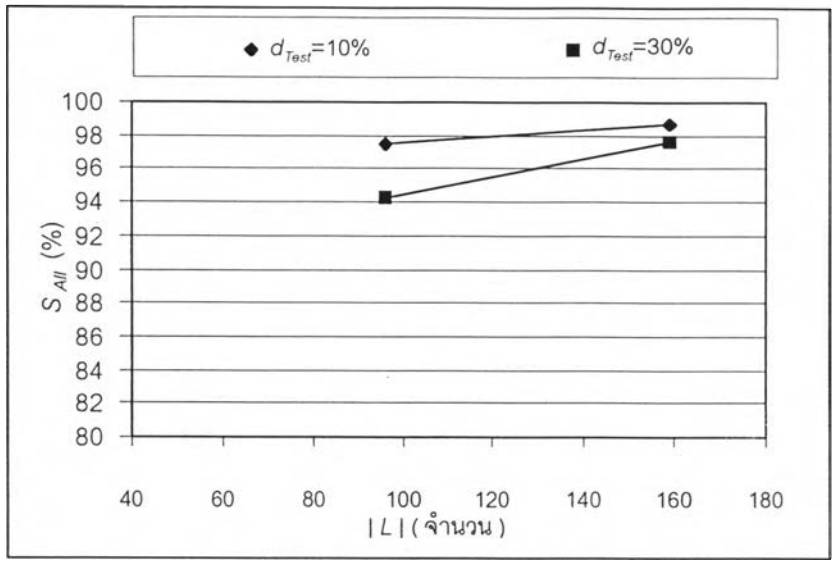
จากผลการวิเคราะห์ความทนทานซึ่งแยกตามค่า d_{Test} ที่ 10% และ 30% ของการทดลองในกลุ่มย่อยๆ ซึ่งอ้างอิงค่าความทนทานจากตารางที่ 5.2 ได้ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 6.2 ซึ่งนำแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 6.6 และ 6.7

ผล / d_{Train}	ที่ d_{Test} =10%				ที่ d_{Test} =30%				| L |
	$R(d_{Test})$	S_{All} %	S_{Succ}%	S_{Fail} %	$R(d_{Test})$	S_{All} %	S_{Succ}%	S_{Fail} %	
10%	92.52	97.51	98.20	89.59	80.95	94.27	95.85	87.77	96
50%	95.19	98.67	98.99	93.10	88.37	97.59	98.23	93.02	159

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความทนทาน ในการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อม 50 สภาพแวดล้อมที่มีค่าเปอร์เซนต์ของสิ่งกีดขวางที่ถูกขยับตำแหน่งไป (d_{Train}) เป็น 10% และ 50%



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



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

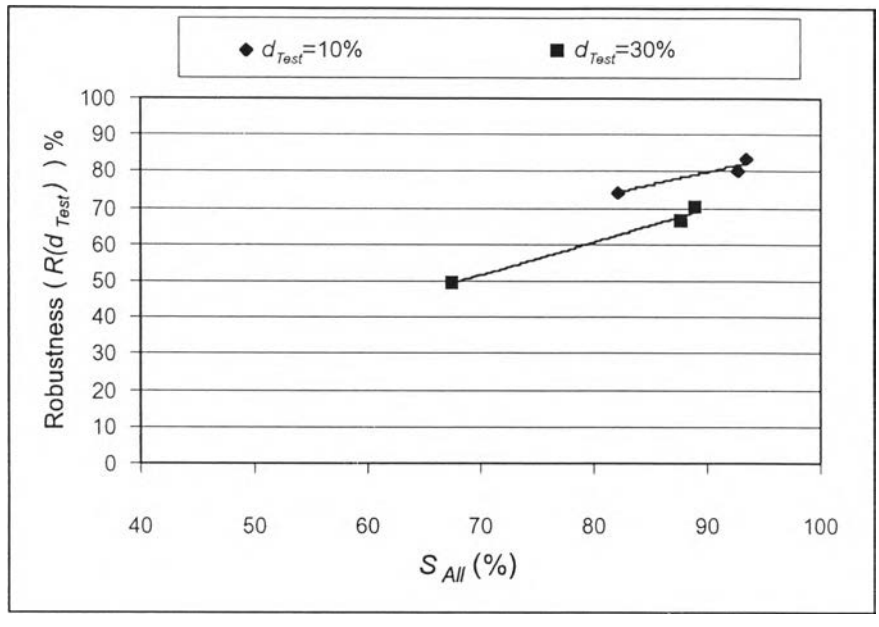
6.3.3 ผลการวิเคราะห์ความทนทานในการทดลองส่วนที่ 3

