



บทที่ 8

ผลการทดลอง

ในบทนี้แสดงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยแบ่งการแสดงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็นกลุ่ม 4 กลุ่มตามสภาพของสภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์ ดังต่อไปนี้คือ 1) กลุ่มของสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง 2) กลุ่มของสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางที่กำหนดให้มีเพียง 1 สิ่งกีดขวางเท่านั้น 3) กลุ่มของสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางที่กำหนดให้มีมากกว่า 1 สิ่งกีดขวาง และ 4) กลุ่มของสภาพแวดล้อมที่มีลักษณะของปัญหาจุดต่ำสุดเสมือน

ในแต่ละการทดลองจะแสดงผลการทดลองในรูปแบบของเส้นโค้งสมรรถภาพ (Performance Curves) ซึ่งเป็นลักษณะที่ใช้ช่วยในการแสดงถึงประสิทธิภาพในการทำงานของการโปรแกรมพันธุกรรมที่มีต่อปัญหานั้นๆเมื่อเปรียบเทียบกับกรทดลองอื่นๆ มีการแสดงรูปจำลองของการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ที่ถูกควบคุมการเคลื่อนที่โดยโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ได้สังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรม มีการแสดงรูป(ที่บันทึกมาจากกล้องวิดีโอที่ใช้ในการทดลอง)การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ที่ได้ทำการทดลองในโลกจริง และแสดงข้อมูลเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งจะถูกแสดงในรูปแบบของตารางข้อมูล ซึ่งข้อมูลที่ถูกแสดงประกอบด้วย เวลาที่ใช้ในกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรม(มีหน่วยเป็นวินาที)สำหรับการค้นพบโปรแกรมหุ่นยนต์แรกที่ประสบความสำเร็จ, จำนวนรุ่นที่ใช้ในการวิวัฒนาการ, จำนวนครั้งของการล้างพันธุ์, ขนาดของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้, ร้อยละของความสำเร็จในการทดลองในโลกจริง, และอธิบายลักษณะของการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ ตลอดจนปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทดลองในโลกจริง ผลการทดลองจะถูกแสดงแยกตามแต่ละการทดลอง และมีข้อสรุปของผลการทดลองของข้อมูลที่ได้ในแต่ละการทดลอง แต่ละกลุ่ม และการทดลองทั้งหมด

การทดลองทั้งหมดทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ intel 486DX2 - 66 MHz ที่มีหน่วยความจำหลักขนาด 8 เมกกะไบต์

8.1 ลักษณะของเส้นโค้งสมรรถภาพ

เนื่องจากในบทนี้มีการนำเสนอเส้นโค้งสมรรถภาพในแต่ละการทดลองซึ่งมีถึง 16 การทดลอง เพื่อความเข้าใจ ที่มา การตีความหมาย และสัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองนี้ จึงต้องทำการอธิบายถึงลักษณะของเส้นโค้งสมรรถภาพในหัวข้อนี้ก่อน

ตามหนังสือ Genetic Programming II ของ Koza (1994) ได้มีการอธิบายถึงลักษณะและการสร้างเส้นโค้งสมรรถภาพ เพื่อใช้ช่วยในการแสดงถึงประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาของการโปรแกรมพันธุกรรมที่มีต่อปัญหานั้นๆเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองอื่นๆ ดังต่อไปนี้

วิธีการนี้นำมาเพื่อใช้ในการวัดค่าความพยายามในการคำนวณ (Computational Effort, E) ที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้ได้วิธีการหรือผลลัพธ์ที่พอใจต่อการแก้ปัญหาด้วยความเป็นไปได้ที่สูงเพียงพอ การคำนวณค่า E จะได้จากข้อมูลของชุดของการดำเนินการทดลอง ในแต่ละการทดลองที่มีขนาดของประชากร M คงที่ และมีจำนวนรุ่นมากที่สุดที่จะทำการทดลอง G คงที่ด้วย แต่เนื่องจากในการดำเนินการทดลองแต่ละครั้งความสำเร็จในการที่จะสามารถหาวิธีการหรือผลลัพธ์จนเป็นที่พอใจต่อการแก้ปัญหานั้นเกิดขึ้นได้ในรุ่นที่แตกต่างกัน ซึ่งทั้งหมดไม่ได้เกิดขึ้นภายในจำนวนรุ่นมากที่สุดที่กำหนดไว้ในแต่ละการทดลอง แต่แน่ใจได้ว่าจะต้องเกิดขึ้นในรุ่นใดรุ่นหนึ่ง ซึ่งไม่สามารถพยากรณ์ได้ว่าจะจะเป็นรุ่นใดได้อย่างแน่นอน ฉะนั้นในการแสดงผลการทดลองจึงไม่สามารถทำได้ด้วยการคำนวณแบบธรรมดา จึงต้องอาศัยการคำนวณทางสถิติเพื่อแสดงถึงความเป็นของจำนวนรุ่นที่ใช้ในการประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละโปรแกรมเพื่อจะให้ได้วิธีการหรือผลลัพธ์ที่พอใจต่อการแก้ปัญหา

ในแต่ละการทดลองจะสามารถวัดความน่าจะเป็นของความสำเร็จ $Y(M,i)$ (the instantaneous probability of success) ได้จากการนับจำนวนครั้งของการดำเนินการทดลองซึ่งพบว่าเป็นครั้งแรกที่มีอย่างน้อย 1 โปรแกรมในประชากร M ที่ประสบความสำเร็จเป็นที่น่าพอใจในการแก้ปัญหาของรุ่นที่ i และสามารถคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นสะสมของความสำเร็จ $P(M,i)$ (the cumulative probability of success) ในแต่ละการดำเนินการทดลองในประชากร M ที่ประสบความสำเร็จเป็นที่น่าพอใจในการแก้ปัญหาจนถึงรุ่นที่ i หากด้วยจำนวนครั้งของการทดลองทั้งหมด (N) ซึ่งค่า $P(M,i)$ จะเป็นฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามจำนวนของรุ่นที่เพิ่มขึ้น ถ้าทุกๆการทดลองสามารถประสบความสำเร็จหมดภายในรุ่น G ค่า $P(M,i)$ จะมีค่าเท่ากับ 1.0 โดยความเป็นจริงแล้ว

ค่า $P(M,i)$ จะมีค่าน้อยกว่า 1.0 ทั้งนี้เพราะมีบางโปรแกรมไม่สามารถประสบความสำเร็จได้ภายในรุ่น G

สำหรับการที่จะคำนวณหาค่า E จากค่า P ได้นั้นจะต้องอาศัยค่า R ซึ่งหมายถึงจำนวนการดำเนินการทดลองที่ต้องการเพื่อให้ได้ความสำเร็จที่พอใจ P ภายในรุ่นที่ i ที่มีความมั่นใจ (z) สูง โดยที่ $z = 1 - [1 - P(M,i)]^R$ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้กำหนดให้ $z = 99\%$ และในการหาค่า R สามารถหาได้จากสมการ

$$R = R(M,i,z) = \text{ceiling}\left[\frac{\log(1-z)}{\log(1-P(M,i))}\right]$$

เมื่อฟังก์ชันซีลิ่ง (the ceiling function) เป็นการพิเศษให้เป็นเลขจำนวนเต็มตัวที่สูงกว่าตัวถัดไป

การหาค่า E จะพิจารณาจากค่าต่ำสุดของค่า $I(M,i,z)$ ซึ่งแสดงจำนวนครั้งของการประมวลผลที่จะต้องดำเนินการในประชากร M เพื่อที่จะประสบความสำเร็จเป็นที่น่าพอใจในการแก้ปัญหาจนถึงรุ่นที่ i ด้วยความมั่นใจ $z=99\%$ ซึ่งคำนวณได้จาก $I(M,i,z) = M(i+1)R(z)$ เพราะฉะนั้นค่าความพยายามในการคำนวณสามารถหาได้จากสมการ $E = I(M,i^*,z) = M(i^*+1)R(z)$ โดยที่ i^* แทนรุ่นที่ดีที่สุดที่ค่า $I(M,i,z)$ มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งค่า E ที่ได้ไม่จำเป็นที่จะเป็นค่าความพยายามในการคำนวณที่น้อยที่สุดจริงๆของปัญหานั้น และสามารถหาค่า $R(z)$ ซึ่งหมายถึงจำนวนการดำเนินการทดลองที่ต้องการเพื่อให้ได้ความสำเร็จที่พอใจด้วยความมั่นใจ z (ในการทดลองนี้คือ 99%) ได้จาก $R(z) = R(M,i^*,z)$ โดยที่ i^* แทนรุ่นที่ดีที่สุดที่ค่า $I(M,i,z)$ มีค่าต่ำที่สุด

8.2 ผลการทดลองของกลุ่มที่ 1 ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง

การทดลองในกลุ่มนี้เป็นการทดลองเพื่อค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เพื่อนำปลายแขนไปยังเป้าหมายที่กำหนดไว้ในตำแหน่งต่างๆกันในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง การทดลองกลุ่มนี้ประกอบด้วยการทดลองที่ 1-4

การทดลองที่ 1 ตำแหน่งเป้าหมายถูกกำหนดไว้ด้านบนของพื้นที่การมองเห็นของกล้องวิดีโอ โดยอยู่ในแนวของข้อต่อหัวไหล่ของแขนหุ่นยนต์

การทดลองที่ 2 ตำแหน่งเป้าหมายถูกกำหนดไว้ด้านล่างของพื้นที่การมองเห็นของกล้องวิดีโอ บริเวณใกล้แขนหุ่นยนต์ โดยอยู่ในแนวระหว่างข้อต่อข้อศอกและข้อต่อข้อมือของแขนหุ่นยนต์

การทดลองที่ 3 ตำแหน่งเป้าหมายถูกกำหนดไว้ด้านล่างของพื้นที่การมองเห็นของกล้องวิดีโอ บริเวณใกล้แขนหุ่นยนต์ โดยอยู่ในแนวของข้อต่อหัวไหล่ของแขนหุ่นยนต์

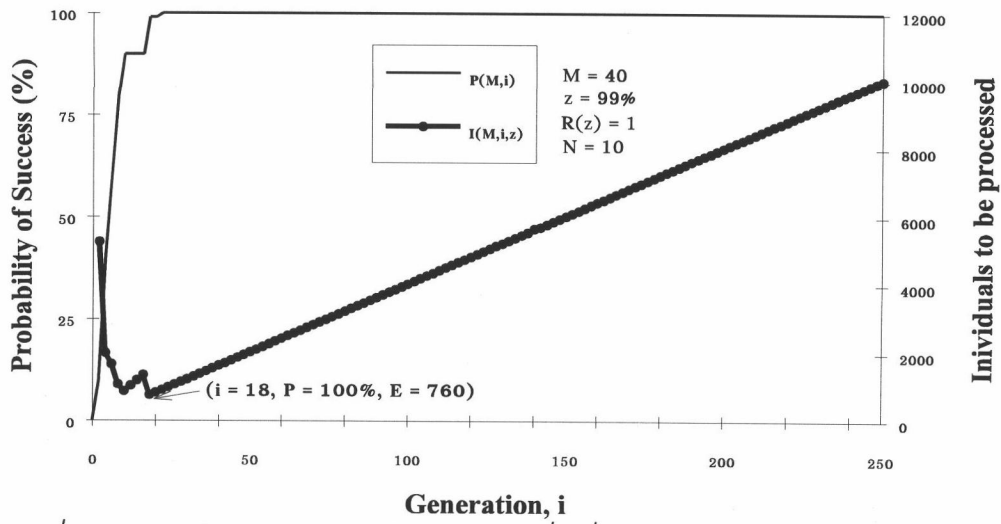
การทดลองที่ 4 ตำแหน่งเป้าหมายถูกกำหนดไว้ด้านล่างของพื้นที่การมองเห็นของกล้องวิดีโอ บริเวณใกล้แขนหุ่นยนต์ โดยอยู่ในแนวของข้อต่อข้อศอกของแขนหุ่นยนต์

8.2.1 การทดลองที่ 1 รูปที่ 8.1 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 1 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายได้ค่าความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้เวลาประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์เพียง 760 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 18 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จถึง 100 %

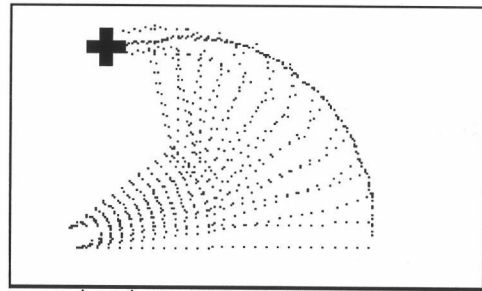
รูปที่ 8.2 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 1 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ มีการหมุนทั้งข้อต่อหัวไหล่ ข้อต่อข้อศอกและข้อต่อข้อมือ ซึ่งจำนวนครั้งของการหมุนขึ้นของข้อต่อข้อศอกจะต้องมีมากกว่าข้อต่อที่เหลือ โดยที่ข้อต่อหัวไหล่ต้องมีการหมุนขึ้นบ้างจึงจะสามารถเคลื่อนปลายแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมายได้ และในบางโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้จะอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนออกนอกขอบเขตจำกัดด้านบนเพื่อบังคับให้ปลายแขนหุ่นยนต์ให้เข้าสู่เป้าหมาย ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ใช้บังคับแขนหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ภายใต้พื้นที่ของการมองเห็นนั่นเอง

รูปที่ 8.3 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถบบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และจากการทดลองพบว่าโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริงได้ถึง 100 %

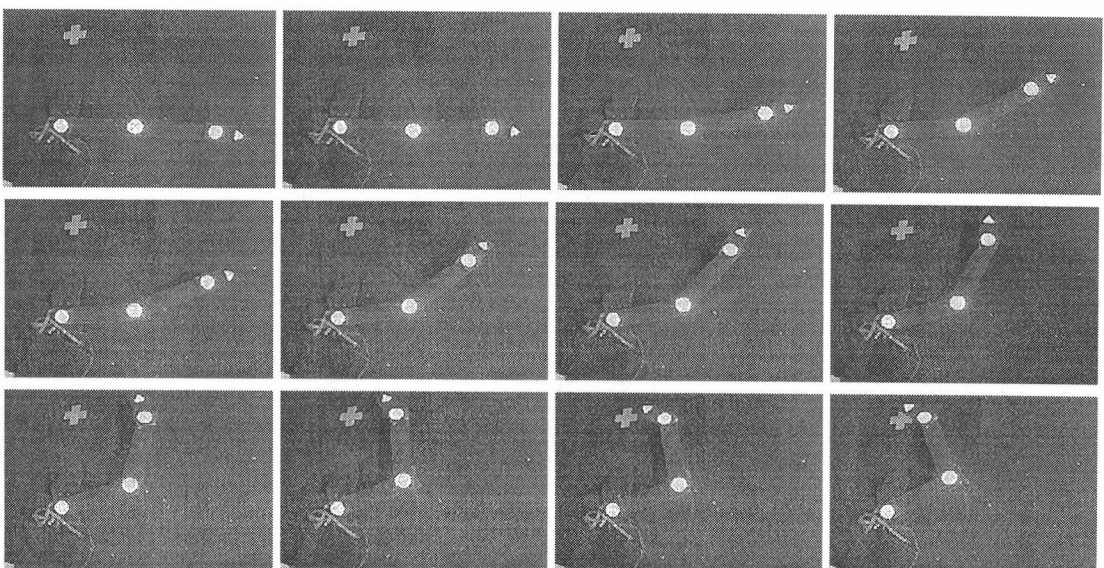
8.2.2 การทดลองที่ 2 รูปที่ 8.4 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 2 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายได้ค่าความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้เวลาประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์เพียง 440 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 10 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จถึง 100 %



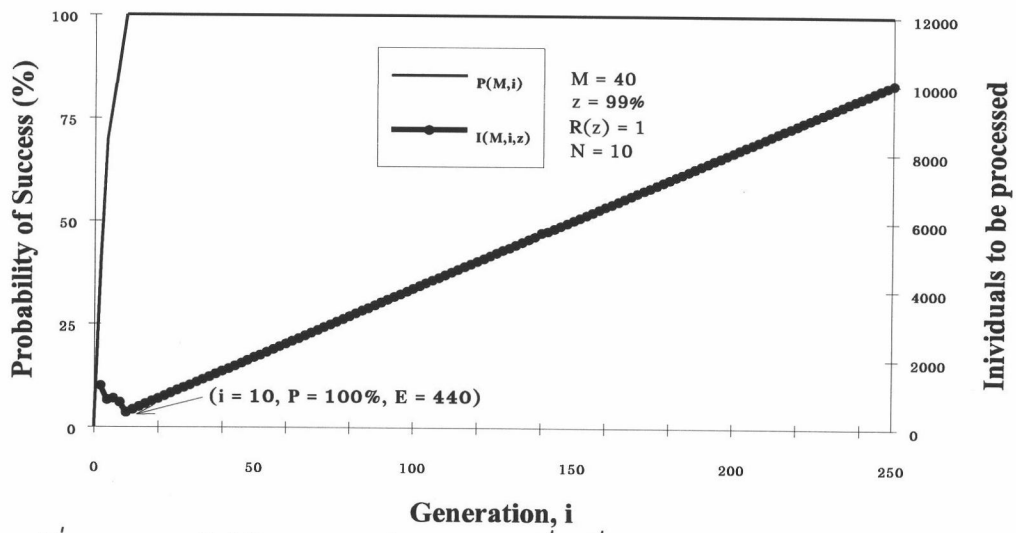
รูปที่ 8.1 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 1 ซึ่งต้องการประมวลผล 760 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหา ในรุ่นที่ 18 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100%, $G = 250, P_i = 100\%, E_i = 760$



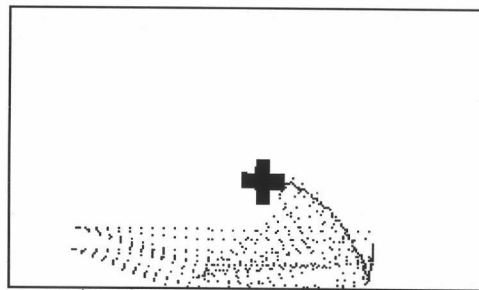
รูปที่ 8.2 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 1



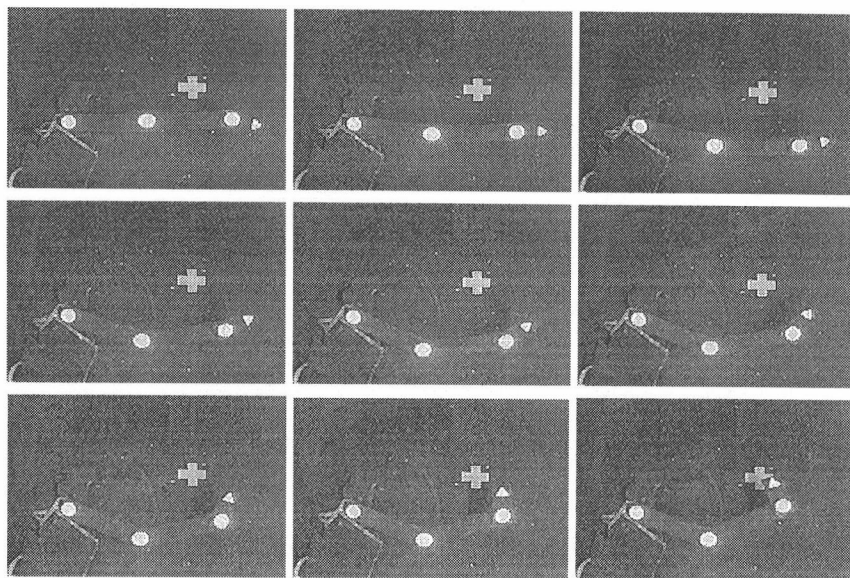
รูปที่ 8.3 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 1



รูปที่ 8.4 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 2 ซึ่งต้องการประมวลผล 440 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหา ในรุ่นที่ 10 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100% , $G = 250, P_2 = 100\%, E_2 = 440$



รูปที่ 8.5 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 2



รูปที่ 8.6 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในโลกจริงของการทดลองที่ 2

รูปที่ 8.5 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุการในการทดลองที่ 2 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ ข้อต่อหัวไหล่จะหมุนลง ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้น และข้อต่อข้อมือจะหมุนขึ้น โดยที่ข้อต่อหัวไหล่จะใช้ข้อจำกัดของการเคลื่อนที่นอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นที่บังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมที่เรียกว่า การพับแขน ซึ่งทำให้สามารถบังคับปลายแขนให้เข้าสู่เป้าหมายได้

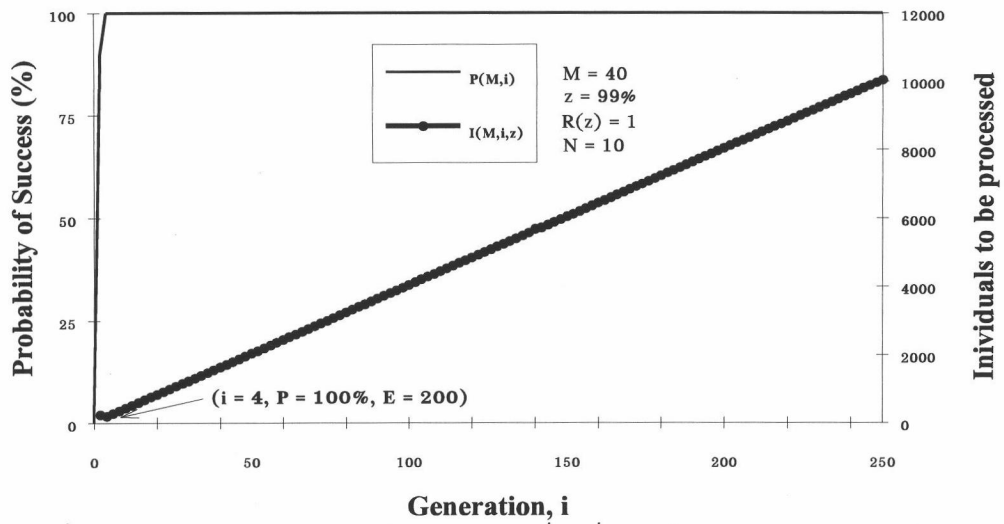
รูปที่ 8.6 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถบบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริงได้ถึง 100 %

8.2.3 การทดลองที่ 3 รูปที่ 8.7 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 3 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้อาความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้การประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์เพียง 440 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 10 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จถึง 100 %

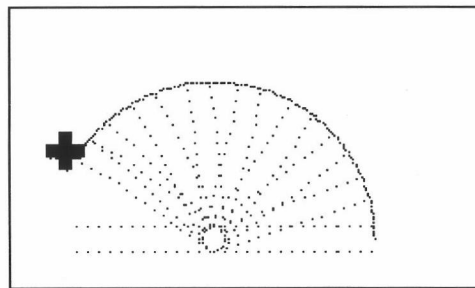
รูปที่ 8.5 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุการในการทดลองที่ 3 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ ส่วนมากจะมีเพียงการหมุนของข้อต่อข้อศอกขึ้นเท่านั้น ไม่มีการหมุนข้อต่อหัวไหล่ มีบางโปรแกรมเท่านั้นที่มีการหมุนข้อต่อข้อมือขึ้นเล็กน้อย ซึ่งทำให้สามารถเคลื่อนปลายแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมายได้

รูปที่ 8.6 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถบบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริงได้ถึง 100 %

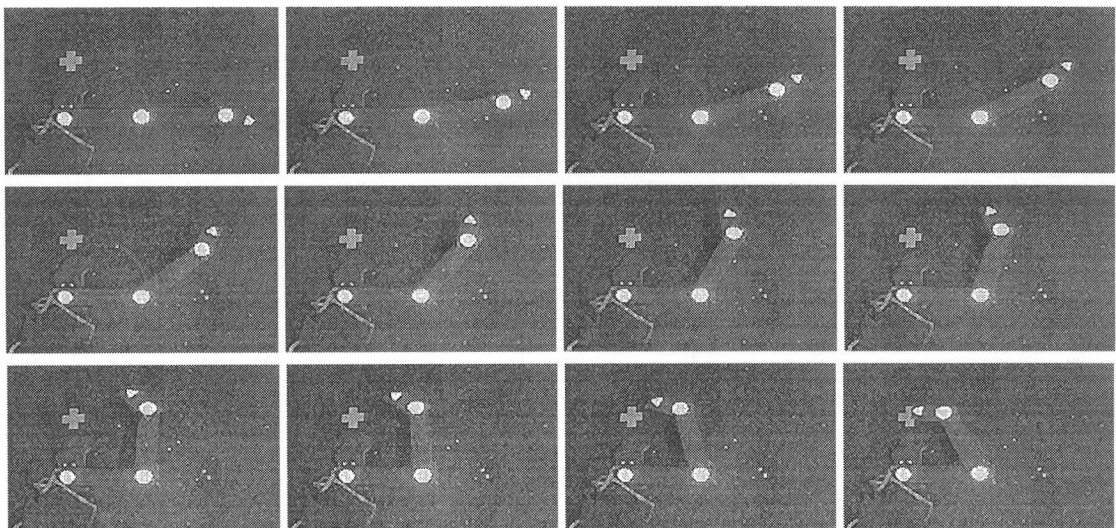
8.2.4 การทดลองที่ 4 รูปที่ 8.10 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 4 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้อาความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้การประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์เพียง



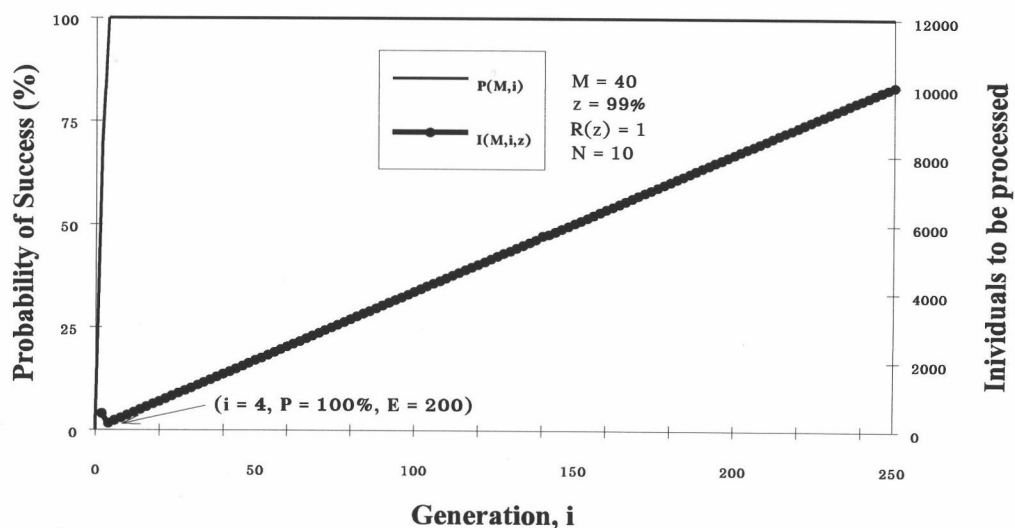
รูปที่ 8.7 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 3 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 200 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหา ในรุ่นที่ 4 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100% , $G = 250$, $P_3 = 100\%$, $E_3 = 200$



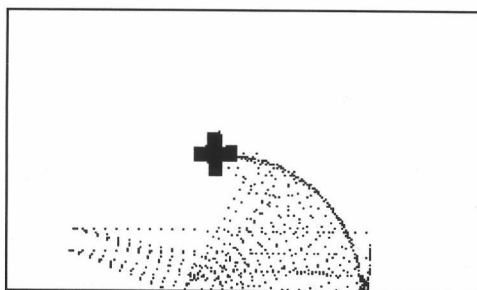
รูปที่ 8.8 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 3



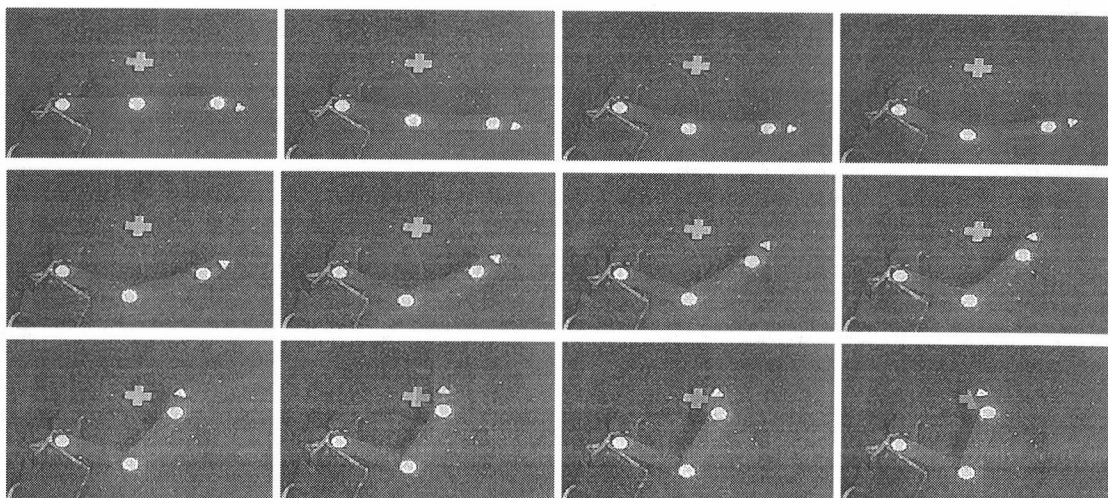
รูปที่ 8.9 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 3



รูปที่ 8.10 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 4 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 200 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหา ในรุ่นที่ 4 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100% , $G = 250$, $P_4 = 100\%$, $E_4 = 200$



รูปที่ 8.11 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 4



รูปที่ 8.12 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 4



การทดลองที่	เวลา (วินาที)	จำนวนรุ่นที่ใช้ใน การวิวัฒนาการ	จำนวนครั้งของ การ ล้างพันธุ์	ขนาดของ โปรแกรม (ไบต์)	% ของความสำเร็จ การทดลองในโลก จริง
1	353.5	6.5	0.0	198.9	100.0
2	60.3	3.6	0.0	572.5	100.0
3	21.0	1.2	0.0	87.0	100.0
4	26.5	1.8	0.0	428.8	100.0
เฉลี่ยทั้งหมด	115.3	3.3	0.0	321.8	100.0

ตารางที่ 8.1 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองของกลุ่มการทดลองที่ 1

200 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 4 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จถึง 100 %

รูปที่ 8.11 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุการในการทดลองที่ 4 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ เริ่มต้นด้วยการหมุนข้อต่อหัวไหล่ลง ข้อต่อข้อศอกและข้อต่อข้อมือจะหมุนขึ้นเล็กน้อย โดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่นอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นจะบังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมพับแขน ซึ่งทำให้สามารถบังคับปลายแขนให้เข้าสู่เป้าหมายได้

รูปที่ 8.12 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถบบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริงได้ถึง 100 %

8.2.5 ผลการทดลองของกลุ่มที่ 1 ตารางที่ 8.1 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองในแต่ละการทดลองที่ในกลุ่มที่ 1 ซึ่งจากการทดลองทั้ง 4 การทดลองพบว่า เวลาที่ใช้เฉลี่ยคือ 115.3 วินาที จำนวนรุ่นที่ใช้เฉลี่ยแล้วจะใช้ 3.3 รุ่นของการวิวัฒนาการ ไม่มีการใช้การล้างพันธุ์เลย ขนาดของโปรแกรมเฉลี่ย 322 ไบต์ และโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ได้ทั้งหมดสามารถทำงานในการทดลองในโลกจริงได้ทั้งหมด

จากผลการทดลองทั้งหมดของกลุ่มที่ 1 ซึ่งเป็นกลุ่มที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง พบว่า -จากข้อมูลเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 1-4 แสดงให้เห็นว่าในการทดลองที่ 1 เป็นปัญหาที่ยากที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะว่าตำแหน่งของเป้าหมายอยู่ไกลทำแขนหุ่นยนต์มีพื้นที่ในการค้นหามากกว่า ส่วนการทดลองที่ 3 และ 4 เป็นปัญหาง่ายที่สุดเพราะว่า