การทดลองในส่วนที่ 3 นี้ เป็นส่วนการทดลองที่เพิ่มความทนทานของคำตอบโดยการเพิ่มความแตกต่างของสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการเรียนรู้ (d_{Train}) เป็น 10% 30% และ 50% โดยเรียนรู้จากสภาพแวดล้อมจำนวน 10 สภาพแวดล้อม ซึ่งได้ผลการทดสอบความทนทานดังรูปที่ 5.3

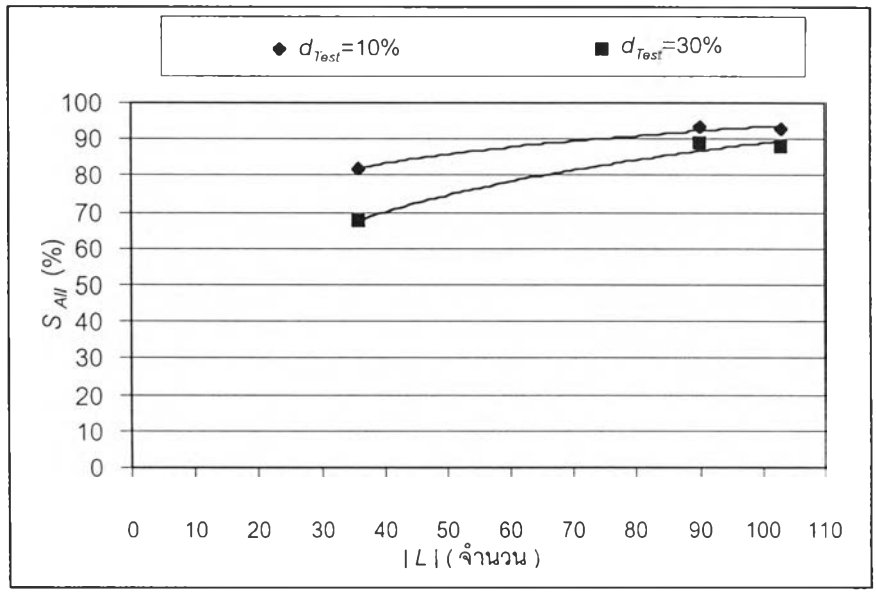
จากผลการวิเคราะห์ความทนทานซึ่งแยกตามค่า d_{Test} ที่ 10% และ 30% ของการทดลองในกลุ่มย่อยๆ ซึ่งอ้างอิงค่าความทนทานจากตารางที่ 5.3 ได้ค่าต่างๆ ดังตารางที่ 6.3 ซึ่งนำแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 6.8 และ 6.9

ผล / d_{Train}	ที่ d_{Test} =10%				ที่ d_{Test} =30%				| L |
	$R(d_{Test})$	S_{All} %	S_{Succ}%	S_{Fail} %	$R(d_{Test})$	S_{All} %	S_{Succ}%	S_{Fail} %	
10%	74.41	82.06	90.77	59.00	49.45	67.75	78.16	57.76	36
30%	80.37	92.63	94.98	83.81	66.31	87.70	90.33	82.55	103
50%	83.58	93.40	95.59	82.93	70.22	88.86	91.69	82.37	90

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการวิเคราะห์ความทนทาน ในการทดลองเรียนรู้ในสภาพแวดล้อม 10 สภาพแวดล้อมที่มีค่าเปอร์เซนต์ของสิ่งกีดขวางที่ถูกขยับตำแหน่งไป (d_{Train}) เป็น 10% 30% และ 50%