ตำแหน่งเป้าหมายอยู่ในตำแหน่งที่แขนหุ่นยนต์สามารถใช้การเคลื่อนที่ซึ่งไม่สลับซับซ้อนนักแก้ปัญหาได้ ส่วนการทดลองที่ 2 ซึ่งมีลักษณะของปัญหาที่คล้ายคลึงกันกับการทดลองที่ 4 แต่การทดลองที่ 2 จะมีจำนวนโปรแกรมที่ถูกประมวลผลมากกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะว่าตำแหน่งเป้าหมายอยู่ใกล้กับแขนหุ่นยนต์มาก ถ้าข้อต่อข้อมือหมุนน้อยไปหรือมากไปจะไม่สามารถเข้าหาเป้าหมายได้

-ขนาดของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเฉลี่ยในแต่ละการทดลองที่ไม่แน่นอน ไม่ได้แสดงถึงความยากง่ายของปัญหาที่แน่ชัด แต่พบว่าในปัญหาที่ง่ายขนาดของโปรแกรมจะมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก

-การทดลองทั้งหมดในกลุ่มนี้ไม่พบว่ามีการใช้การล้างพันธุ์ในกระบวนการโปรแกรมพันธุการเลย แสดงให้เห็นว่าการแก้ปัญหาในการทดลองกลุ่มที่ 1 สามารถทำได้ง่าย

-โปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ขึ้นได้ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริง

-มีโปรแกรมหุ่นยนต์บางตัวมีการใช้ข้อจำกัดของการเคลื่อนออกนอกขอบเขตของการมองเห็นทั้งด้านล่างและด้านบน ทำให้เกิดพฤติกรรมพับแขนและกางแขนของแขนหุ่นยนต์

-จากการเก็บข้อมูลในแต่ละการทดลองเพื่อหาว่า ตัวดำเนินการใดบ้างของการโปรแกรมพันธุการใช้ในการสังเคราะห์โปรแกรมหุ่นยนต์ ที่มีผลต่อการค้นหาโปรแกรมตัวแรกที่ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหาได้ในแต่ละครั้งของการทดลอง ในการทดลองกลุ่มนี้จากการทดลองทั้งหมด 40 การทดลอง พบว่า 62.5 % ของโปรแกรมตัวแรกที่ประสบความสำเร็จทั้งหมด เกิดจากการสุ่มสร้างในครั้งแรก 20 % เกิดจากตัวดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อยอด 10 % เกิดจากตัวดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อปลาย และ 7.5 % เกิดจากตัวดำเนินการผสมพันธุ์

8.3 ผลการทดลองของกลุ่มที่ 2 ในสภาพแวดล้อมที่มี 1 สิ่งกีดขวาง

การทดลองในกลุ่มนี้เป็นการทดลองเพื่อค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เพื่อนำปลายแขนไปยังเป้าหมายที่กำหนดไว้ในตำแหน่งต่างๆกัน ในสภาพแวดล้อมที่ต่างๆกัน ซึ่งกำหนดให้มีสิ่งกีดขวางเพียง 1 สิ่งกีดขวางเท่านั้น การทดลองกลุ่มนี้ประกอบด้วยการทดลองที่ 5-8

การทดลองที่ 5 สภาพแวดล้อมมีสิ่งกีดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตามแนวนอนซึ่งขนานกับแนวแขนหุ่นยนต์ โดยวางตัวอยู่ในแนวเริ่มจากระหว่างข้อต่อข้อศอกและข้อต่อ

ข้อมือของแขนหุ่นยนต์จนถึงแนวปลายแขนหุ่นยนต์ โดยวางตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านหลังสิ่งกีดขวาง

การทดลองที่ 6 สภาพแวดล้อมมีสิ่งกีดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้าที่วางตามแนวตั้งฉากกับแนวแขนหุ่นยนต์ โดยวางตัวอยู่ในแนวข้อต่อข้อศอกของแขนหุ่นยนต์ โดยวางตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านข้างด้านซ้ายสิ่งกีดขวาง

การทดลองที่ 7 สภาพแวดล้อมมีสิ่งกีดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้าที่วางตามแนวเฉียงกับแนวแขนหุ่นยนต์ โดยวางตัวอยู่ในแนวเริ่มจากข้อต่อข้อศอกของแขนหุ่นยนต์จนถึงแนวบริเวณระหว่างข้อต่อข้อศอกและข้อต่อข้อมือของแขนหุ่นยนต์ โดยวางตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านบนซึ่งอยู่หลังสิ่งกีดขวาง

การทดลองที่ 8 สภาพแวดล้อมมีสิ่งกีดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้าที่วางตามแนวนอนซึ่งขนานกับแนวแขนหุ่นยนต์ โดยวางตัวอยู่ในแนวเริ่มจากระหว่างข้อต่อหัวไหล่และข้อต่อข้อศอกของแขนหุ่นยนต์จนถึงแนวระหว่างข้อต่อข้อศอกและข้อต่อข้อมือของแขนหุ่นยนต์ โดยวางตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านหลังสิ่งกีดขวาง

8.3.1 การทดลองที่ 5 รูปที่ 8.13 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 5 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้อัตราความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้เวลาประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์ 14760 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 122 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จ 80 %

รูปที่ 8.14 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 5 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ ข้อต่อหัวไหล่จะหมุนลง ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้น และข้อต่อข้อมือจะหมุนลงเล็กน้อย โดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นจะบังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมพับแขน จนกระทั่งปลายแขนหุ่นยนต์สามารถมองเห็นเป้าหมาย ข้อต่อหัวไหล่จะถูกหมุนขึ้นในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนลง เพื่อกางแขนหุ่นยนต์ออก ซึ่งจะช่วยให้ปลายแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมายได้ ในโปรแกรมหุ่นยนต์บางตัวที่มีการหมุนของข้อต่อหัวไหล่มากจนทำให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เลยเป้าหมายไป ซึ่งโปรแกรมจะใช้ข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตด้านบนของการมองเห็นที่บังคับให้ปลายแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมายได้

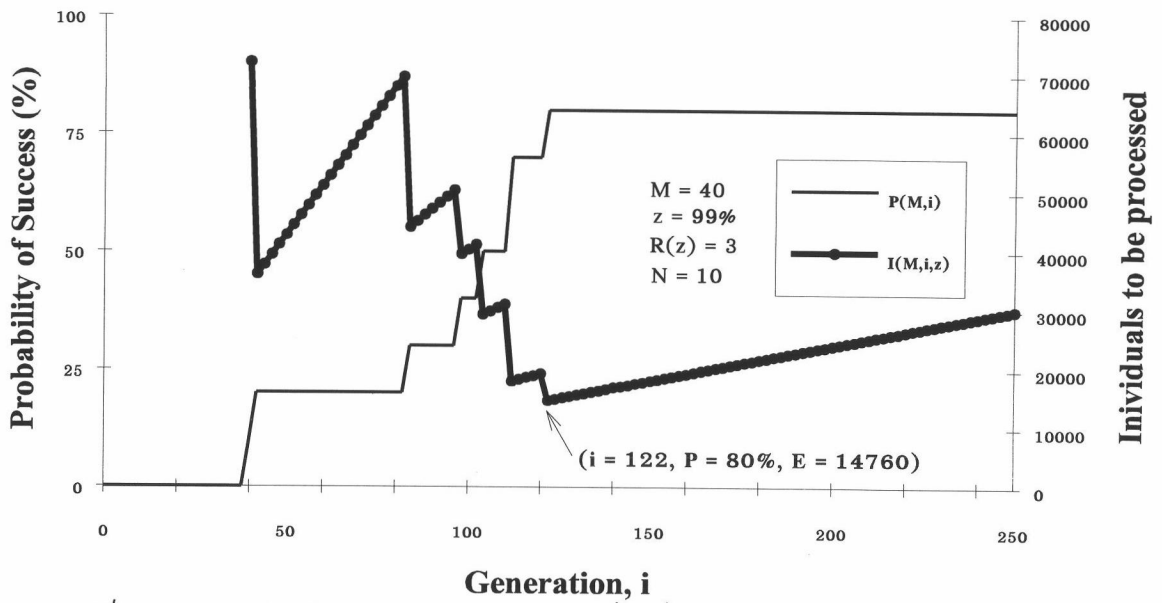
รูปที่ 8.15 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถวบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเฉลี่ยแล้ว 80 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริง

ส่วนโปรแกรมที่ไม่ประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงเป็นเพราะว่ามีปัญหาในการขยับไปมาของปลายแขนหุ่นยนต์ที่ไม่ถูกต้องทำให้การตรวจสอบค่าจากฟังก์ชัน INC? และ DEC? ซึ่งจะให้ค่าที่ไม่ถูกต้องตามไปด้วย ซึ่งจะทำให้โปรแกรมหุ่นยนต์ที่ใช้ฟังก์ชันดังกล่าวในการแก้ปัญหาไม่สามารถแก้ปัญหาได้เหมือนที่ได้จำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์

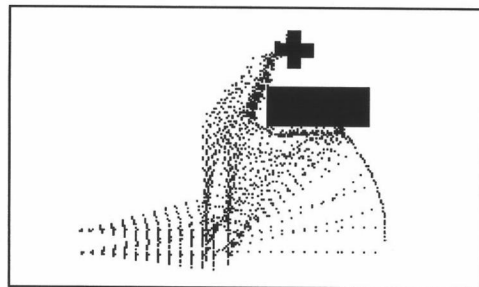
8.3.2 การทดลองที่ 6 รูปที่ 8.16 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 5 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้อัตราความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้การประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์ 3800 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 94 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จถึง 100 %

รูปที่ 8.17 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 6 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ เริ่มต้นด้วยการหมุนลงของข้อต่อหัวไหล่ ในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้นและข้อต่อข้อมือจะหมุนลงเล็กน้อย โดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นบังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมพับแขน เพื่อเคลื่อนที่หลบสิ่งกีดขวาง จนกระทั่งปลายแขนหุ่นยนต์สามารถมองเห็นเป้าหมาย ข้อต่อหัวไหล่จะหมุนขึ้นในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนลงเล็กน้อยเพื่อรักษาแนวของแขนหุ่นยนต์ที่จะทำให้ปลายแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมายได้ในโปรแกรมหุ่นยนต์บางตัวที่มีการหมุนของข้อต่อหัวไหล่มากจนทำให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปชนกับสิ่งกีดขวาง ซึ่งบางทีโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ไม่มีส่วนของการแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดการชนสิ่งกีดขวางก็จะทำให้แขนหุ่นยนต์ไม่สามารถเข้าถึงเป้าหมายได้

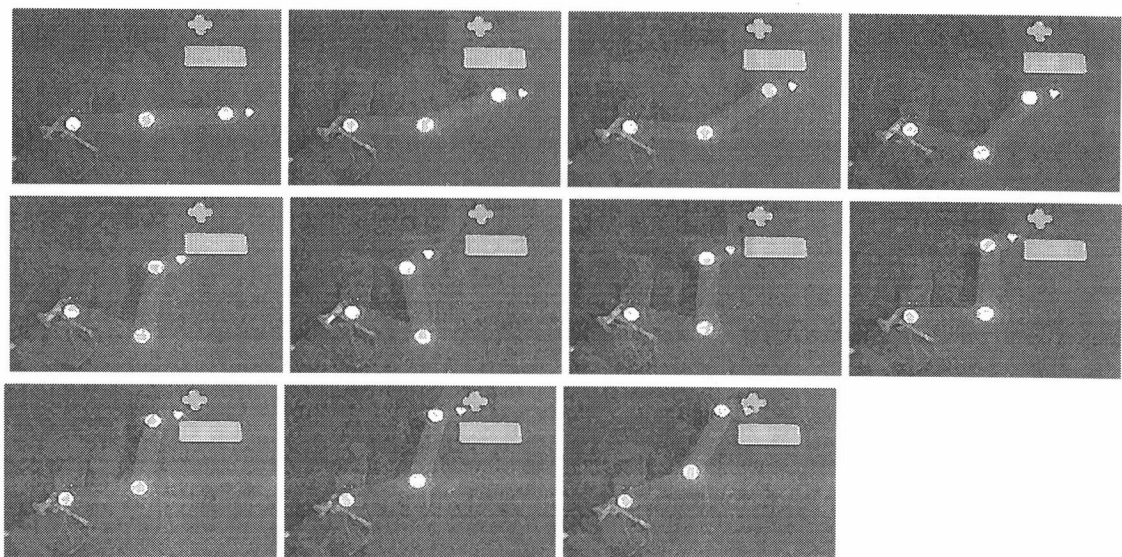
รูปที่ 8.18 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถวบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเฉลี่ยแล้ว 80 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริง



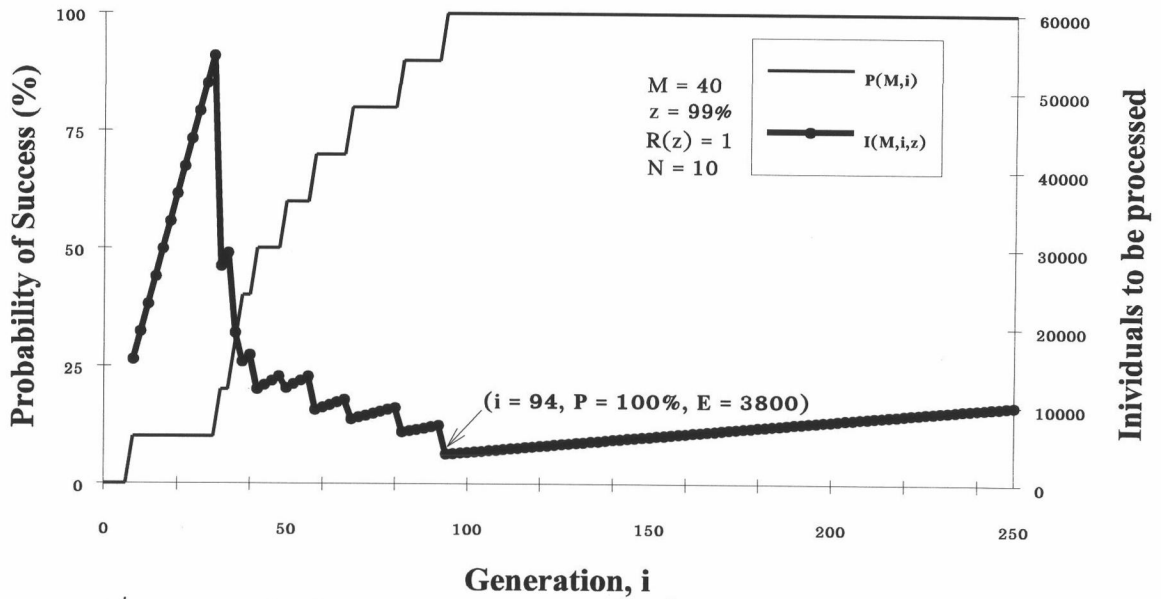
รูปที่ 8.13 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 5 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 14760 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 122 ที่มีโอกาสสำเร็จ 80%, $G = 250, P_5 = 80\%, E_5 = 14760$



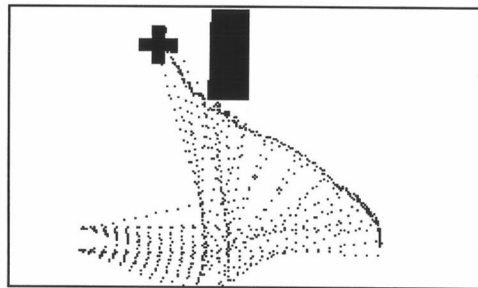
รูปที่ 8.14 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 5