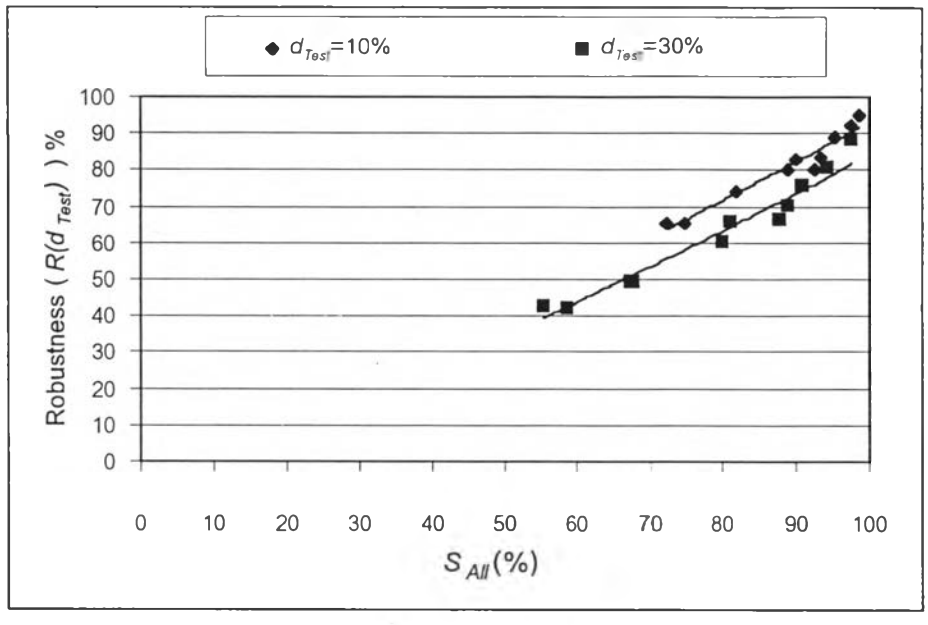
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความทนทานของคำตอบ กับ S_{All} ที่ค่า d_{Test} ต่างๆในการทดลองส่วนที่ 3



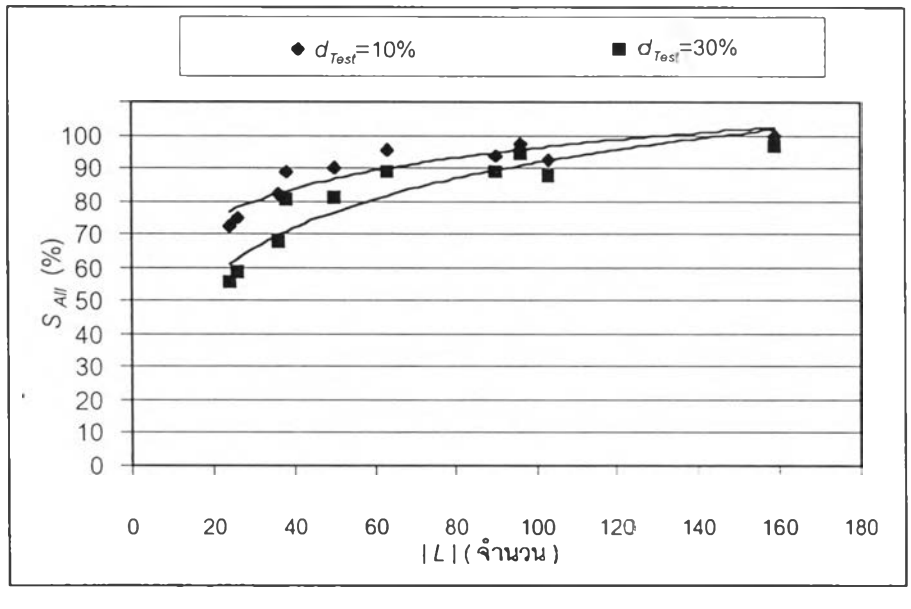
รูปที่ 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ S_{All} กับขนาดของประสบการณ์ | L | ที่ค่า d_{Test} ต่างๆในการทดลองส่วนที่ 3