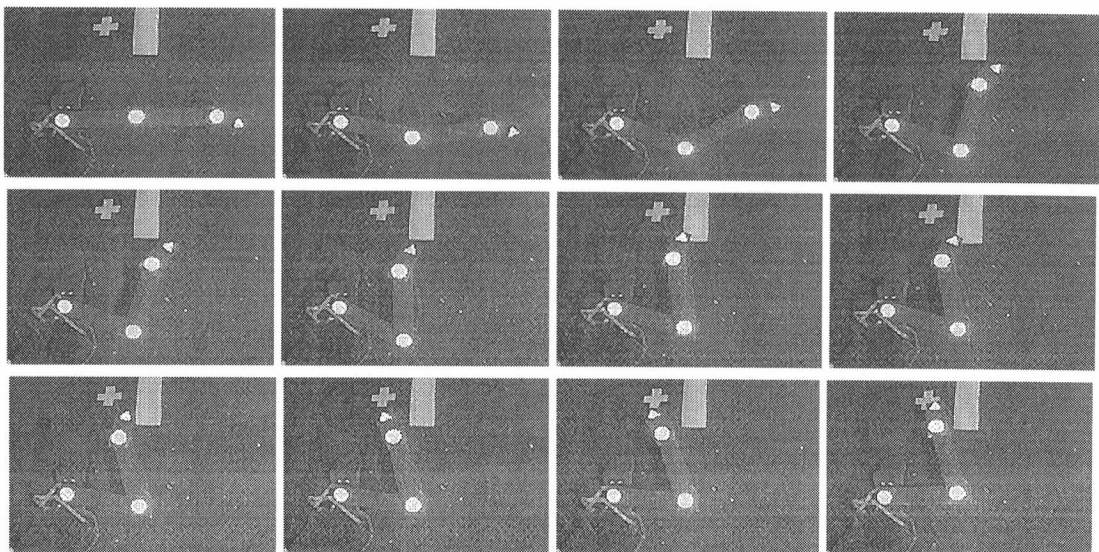
รูปที่ 8.15 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 5



รูปที่ 8.16 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 6 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 3800 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 94 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100% , $G = 250, P_6 = 100\%, E_6 = 3800$



รูปที่ 8.17 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 6



รูปที่ 8.18 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 6

ส่วนโปรแกรมที่ไม่ประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงเป็นเพราะว่า มีปัญหาเหมือนกับการทดลองที่ 5 ซึ่งเป็นผลมาจากการให้ค่าที่ไม่ถูกต้องของฟังก์ชัน INC? และ DEC? และปัญหาขนาดความยาวของแขนหุ่นยนต์ส่วนล่าง(ระหว่างข้อศอกกับข้อมือ)ที่ใช้ในการจำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งวัดจากสัญญาณภาพเมื่อเริ่มทำการทดลองมีขนาดสั้นกว่าแขนส่วนบน เป็นผลมาจากลักษณะของสัญญาณภาพที่บริเวณขอบของภาพจะถูกบีบอัดมากกว่าบริเวณกลางภาพ ซึ่งจะมีปัญหาเมื่อในการจำลองการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์ไม่มีการชนกับสิ่งกีดขวาง ทำให้โปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้เมื่อเกิดการชนกับสิ่งกีดขวางในการทดลองในโลกจริง ยิ่งไปกว่านั้นยังมีบางโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ไม่มีการชนกับสิ่งกีดขวางในระหว่างการจำลองการทำงานแต่สามารถแก้ปัญหาเมื่อเกิดการชนในการทดลองในโลกจริงได้

8.3.3 การทดลองที่ 7 รูปที่ 8.19 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 7 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้ค่าความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้การประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์ 8120 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 28 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จ 50 %

รูปที่ 8.20 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 7 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ เริ่มต้นด้วยการหมุนลงของข้อต่อหัวไหล่ ในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้น และข้อต่อข้อมือจะหมุนลงเล็กน้อย โดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ที่ออกนอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นบังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมพับแขน เพื่อเคลื่อนที่หลบสิ่งกีดขวางจนกระทั่งปลายแขนหุ่นยนต์สามารถมองเห็นเป้าหมาย ข้อต่อหัวไหล่จะหมุนขึ้นในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนลงเล็กน้อยเพื่อรักษาแนวของแขนหุ่นยนต์ที่จะทำให้ปลายแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมายได้ โปรแกรมหุ่นยนต์ที่ได้ในการทดลองนี้สามารถแก้ปัญหาการชนกับสิ่งกีดขวางได้ โดยเมื่อมีการชนเกิดขึ้นข้อต่อหัวไหล่จะถูกหมุนลง ในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้นจนทำให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางไปได้

รูปที่ 8.21 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถวบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเฉลยแล้ว

98 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริง มีเพียงโปรแกรมหุ่นยนต์เดียวเท่านั้นที่เกิดการวนซ้ำหลายครั้งในช่วงการเอื่อมแขนเข้าหาเป้าหมายก่อนที่จะสามารถเข้าหาเป้าหมายได้

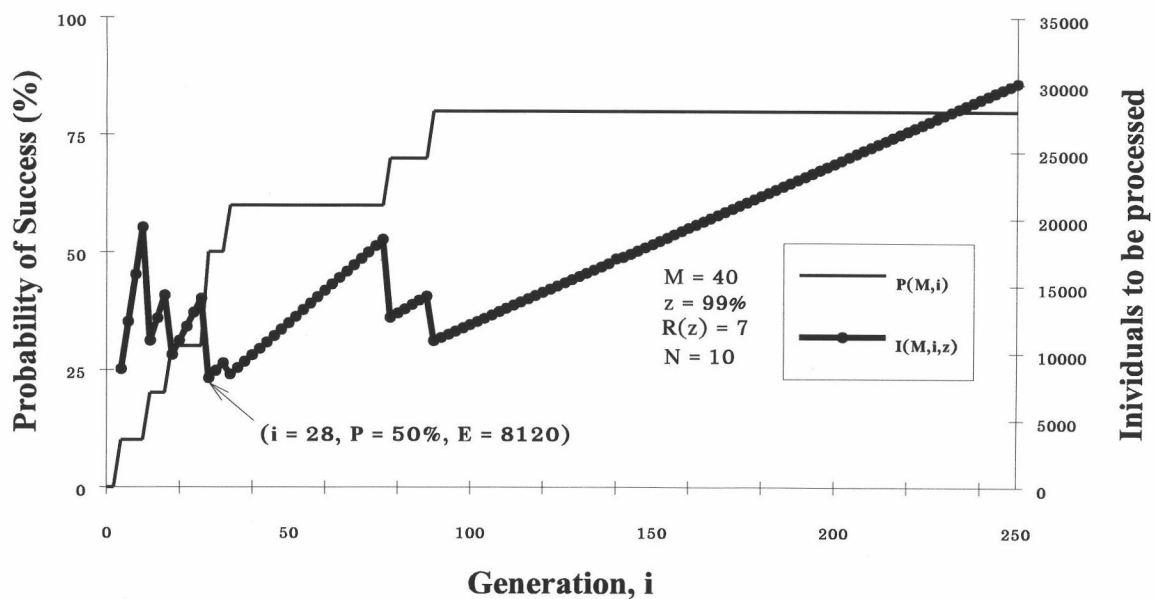
มีโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บางตัวมีการใช้ข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตจำกัดด้านบนของการมองเห็นช่วยบังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมกางแขนออก เพื่อบังคับปลายแขนให้เข้าสู่เป้าหมายได้

8.3.4 การทดลองที่ 8 รูปที่ 8.22 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 8 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้อัตราความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้เวลาประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์ 5680 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 141 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จถึง 100 %

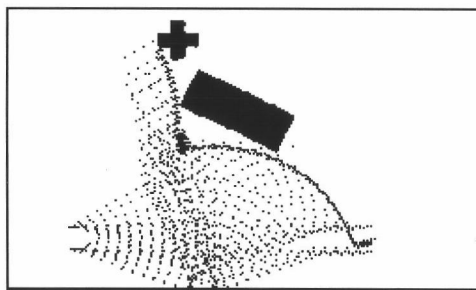
รูปที่ 8.23 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 8 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ เริ่มต้นด้วยการหมุนข้อต่อข้อศอกขึ้น และข้อต่อข้อมือจะหมุนลงจนสุด ซึ่งจะพอดีกับระยะห่างจากแขนหุ่นยนต์ถึงสิ่งกีดขวาง ทำให้แขนหุ่นยนต์สามารถผ่านสิ่งกีดขวางไปได้ จนกระทั่งเมื่อปลายแขนสามารถมองเห็นเป้าหมาย ข้อต่อหัวไหล่จะถูกยกขึ้นในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนลงเพื่อบังคับให้ปลายแขนเข้าหาเป้าหมาย แต่มีบางโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ใช้ข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตจำกัดด้านบนของการมองเห็นเพื่อช่วยบังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมกางแขน ทำให้สามารถบังคับปลายแขนให้เข้าสู่เป้าหมายได้

รูปที่ 8.24 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถวบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเฉลี่ยแล้ว 80 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริง

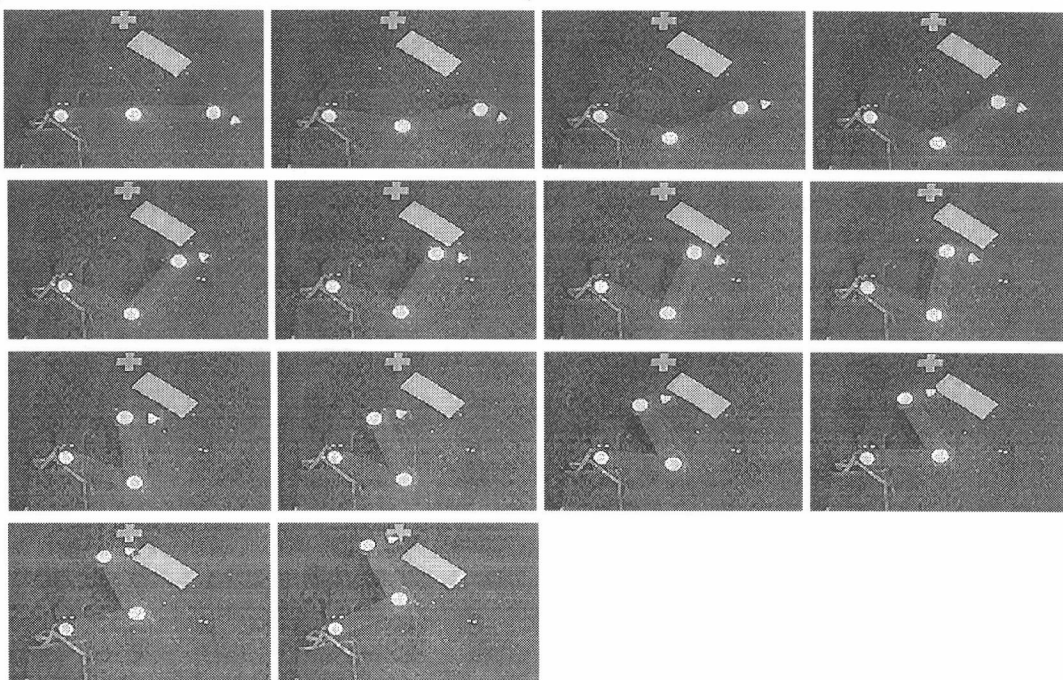
ส่วนไม่ประสบความสำเร็จนั้นเป็นเพราะว่า มีการทดลองอยู่ 4 การทดลองที่ประสบความสำเร็จเพียง 50 % เป็นเพราะว่าในการทดลองจริงเกิดการชนกับสิ่งกีดขวางในขณะที่แขนหุ่นยนต์กำลังพับแขน ซึ่งทำให้แขนหุ่นยนต์เกิดการเคลื่อนที่ผิดไปจากที่ได้จำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามแขนหุ่นยนต์ยังสามารถเคลื่อนที่พาปลายแขนไปยังเป้าหมายได้อยู่



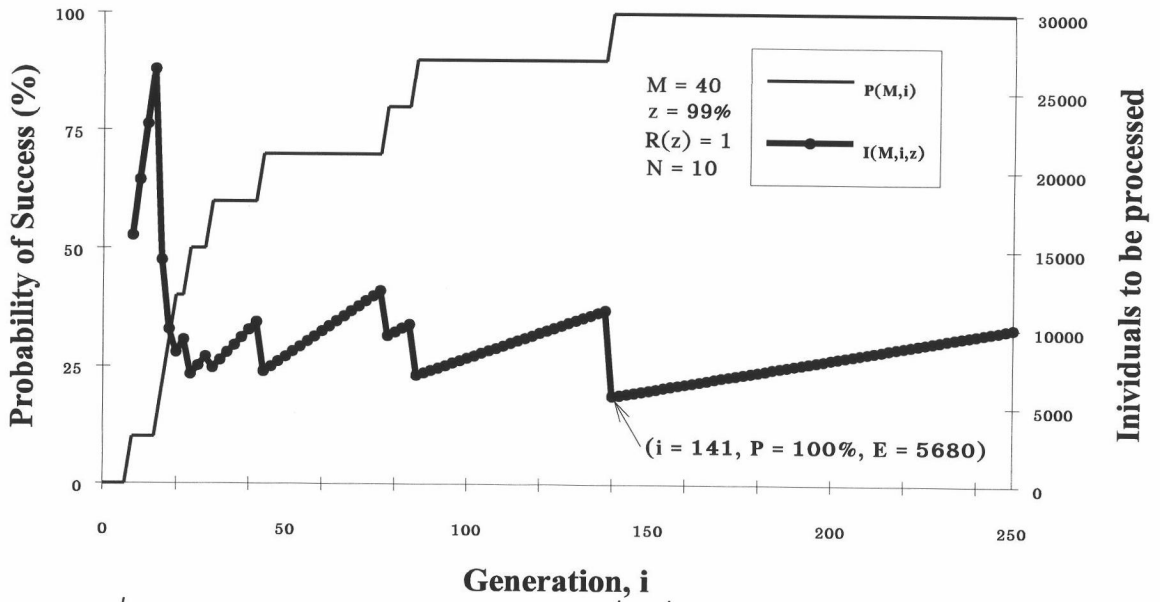
รูปที่ 8.19 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 7 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 8120 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 28 ที่มีโอกาสสำเร็จ 50% , $G = 250$, $P_7 = 60\%$, $E_7 = 8120$



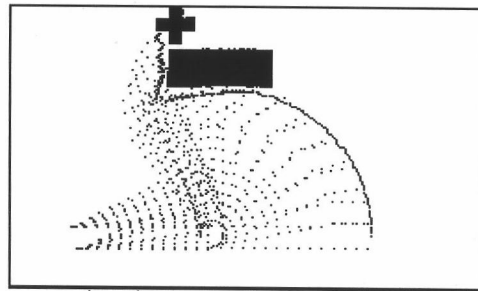
รูปที่ 8.20 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 7



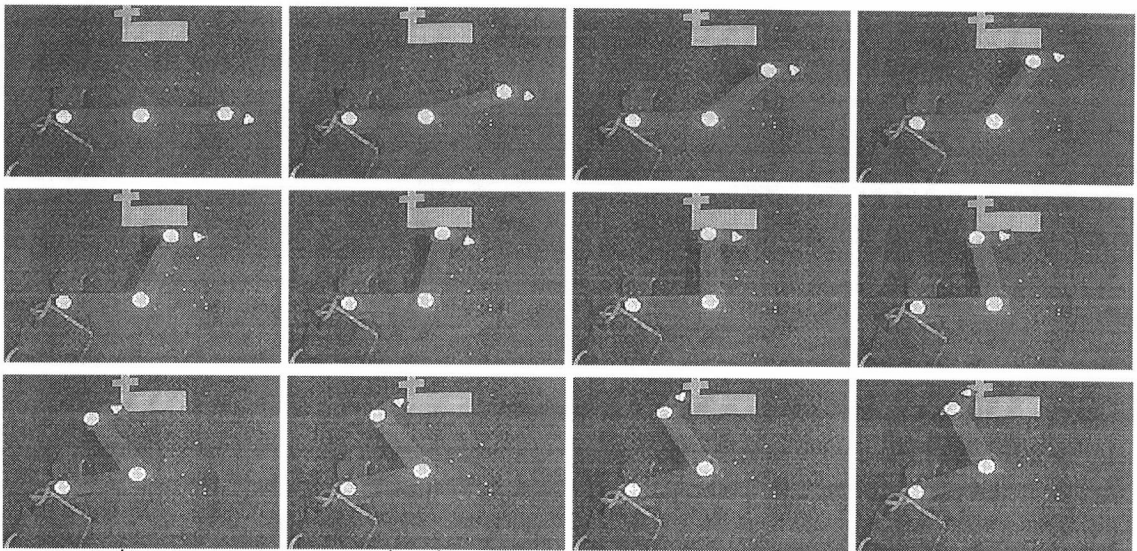
รูปที่ 8.21 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 7



รูปที่ 8.22 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 8 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 5680 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 141 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100% , $G = 250, P_8 = 100\%, E_8 = 5680$



รูปที่ 8.23 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 8



รูปที่ 8.24 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 8

การทดลองที่	เวลา (วินาที)	จำนวนรุ่นที่ใช้ใน การวิวัฒนาการ	จำนวนครั้งของ การ ล้างพันธุ	ขนาดของ โปรแกรม (ไบต์)	% ของความสำเร็จ การทดลองในโลก จริง
5	3963.6	137.3	1.6	652.0	80.0
6	1215.9	50.3	1.1	377.7	80.0
7	7693.4	134.2	1.8	496.8	98.0
8	1187.9	46.2	0.7	401.5	80.0
เฉลี่ยทั้งหมด	3515.2	92.0	1.3	482.0	84.5

ตารางที่ 8.2 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองของกลุ่มการทดลองที่ 2

8.3.5 ผลการทดลองของกลุ่มที่ 2 ตารางที่ 8.2 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองในแต่ละการทดลองที่ในกลุ่มที่ 2 ซึ่งจากการทดลองทั้ง 4 การทดลองพบว่า เวลาที่ใช้เฉลี่ยคือ 3515.2 วินาที หรือ ประมาณ 1 ชั่วโมง จำนวนรุ่นที่ใช้เฉลี่ยแล้วจะใช้ 92 รุ่นของการวิวัฒนาการ มีการใช้การล้างพันธุเฉลี่ยแล้ว 1.3 ครั้งต่อหนึ่งการทดลอง ขนาดของโปรแกรมเฉลี่ย 482 ไบต์ และเฉลี่ยแล้ว 84.5 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีในการทดลองในโลกจริง

จากผลการทดลองทั้งหมดของกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นกลุ่มของสภาพแวดล้อมที่มี 1 สิ่งกีดขวางเท่านั้น พบว่า

-จากข้อมูลเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 5-8 แสดงให้เห็นว่าการทดลองที่ 5 เป็นปัญหาที่ยากที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสิ่งกีดขวางอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับแขนหุ่นยนต์มากซึ่งทำให้ยากขึ้นในการหาวิธีหลบสิ่งกีดขวาง รองลงมาคือการทดลองที่ 7 เป็นเพราะว่าสิ่งกีดขวางอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับแขนหุ่นยนต์พอสมควร ตามด้วยการทดลองที่ 8 ซึ่งสิ่งกีดขวางอยู่ในตำแหน่งที่ห่างกับแขนหุ่นยนต์ ทำให้การพับแขนหุ่นยนต์ทำได้ง่ายโดยไม่เกิดการชนกับสิ่งกีดขวาง เป็นผลให้สามารถหลบสิ่งกีดขวางได้ง่าย และการทดลองที่ 6 เป็นปัญหาได้ง่ายที่สุด ซึ่งแม้ว่าสิ่งกีดขวางจะวางอยู่ในตำแหน่งที่ห่างพอสมควร แต่ตำแหน่งของเป้าหมายนั้นแขนหุ่นยนต์สามารถมองเห็นได้ง่ายกว่าการทดลองอื่นๆในกลุ่ม

-ขนาดของโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเฉลี่ยในแต่ละการทดลองไม่แน่นอน พบว่าขนาดของโปรแกรมเฉลี่ยทั้งหมดในกลุ่มนี้มีขนาดมากกว่ากลุ่มที่ 1 ซึ่งเป็นปัญหาที่ง่ายกว่า อาจกล่าวได้ว่าในปัญหาที่ยากกว่าจะมีขนาดโปรแกรมที่มากกว่าด้วย

-จำนวนของการล้างพันธุจะเป็นเครื่องบอกถึงความซับซ้อนของปัญหาที่มีต่อการแก้ปัญหาด้วยกระบวนการโปรแกรมพันธุการ ในกลุ่มนี้มีการใช้การล้างพันธุในการ

วิวัฒนาการอยู่บ้างเฉลี่ยทั้งหมดแล้ว 1.3 ครั้งต่อการทดลอง ซึ่งมากกว่าการทดลองกลุ่มที่ 1 ที่ไม่มีการใช้การล้างพันธุ์เลย แสดงให้เห็นความความซับซ้อนของปัญหาในสภาพสิ่งแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางได้ดี

-โปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้เกือบทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริง ส่วนที่ไม่ประสบความสำเร็จนั้นเป็นเพราะว่ามีปัญหา 2 อย่าง ดังต่อไปนี้คือ มีปัญหาในการขยับไปมาของปลายแขนหุ่นยนต์ที่ไม่ถูกต้องทำให้การตรวจสอบค่าจากฟังก์ชัน INC? และ DEC? ซึ่งจะให้ค่าที่ไม่ถูกต้องตามไปด้วย ทำให้โปรแกรมหุ่นยนต์ที่ใช้ฟังก์ชันดังกล่าวในการแก้ปัญหาไม่สามารถแก้ปัญหาได้เหมือนที่ได้จำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ และปัญหาในเรื่องความยาวของแขนส่วนล่างและแขนส่วนบนที่ไม่เท่ากันในการจำลองการทำงาน(ในโลกจริงความยาวของแขนส่วนบนและส่วนล่างจะเท่ากัน) ซึ่งพบว่าแขนส่วนล่างมีความยาวน้อยกว่าแขนส่วนบน ทั้งนี้เป็นผลมาจากการคำนวณความยาวของแขนทั้งสองจากสัญญาณภาพวิดีโอ ซึ่งบริเวณขอบของภาพจะถูกบีบอัดมากกว่าบริเวณกลางภาพ ทำให้ส่วนของแขนส่วนบนซึ่งอยู่ใกล้ขอบภาพมากกว่าสั้นลง จะมีปัญหาเมื่อในการจำลองการทำงานไม่มีการชนกับสิ่งกีดขวาง โดยทำให้โปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้นั้นไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้เมื่อเกิดการชนกับสิ่งกีดขวางในการทดลองในโลกจริง ยิ่งไปกว่านั้นพบว่ามีบางโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ไม่มีการชนกับสิ่งกีดขวางในระหว่างการจำลองการทำงาน แต่สามารถแก้ปัญหาเมื่อเกิดการชนในการทดลองในโลกจริงได้

-มีโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บางตัวมีการใช้ข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของการมองเห็นทั้งด้านล่างและด้านบน ช่วยบังคับให้เกิดพฤติกรรมพับแขนและกางแขนของแขนหุ่นยนต์

-มีโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บางตัวที่สามารถแก้ปัญหการชนกับสิ่งกีดขวางได้ โดยเมื่อเกิดการชนจะหมุนข้อต่อหัวไหล่ลงในขณะที่หมุนข้อต่อข้อศอกขึ้นไปด้วย ทำให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมการคลำทาง

-จากการเก็บข้อมูลในแต่ละการทดลองเพื่อหาว่า ตัวดำเนินการใดบ้างของการโปรแกรมพันธุการที่ใช้ในการสังเคราะห์โปรแกรมหุ่นยนต์ ที่มีผลต่อการค้นหาโปรแกรมตัวแรก ที่ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหาได้ในแต่ละครั้งของการทดลอง ในการทดลองกลุ่มนี้ จากการทดลองทั้งหมด 40 การทดลอง พบว่า 45 % ของโปรแกรมตัวแรก ที่ประสบความสำเร็จทั้งหมด เกิดจากตัวดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อยอด 27.5 % เกิดจากตัวดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อปลาย และ 27.5 % เกิดจากตัวดำเนินการผสมพันธุ์

8.4 ผลการทดลองของกลุ่มที่ 3 ในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางมากกว่า 1

การทดลองในกลุ่มนี้เป็นการทดลองเพื่อค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เพื่อนำปลายแขนไปยังเป้าหมายที่กำหนดไว้ในตำแหน่งต่างๆกันในสภาพแวดล้อมที่ต่างๆกัน ซึ่งกำหนดให้มีสิ่งกีดขวางมากกว่า 1 สิ่งกีดขวาง การทดลองกลุ่มนี้ประกอบด้วย การทดลองที่ 9-12

การทดลองที่ 9 สภาพแวดล้อมมีสิ่งกีดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 สิ่งกีดขวางที่วางตามแนวอนซึ่งขนานกับแนวแขนหุ่นยนต์ในระดับเดียวกัน โดยมีช่องว่างอยู่ระหว่างข้อต่อหัวไหล่และข้อต่อข้อศอกของแขนหุ่นยนต์ และวางตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านหลังสิ่งกีดขวาง

การทดลองที่ 10 สภาพแวดล้อมมีสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสิ่งกีดขวางรูปโค้งที่วางตามแนวอนซึ่งขนานกับแนวแขนหุ่นยนต์ โดยที่สิ่งกีดขวางที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางอยู่ในระดับที่สูงกว่า โดยมีช่องว่างอยู่ระหว่างข้อต่อข้อศอกและข้อต่อข้อมือของแขนหุ่นยนต์ และวางตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านหลังสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การทดลองที่ 11 สภาพแวดล้อมมีสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปวงกลมและสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตามแนวอนซึ่งขนานกับแนวแขนหุ่นยนต์ โดยที่สิ่งกีดขวางที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางอยู่ในระดับที่สูงกว่า โดยมีช่องว่างอยู่ระหว่างข้อต่อข้อศอกและข้อต่อข้อมือของแขนหุ่นยนต์ และวางตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านหลังสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การทดลองที่ 12 สภาพแวดล้อมมีสิ่งกีดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 สิ่งกีดขวางที่วางตามแนวเฉียงกับแนวแขนหุ่นยนต์ โดยมีช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวางอยู่ระหว่างข้อต่อหัวไหล่และข้อต่อข้อศอกของแขนหุ่นยนต์ โดยวางตำแหน่งเป้าหมายอยู่ภายในสุดของช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวาง

8.4.1 การทดลองที่ 9 รูปที่ 8.25 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 9 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้อัตราความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้เวลาประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์ 51240 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 60 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จเพียง 20 %

รูปที่ 8.26 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 9 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ เริ่มต้นด้วยการหมุนข้อต่อข้อศอกขึ้นและข้อต่อข้อมือจะหมุนลง จนกระทั่งแขนหุ่น-

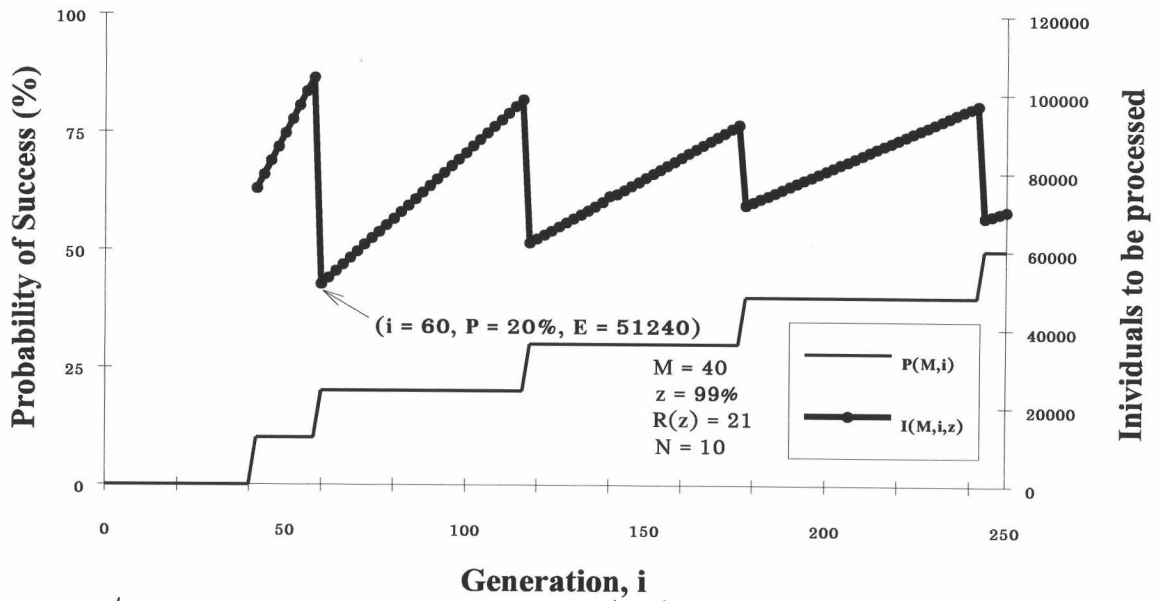
ยนต์ชนกับสิ่งกีดขวางข้อต่อหัวไหล่จะหมุนลงในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้น ประกอบกับอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนออกนอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นทำให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมคลำทางตามขอบของสิ่งกีดขวาง จนกระทั่งปลายแขนมองเห็นเป้าหมาย ข้อต่อหัวไหล่จะหมุนขึ้นในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนลงซึ่งจะบังคับให้ปลายแขนเข้าหาเป้าหมายได้ ซึ่งจะต้องอาศัยจังหวะการชนกับสิ่งกีดขวางระหว่างช่องว่างที่พอดีจึงสามารถพาแขนหุ่นยนต์ลอดผ่านไปได้

รูปที่ 8.27 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถวบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเฉลี่ยแล้ว 70 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริง

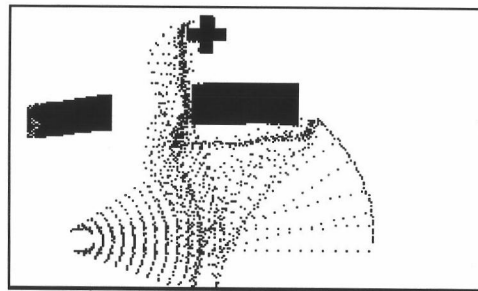
ส่วนโปรแกรมที่ไม่ประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริงเป็นเพราะว่า มีปัญหาในการขยับแขนหุ่นยนต์ให้ลอดผ่านช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวาง ซึ่งต้องอาศัยจังหวะการชนกับสิ่งกีดขวางระหว่างช่องว่างที่พอดีและไม่เกิดการชนมากเกินไป ซึ่งจะทำให้การทำงานของโปรแกรมผิดพลาด

8.4.2 การทดลองที่ 10 รูปที่ 8.28 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 10 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้อัตราความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้เวลาประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์ 66000 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 164 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จ 40 %

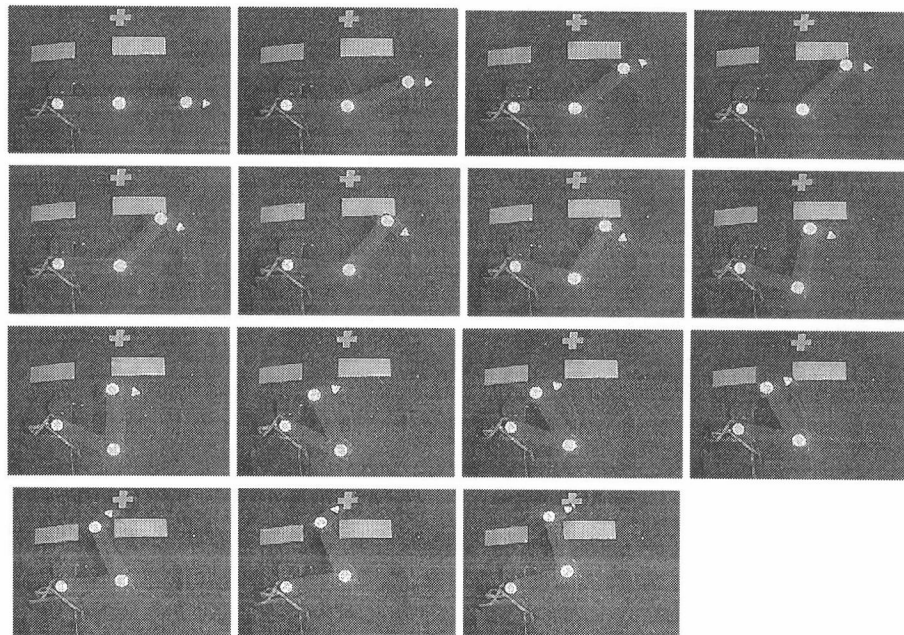
รูปที่ 8.29 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 10 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ เริ่มต้นด้วยการหมุนลงของข้อต่อหัวไหล่ ในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้น และข้อต่อข้อมือจะหมุนขึ้น โดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนออกนอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นจะบังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมพับแขน เพื่อเคลื่อนที่หลบสิ่งกีดขวางรูปโค้ง จนกระทั่งปลายแขนหุ่นยนต์สามารถมองเห็นเป้าหมาย ข้อต่อหัวไหล่จะหมุนขึ้นในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้นเล็กน้อยเพื่อรักษาแนวของแขนหุ่นยนต์ที่จะทำให้ปลายแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมายได้ ในโปรแกรมหุ่นยนต์บางตัวที่มีการหมุนของข้อต่อข้อมือขึ้นน้อยเกินไปจะทำให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางได้ยาก ซึ่งบางครั้งผ่านไปได้แต่ ไม่สามารถเข้าหาสิ่งกีดขวางได้เพราะตำแหน่งของปลายแขนไม่เหมาะสม