6.3.4 ผลการวิเคราะห์ความทนทานในการทดลองทั้งหมด

ในส่วนนี้เป็นการรวมผลการวิเคราะห์ความทนทานในการทดลองทั้ง 3 ส่วนเข้าด้วยกัน เพื่อให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์ความทนทานโดยรวมที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังแสดงได้ดังรูปที่ 6.10 และ 6.11



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



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

6.4 สรุปผลการวิเคราะห์ความทนทาน

จากผลการวิเคราะห์ความทนทานของคำตอบในหัวข้อ 6.3 จะเห็นได้ว่า ความทนทานของคำตอบ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีส่วนสัมพันธ์กับอัตราส่วนการนำประสบการณ์ของคำตอบที่ได้เรียนรู้มาใช้ หรือ S_{All} ซึ่งหาค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์เชิงเส้น, r (linear correlation coefficient) ระหว่าง S_{All} กับความทนทานสำหรับการทดลองทั้งหมดที่ d_{Test} เป็น 10% และ 30% ได้ค่า r = 0.9719 และ 0.9721 ตามลำดับ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นเป็นอย่างดี ถ้า S_{All} มีค่าสูง ความทนทานของคำตอบก็จะสูงขึ้นตาม แสดงว่าสมมติฐานเป็นจริงตามที่ได้กล่าวไว้ ความสัมพันธ์ของความทนทาน และ S_{All} เป็นแบบแปรผันตรง ตามสมการ

$$\text{ความทนทาน} \propto S_{All} \qquad \ldots\ldots (4)$$

และยังสังเกตได้ว่า ในสภาพแวดล้อมที่คำตอบประสบความสำเร็จจะมีอัตราส่วนการนำประสบการณ์ที่ได้เรียนรู้มาใช้สูงกว่าในสภาพแวดล้อมที่ไม่ประสบความสำเร็จ (ค่า S_{Succ} มีค่ามากกว่าค่า S_{Fail} สำหรับทุกๆ การทดลอง)

จากผลการวิเคราะห์ยังพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราส่วนการนำประสบการณ์ของคำตอบมาใช้อย่างหนึ่งก็คือ ขนาดของประสบการณ์ที่คำตอบได้เรียนรู้มา | L | ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง | L | กับ S_{All} มีแนวโน้มว่า ค่า | L | ที่สูงขึ้นทำให้ค่า S_{All} สูงขึ้นด้วย ซึ่งหาค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์เชิงเส้น, r ระหว่าง | L | กับ S_{All} สำหรับการทดลองทั้งหมดที่ d_{Test} เป็น 10% และ 30% ได้ค่า r = 0.7962 และ 0.8255 ตามลำดับ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นดีพอสมควร

สรุปผลการวิเคราะห์ทั้งหมดได้ว่า ในการทดลองเพื่อเพิ่มความทนทานของคำตอบในวิธีกำหนดการเรียนพันธุกรรมดังงานวิจัยนี้ โดยการเพิ่มจำนวนสภาพแวดล้อมในการเรียนรู้ และเพิ่มความแตกต่างของสภาพแวดล้อมในการเรียนรู้เหล่านั้นให้มีความแตกต่างกันมากขึ้นมีผลทำให้ความทนทานของคำตอบ หรือโอกาสที่คำตอบนั้นจะประสบความสำเร็จในสภาพแวดล้อมที่ไม่ได้เรียนรู้มามีค่าสูง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากวิธีดังกล่าวเป็นการเพิ่มขนาดของประสบการณ์ที่คำตอบนั้นได้เรียนรู้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มีการนำประสบการณ์ที่ได้เรียนรู้ไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่ใช้ทดสอบในอัตราส่วนที่สูง ซึ่งมีผลให้โอกาสที่คำตอบนั้นจะประสบความสำเร็จในสภาพแวดล้อมทดสอบมีมากขึ้น