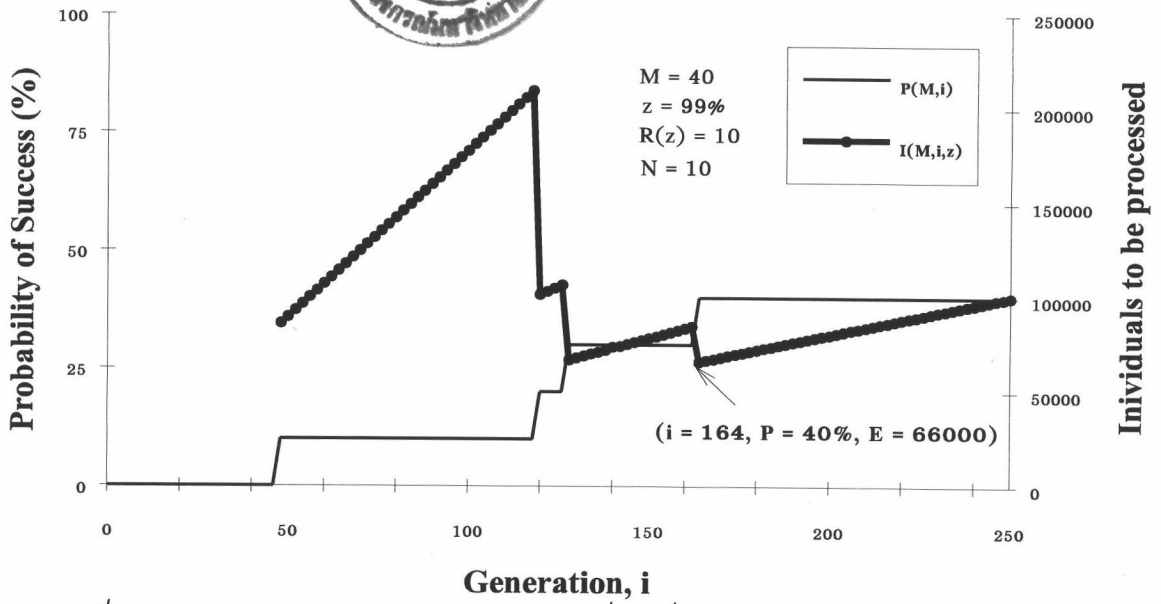
รูปที่ 8.25 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 9 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 51240 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 60 ที่มีโอกาสสำเร็จ 20%, $G = 250, P_9 = 20\%, E_9 = 51240$



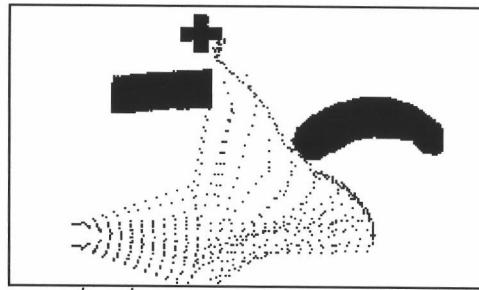
รูปที่ 8.26 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 9



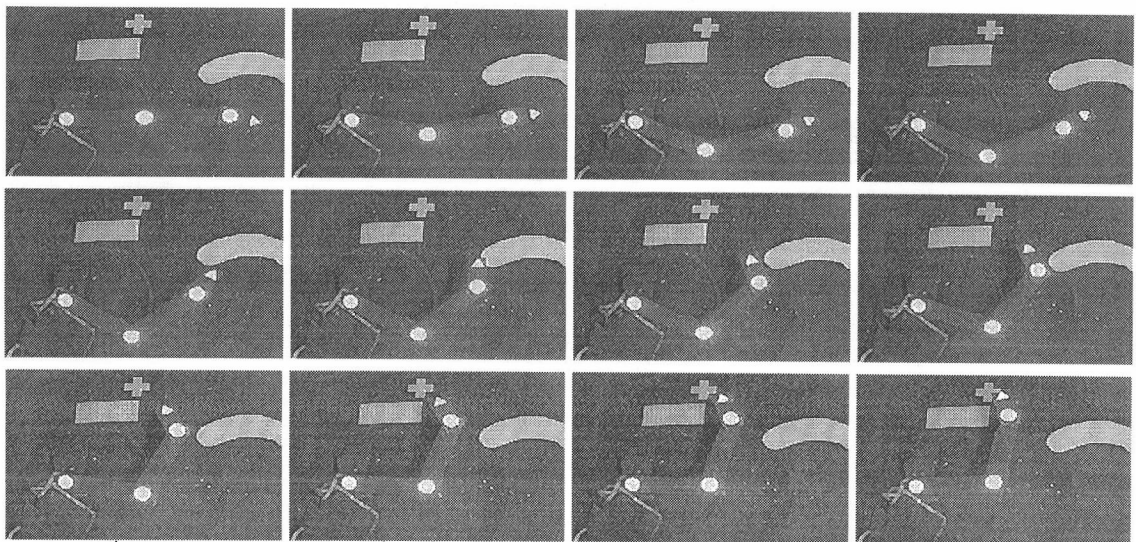
รูปที่ 8.27 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 9



รูปที่ 8.28 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 10 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 66000 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 164 ที่มีโอกาสสำเร็จ 40% , $G = 250, P_{10} = 80\%, E_{10} = 66000$



รูปที่ 8.29 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 10



รูปที่ 8.30 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 10

รูปที่ 8.30 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถบบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเฉลี่ยแล้ว 48 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริง

ส่วนโปรแกรมที่ไม่ประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงเป็นเพราะว่า มีปัญหาในการเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางรูปโค้ง ที่จะต้องมีจังหวะและตำแหน่งที่พอดีจึงจะสามารถผ่านไปได้ ถึงแม้ว่าจะสามารถผ่านไปได้อีกก็ตาม การวางตำแหน่งของปลายแขนที่ผ่านสิ่งกีดขวางมาได้จะต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมจึงจะสามารถเข้าหาเป้าหมายได้

8.4.3 การทดลองที่ 11 รูปที่ 8.31 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 11 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้ค่าความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้การประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์ 1560 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 38 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จถึง 100 %

รูปที่ 8.32 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 11 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ เริ่มต้นด้วยการหมุนลงของข้อต่อหัวไหล่ ในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้น และข้อต่อข้อมือจะหมุนลงเล็กน้อย โดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นจะบังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมพับแขน จนกระทั่งปลายแขนหุ่นยนต์สามารถมองเห็นเป้าหมาย ข้อต่อหัวไหล่จะหมุนขึ้นในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนลง และใช้สิ่งกีดขวางรูปวงกลมเป็นที่พิงแขนโดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่เข้าชนสิ่งกีดขวางของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งจะทำให้แขนหุ่นยนต์ค่อยๆกางออกจนทำให้ปลายแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมายได้

รูปที่ 8.33 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถบบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเฉลี่ยแล้ว 70 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริง

ส่วนโปรแกรมที่ไม่ประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงเป็นเพราะว่า บางโปรแกรมมีปัญหามือเหมือนกับการทดลองที่ 5 และ 6 ซึ่งเป็นผลมาจากการให้ค่าที่ไม่ถูกต้องของฟังก์ชัน INC? และ DEC? และบางโปรแกรมมีปัญหาในการหมุนของปลายแขนที่ไม่พอ-

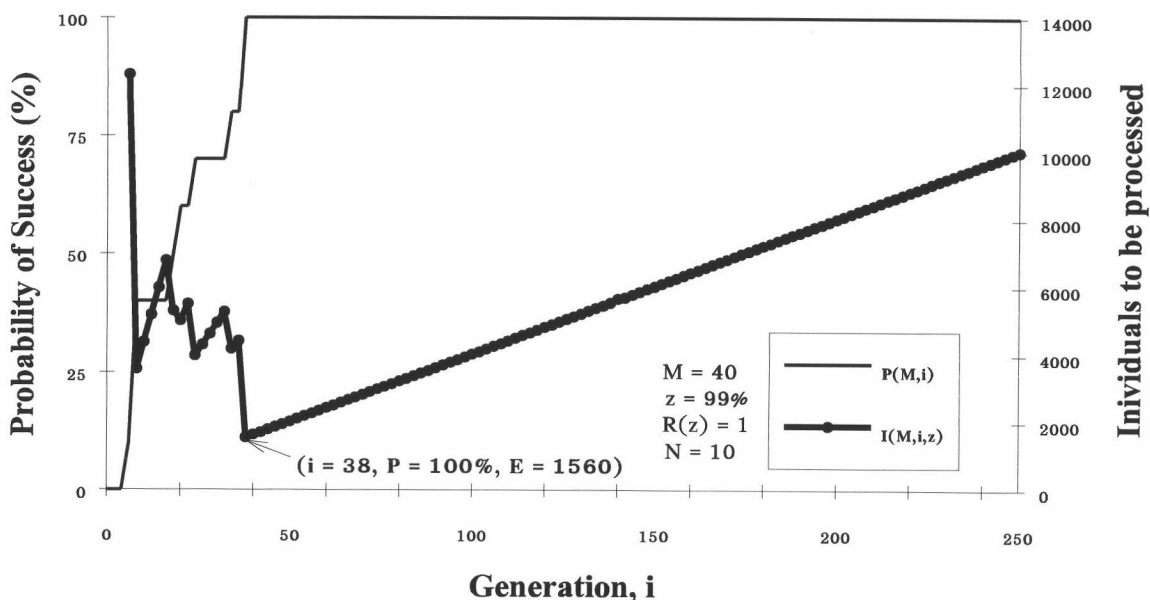
ดี โดยถ้ามากเกินไปจะไม่สามารถเข้าหาเป้าหมายได้ และถ้าน้อยเกินไปจะมีปัญหาในการหลบ-
หลีกเลี่ยงกีดขวาง

8.4.4 การทดลองที่ 12 รูปที่ 8.34 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 12 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้ค่าความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้เวลาประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์ 5600 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 34 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จ 70 %

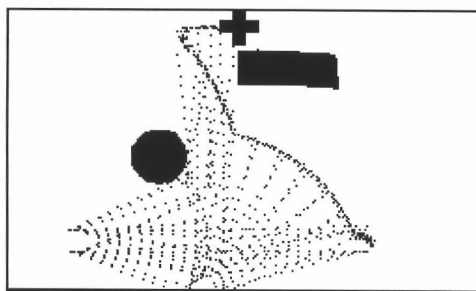
รูปที่ 8.35 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรม หุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 12 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ เริ่มต้นด้วยการหมุนของข้อต่อหัวไหล่ขึ้นเล็กน้อย ข้อต่อข้อศอกหมุนขึ้น และข้อต่อข้อมือจะหมุนลงเล็กน้อย จนกระทั่งแขนหุ่นยนต์ชนกับสิ่งกีดขวางข้อต่อหัวไหล่จะหมุนลงในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้น ประกอบกับอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่นอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นทำให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมคล้ำทางตามขอบของสิ่งกีดขวาง จนกระทั่งปลายแขนมองเห็นเป้าหมาย ข้อต่อหัวไหล่จะหมุนขึ้นในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้นซึ่งจะบังคับให้ปลายแขนเข้าไปในช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวาง จากนั้นข้อต่อหัวไหล่จะหมุนขึ้นและอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่เข้าชนสิ่งกีดขวางของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งจะบังคับให้ปลายแขนเข้าหาเป้าหมายได้

รูปที่ 8.36 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถวบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเฉลี่ยแล้ว 90 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริง

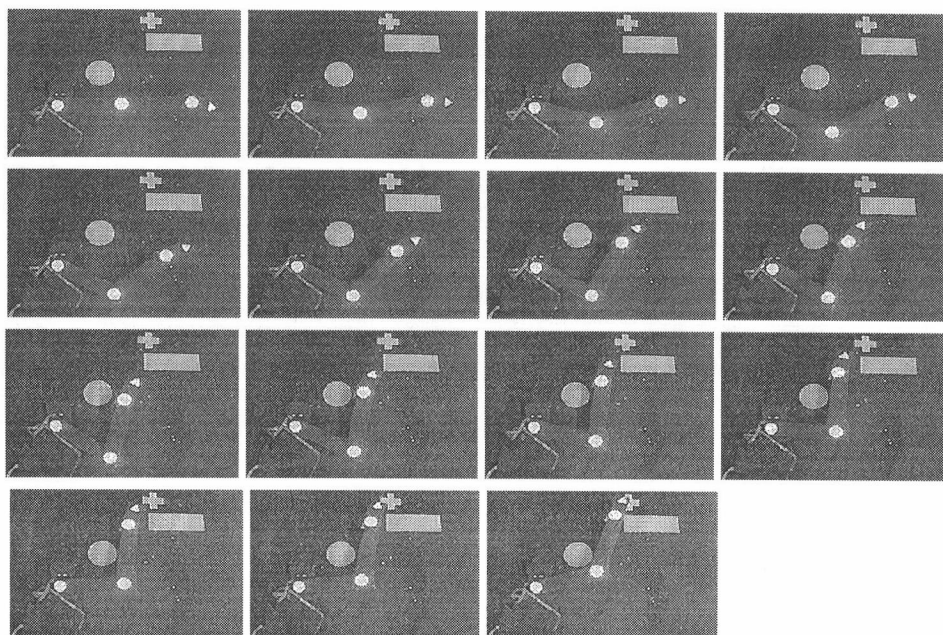
ส่วนโปรแกรมที่ไม่ประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงเป็นเพราะว่า บางโปรแกรมมีปัญหาซึ่งเป็นผลมาจากการให้ค่าที่ไม่ถูกต้องของฟังก์ชัน INC? และ DEC? ทำให้โปรแกรมหุ่นยนต์ทำงานไม่ถูกต้อง



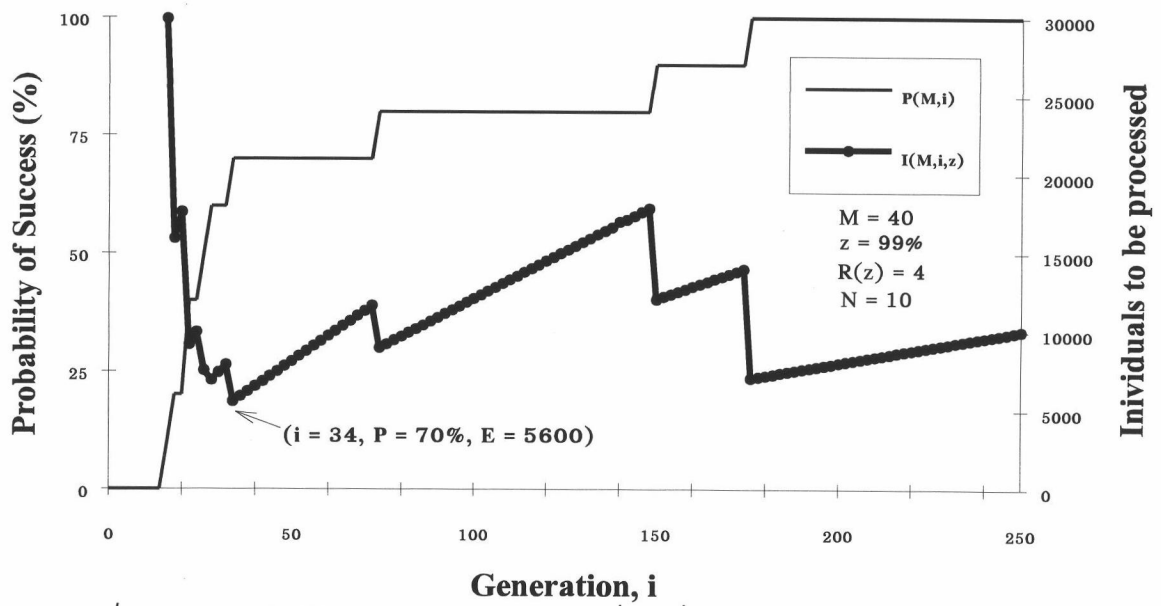
รูปที่ 8.31 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 11 ซึ่งต้องการประมวลผล 1560 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรอบที่ 38 ที่มีโอกาสสำเร็จถึง 100% , $G = 250$, $P_{11} = 100\%$, $E_{11} = 1560$



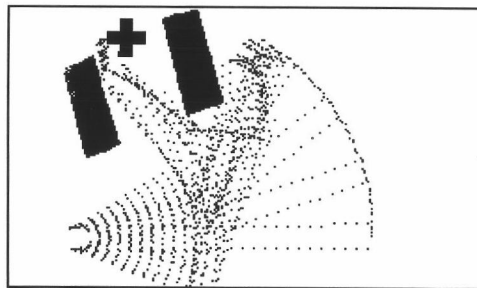
รูปที่ 8.32 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 11



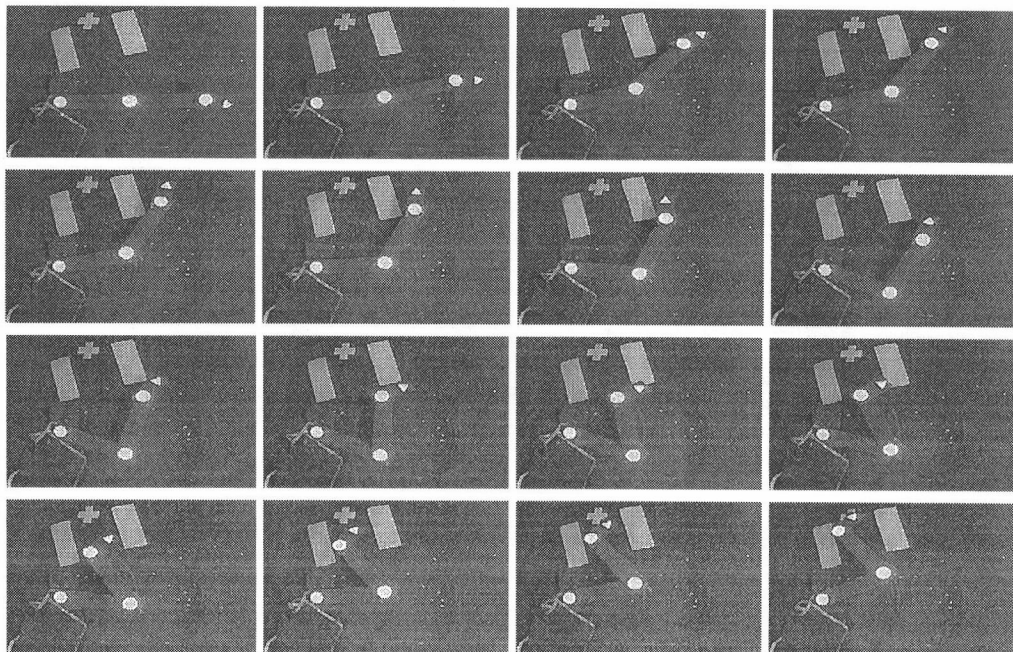
รูปที่ 8.33 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในโลกจริงของการทดลองที่ 11



รูปที่ 8.34 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 12 ซึ่งต้องการประมวลผล 5600 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในวันที่ 34 ที่มีโอกาสสำเร็จ 70% , $G = 250$, $P_{12} = 70\%$, $E_{12} = 5600$



รูปที่ 8.35 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 12



รูปที่ 8.36 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 12

การทดลองที่	เวลา (วินาที)	จำนวนรุ่นที่ใช้ใน การวิวัฒนาการ	จำนวนครั้งของ การ ล้างพันธุ	ขนาดของ โปรแกรม (ไบต์)	% ของความสำเร็จ การทดลองในโลก จริง
9	16496.2	383.8	3	949.0	70.0
10	12008.3	436.1	3.6	1110	48.0
11	391.4	19.8	0.4	207.0	70.0
12	1346.8	56.3	0.6	357.3	90.0
เฉลี่ยทั้งหมด	7560.6	224	1.9	655.8	69.5

ตารางที่ 8.3 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองของกลุ่มการทดลองที่ 3

8.4.5 ผลการทดลองของกลุ่มที่ 3 ตารางที่ 8.3 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองในแต่ละการทดลองที่ในกลุ่มที่ 3 ซึ่งจากการทดลองทั้ง 4 การทดลองพบว่า เวลาที่ใช้เฉลี่ยคือ 7560.6 วินาที หรือประมาณ 2 ชั่วโมง จำนวนรุ่นที่ใช้เฉลี่ยแล้วจะใช้ 224 รุ่นของการวิวัฒนาการ มีการใช้การล้างพันธุเฉลี่ยแล้ว 1.9 ครั้ง ขนาดของโปรแกรมเฉลี่ย 655.8 ไบต์ และเฉลี่ยแล้ว 69.5 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีในการทดลองในโลกจริง

จากผลการทดลองทั้งหมดของกลุ่มที่ 3 ซึ่งเป็นกลุ่มของสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางมากกว่า 1 พบว่า

-จากข้อมูลเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 9-12 แสดงให้เห็นว่าการทดลองที่ 10 เป็นปัญหาที่ยากที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสิ่งกีดขวางรูปโค้งอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับแขนหุ่นยนต์มากและมีลักษณะรูปร่างที่โค้งลง ซึ่งทำให้เกิดความยากที่จะหาวิธีหลบสิ่งกีดขวางรองลงมาคือการทดลองที่ 9 ซึ่งมีลักษณะของปัญหาค้ำยกับการทดลองที่ 10 แต่สิ่งกีดขวางทั้งสองอยู่ห่างจากแขนหุ่นยนต์มากกว่าทำให้หลบหลีกได้ง่ายกว่า ตามด้วยการทดลองที่ 12 ซึ่งสิ่งกีดขวางอยู่ในตำแหน่งที่ห่างพอสมควรทำให้หาวิธีการหลบหลีกได้ง่าย ลักษณะการวางตัวของสิ่งกีดขวางทั้งสองยังถูกช่วยในการบังคับแขนหุ่นยนต์ให้เข้าหาเป้าหมายได้ และการตำแหน่งของเป้าหมายนั้นสามารถเห็นได้ง่ายกว่าการทดลองอื่นๆในกลุ่ม และการทดลองที่ 11 เป็นปัญหาได้ง่ายที่สุด ซึ่งสิ่งกีดขวางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ในตำแหน่งที่ห่างกับแขนหุ่นยนต์ซึ่งทำให้การพับแขนหุ่นยนต์ทำได้ง่ายขึ้น และสภาพแวดล้อมมีความเอื้ออำนวยต่อการแก้ปัญหา ทั้งนี้เพราะว่าสิ่งกีดขวางรูปวงกลมได้ถูกใช้เป็นที่พักแขนสำหรับการบังคับแขนหุ่นยนต์ จึงทำให้ปลายแขนสามารถเข้าหาเป้าหมายได้ง่าย

-ขนาดของโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็กในแต่ละการทดลองไม่แน่นอน แต่พบว่าขนาดของโปรแกรมเฉลี่ยทั้งหมดในกลุ่มนี้มีขนาดมากกว่ากลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นปัญหาที่ง่ายกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในปัญหาที่ยากขึ้นขนาดโปรแกรมจะมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

-จำนวนของการล้างพันธุ์จะเป็นเครื่องบอกถึงความซับซ้อนของปัญหาที่มีต่อการแก้ปัญหาด้วยกระบวนการโปรแกรมพันธุการ ในกลุ่มนี้มีการใช้การล้างพันธุ์ในการวิวัฒนาการอยู่บ้างเฉลี่ยทั้งหมดแล้ว 1.9 ครั้งต่อการทดลอง ซึ่งมากกว่าการทดลองที่ 2 แสดงถึงความความซับซ้อนของปัญหาในสภาพสิ่งแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางมากกว่า 1

-โปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงได้ดีพอสมควร ส่วนที่ไม่ประสบความสำเร็จนั้นเป็นเพราะ มีปัญหาในการขยับไปมาของปลายแขนหุ่นยนต์ที่ไม่ถูกต้องทำให้การตรวจสอบค่าจากฟังก์ชัน INC? และ DEC? ซึ่งจะให้ค่าที่ไม่ถูกต้องตามไปด้วย ซึ่งทำให้โปรแกรมหุ่นยนต์ที่ใช้ฟังก์ชันดังกล่าวในการแก้ปัญหาไม่สามารถแก้ปัญหาได้เหมือนที่ได้จำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ และบางโปรแกรมมีปัญหาในการหมุนของปลายแขนที่ไม่พอดี โดยถ้ามากเกินไปจะไม่สามารถเข้าหาเป้าหมายได้ และถ้าน้อยเกินไปจะมีปัญหาในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

-มีโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บางตัวมีการใช้ข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของการมองเห็นทั้งด้านล่างและด้านบน ช่วยบังคับให้เกิดพฤติกรรมพับแขนและกางของแขนหุ่นยนต์

-มีโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บางตัวที่ใช้อาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่เข้าชนสิ่งกีดขวางของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งจะบังคับให้ปลายแขนเข้าหาเป้าหมายได้

-จากการเก็บข้อมูลในแต่ละการทดลองเพื่อหาว่า ตัวดำเนินการใดบ้างของการโปรแกรมพันธุการที่ใช้ในการสังเคราะห์โปรแกรมหุ่นยนต์ ที่มีผลต่อการค้นหาโปรแกรมตัวแรกที่ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหาได้ในแต่ละครั้งของการทดลอง ในการทดลองกลุ่มนี้จากการทดลองทั้งหมด 40 การทดลอง พบว่า 52.5 % ของโปรแกรมตัวแรกที่ประสบความสำเร็จทั้งหมด เกิดจากตัวดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อยอด 27.5 % เกิดจากตัวดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อปลาย และ 20 % เกิดจากตัวดำเนินการผสมพันธุ์

8.5 ผลการทดลองของกลุ่มที่ 4 ในสภาพแวดล้อมที่มีปัญหาจุดต่ำสุดเสมือน

การทดลองในกลุ่มนี้เป็นการทดลองเพื่อค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เพื่อนำปลายแขนไปยังเป้าหมายที่กำหนดไว้ในตำแหน่งต่างๆกันในสภาพแวดล้อมที่ต่างๆกันที่มีลักษณะของปัญหาจุดต่ำสุดเสมือน ซึ่งแขนหุ่นยนต์จะเสียเวลาติดอยู่ในตำแหน่งที่คล้ายกับจะเป็นทางไปสูเป้าหมายเป็นเวลานาน การทดลองกลุ่มนี้ประกอบด้วย การทดลองที่ 13-16

การทดลองที่ 13 สภาพแวดล้อมมีสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปวงกลมและสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่วางตามแนวนอนซึ่งขนานกับแนวแขนหุ่นยนต์ โดยที่สิ่งกีดขวางที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางอยู่ในระดับที่สูงกว่า โดยมีช่องว่างแคบๆที่แขนหุ่นยนต์ไม่สามารถผ่านไปได้ โดยวางตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านหลังช่องว่างนั้นซึ่งเป็นจุดที่จะเกิดปัญหาจุดต่ำสุดเสมือน

การทดลองที่ 14 สภาพแวดล้อมมีสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็กๆ โดยที่สิ่งกีดขวางอยู่ในระดับที่ไม่สูง โดยวางอยู่ระหว่างข้อต่อข้อศอกและข้อต่อข้อมือของแขนหุ่นยนต์ และวางตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านหลังสิ่งกีดขวาง โดยตำแหน่งที่อยู่ด้านขวาของสิ่งกีดขวางจะเป็นจุดที่จะเกิดปัญหาจุดต่ำสุดเสมือน

การทดลองที่ 15 สภาพแวดล้อมมีสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็กๆ โดยที่สิ่งกีดขวางอยู่ในระดับที่สูงขึ้นมา โดยวางอยู่ระหว่างข้อต่อข้อศอกและข้อต่อข้อมือของแขนหุ่นยนต์ และวางตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านหลังสิ่งกีดขวาง โดยตำแหน่งที่อยู่ด้านขวาของสิ่งกีดขวางเป็นจุดที่จะเกิดปัญหาจุดต่ำสุดเสมือน

การทดลองที่ 16 สภาพแวดล้อมมีสิ่งกีดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 3 อันที่มีขนาดต่างๆกันวางเรียงตามแนวนอนขนานกับแนวแขนหุ่นยนต์ โดยมีช่องว่าง 2 ช่อง โดยวางตำแหน่งเป้าหมายอยู่หลังสิ่งกีดขวางขนาดเล็กที่วางอยู่ตรงกลาง โดยช่องว่างที่อยู่ด้านขวาของสิ่งกีดขวางเป็นจุดที่จะเกิดปัญหาจุดต่ำสุดเสมือน

8.5.1 การทดลองที่ 13 รูปที่ 8.37 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 13 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้อัตราความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 1250 รุ่น พบว่าต้องใช้การประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์ 71760 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 896 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จ 90 %

รูปที่ 8.38 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 13 ซึ่งมีลักษณะของการ

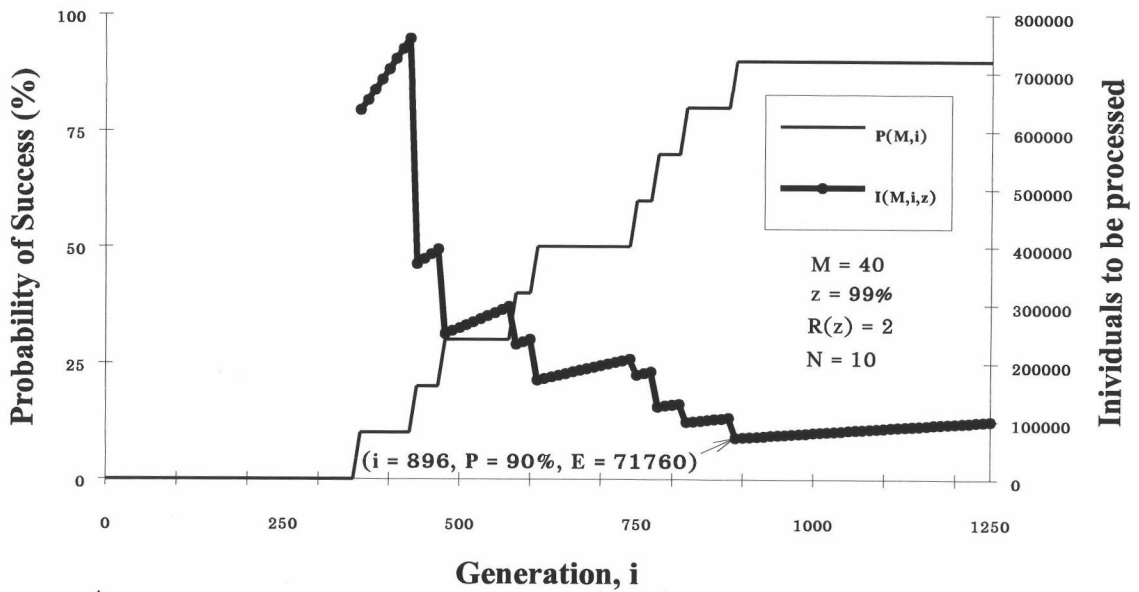
เคลื่อนที่คือ ข้อต่อหัวไหล่จะหมุนลง ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้น และข้อต่อข้อมือจะหมุนลงเล็กน้อย โดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่นอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นจะบังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมพับแขน ทำให้แขนหุ่นยนต์สามารถผ่านสิ่งกีดขวางไปได้ จนกระทั่งปลายแขนหุ่นยนต์สามารถมองเห็นเป้าหมายข้อต่อหัวไหล่จะถูกหมุนขึ้นในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนลง เพื่อกางแขนหุ่นยนต์ออก ซึ่งจะช่วยให้ปลายแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมายได้ ในโปรแกรมหุ่นยนต์บางตัวที่มีการหมุนของข้อต่อหัวไหล่มากจนทำให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เลยเป้าหมายไป ซึ่งโปรแกรมจะใช้ข้อจำกัดของการเคลื่อนที่นอกขอบเขตด้านบนของการมองเห็นที่จะช่วยบังคับให้ปลายแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมายได้

รูปที่ 8.39 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถวบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเฉลี่ยแล้ว 81 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริง

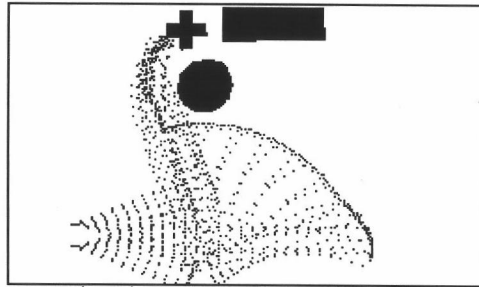
ส่วนโปรแกรมที่ไม่ประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงเป็นเพราะว่า มีปัญหาในการใช้ข้อจำกัดของการเคลื่อนที่นอกขอบเขตด้านบนของการมองเห็นในการช่วยบังคับให้ปลายแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมาย ซึ่งบางทีแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกนอกพื้นที่การมองเห็นทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลภาพไม่ถูกต้อง บางโปรแกรมเกิดการชนกับสิ่งกีดขวางทำให้การทำงานผิดพลาด และปัญหาของความไม่เท่ากันของระยะห่างในแนวนอนและแนวตั้งของการจำลองการทำงานบนคอมพิวเตอร์กับสัญญาณภาพจากกล้องวิดีโอ

8.5.2 การทดลองที่ 14 รูปที่ 8.40 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 14 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้ค่าความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 1250 รุ่น พบว่าต้องใช้เวลาประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์ 102440 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 196 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จเพียง 30 %

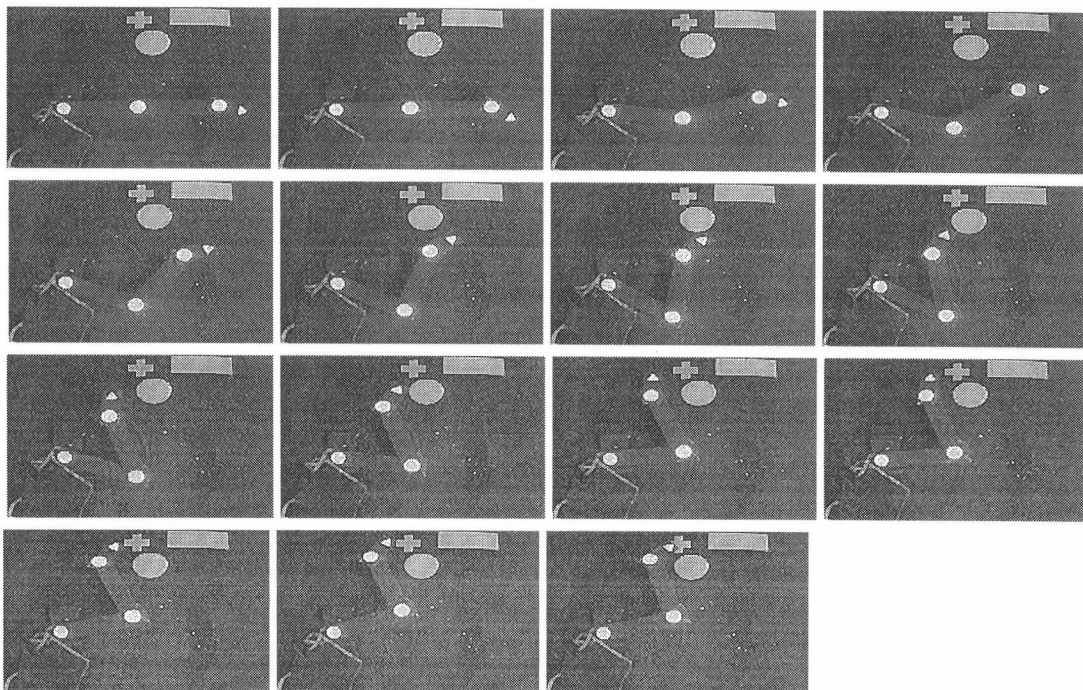
รูปที่ 8.41 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 14 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ เริ่มต้นด้วยการหมุนลงของข้อต่อหัวไหล่ ในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้น และข้อต่อข้อมือจะหมุนลง โดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่นอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นจะบังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมพับแขน เพื่อเคลื่อนที่หลบสิ่งกีดขวาง จนกระทั่ง



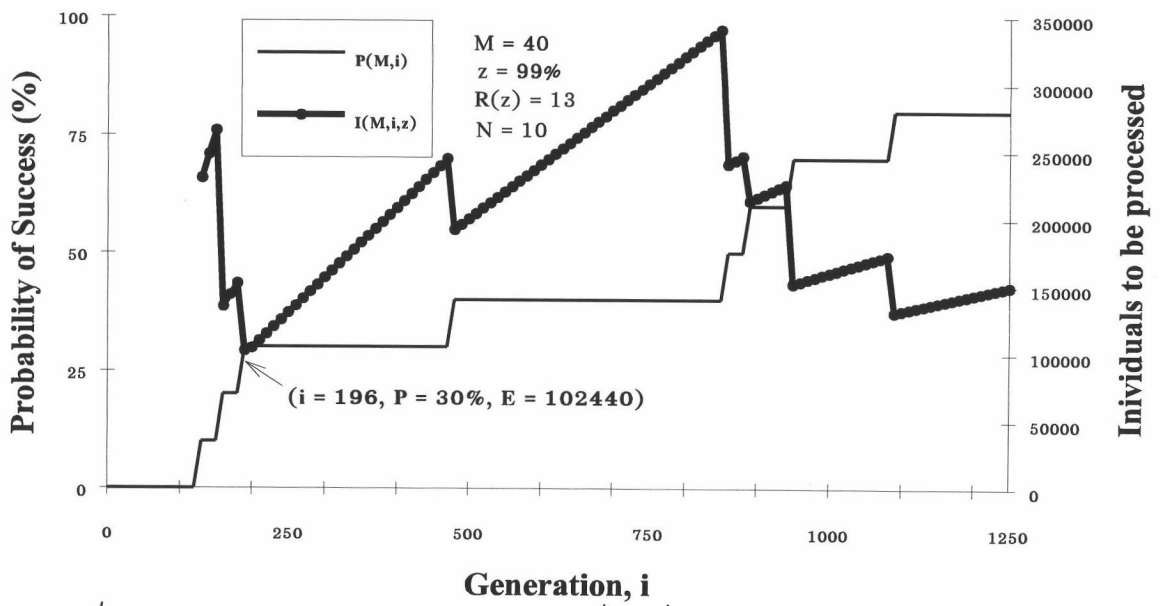
รูปที่ 8.37 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 13 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 71760 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 896 ที่มีโอกาสสำเร็จ 90% , $G = 1250$, $P_{13} = 90\%$, $E_{13} = 71760$



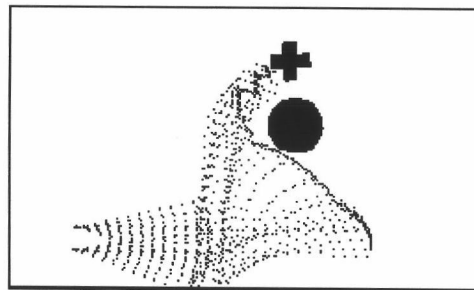
รูปที่ 8.38 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 13



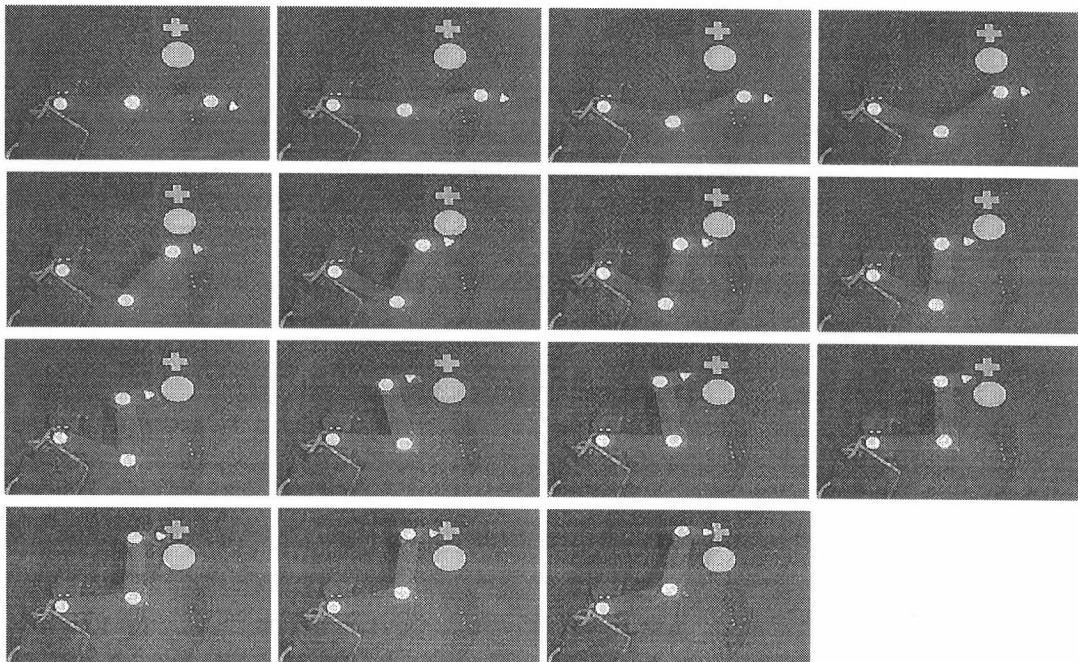
รูปที่ 8.39 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในโลกจริงของการทดลองที่ 13



รูปที่ 8.40 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 14 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 102440 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 196 ที่มีโอกาสสำเร็จ 30% , $G = 1250$, $P_{14} = 30\%$, $E_{14} = 102440$



รูปที่ 8.41 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 14



รูปที่ 8.42 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 14



ปลายแขนหุ่นยนต์สามารถมองเห็นเป้าหมาย ข้อต่อหัวไหล่จะหมุนขึ้นในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้นเล็กน้อยเพื่อรักษาแนวของแขนหุ่นยนต์ที่จะทำให้ปลายแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมายได้ บางโปรแกรมมีการหมุนของข้อต่อข้อมือขึ้นมากเกินไปทำให้ไม่สามารถเข้าหาสิ่งกีดขวางได้

รูปที่ 8.42 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถวบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ที่ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเฉลี่ยแล้ว 67 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริง

ส่วนโปรแกรมที่ไม่ประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงเป็นเพราะว่ามีปัญหาการวางตำแหน่งของปลายแขนที่เคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางมาได้ซึ่งต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมจึงจะสามารถเข้าหาเป้าหมายได้ และโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ได้ไม่มีความแข็งแรงพอที่จะสามารถแก้ปัญหาในโลกจริงได้เหมือนในการจำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์

8.5.3 การทดลองที่ 15 รูปที่ 8.43 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 15 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้อัตราความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 1750 รุ่น พบว่าต้องใช้การประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์ 245440 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 1533 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จ 70 %

รูปที่ 8.44 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกสังเคราะห์จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 15 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ เริ่มต้นด้วยการหมุนลงของข้อต่อหัวไหล่ ในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้น และข้อต่อข้อมือจะหมุนลง โดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่นอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นจะบังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมพับแขน เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง จนกระทั่งปลายแขนหุ่นยนต์สามารถมองเห็นเป้าหมาย ข้อต่อหัวไหล่จะหมุนขึ้นในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนลง และโดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่นอกขอบเขตจำกัดด้านบนของการมองเห็นเพื่อบังคับให้แขนหุ่นยนต์ค่อยๆ เอื้อมแขนเข้าถึงเป้าหมายได้

รูปที่ 8.45 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถวบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ที่ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเฉลี่ยแล้ว 87 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริง

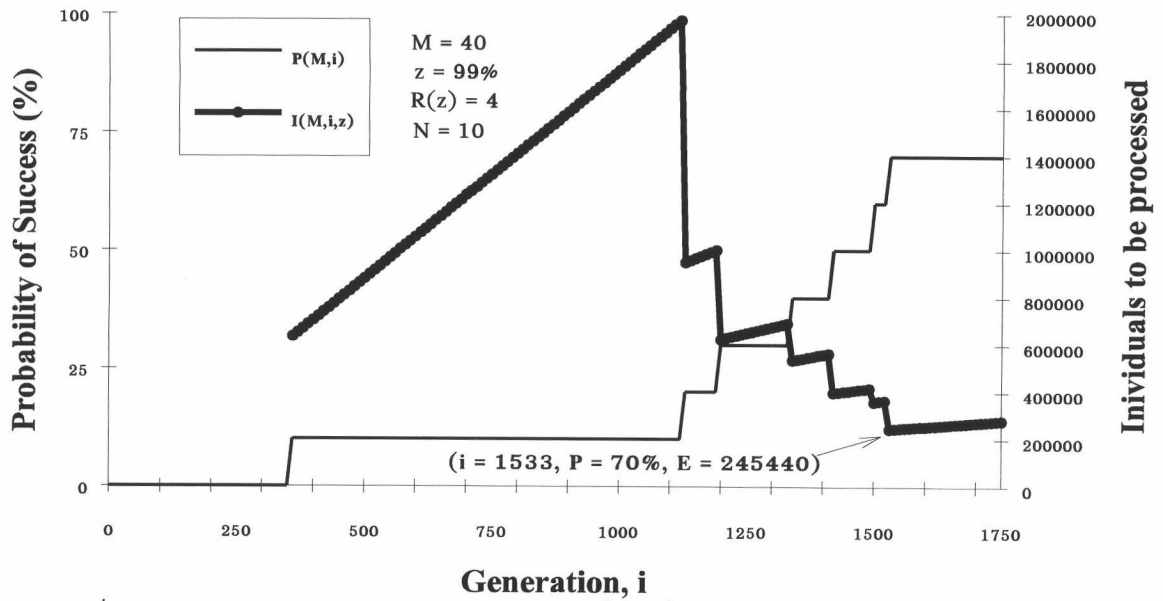
ส่วนโปรแกรมที่ไม่ประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงเป็นเพราะว่า บางโปรแกรมเกิดการวนซ้ำซึ่งเป็นผลมาจากการให้ค่าที่ไม่ถูกต้องของฟังก์ชัน INC? และ DEC? และบางโปรแกรมมีปัญหาในการหมุนของปลายแขนขึ้นมากเกินไปจึงไม่สามารถเข้าหาเป้าหมายได้

8.5.4 การทดลองที่ 16 รูปที่ 8.46 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 16 ซึ่งจากการทดลอง 10 ครั้งที่ใช้ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์ 40 โปรแกรม ภายใต้ค่าความมั่นใจ 99 % โดยจำนวนรุ่นที่มากที่สุดไม่เกิน 250 รุ่น พบว่าต้องใช้เวลาประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์ 2600 โปรแกรม จึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ในรุ่นที่ 4 ซึ่งมีโอกาสสำเร็จเพียง 30 %

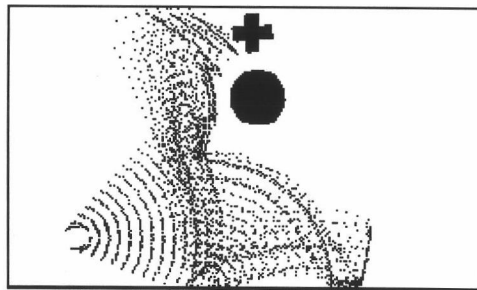
รูปที่ 8.47 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการโปรแกรมพันธุกรรมในการทดลองที่ 16 ซึ่งมีลักษณะของการเคลื่อนที่คือ เริ่มต้นด้วยการหมุนลงของข้อต่อหัวไหล่ ในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนขึ้น และข้อต่อข้อมือจะหมุนลง โดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่นอกขอบเขตจำกัดด้านล่างของการมองเห็นจะบังคับให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมพับแขน เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง จนกระทั่งปลายแขนหุ่นยนต์สามารถมองเห็นเป้าหมาย ข้อต่อหัวไหล่จะหมุนขึ้นในขณะที่ข้อต่อข้อศอกจะหมุนลง และโดยอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่เข้าชนสิ่งกีดขวางของแขนหุ่นยนต์ เพื่อบังคับให้แขนหุ่นยนต์ค่อยๆ เอื้ออ้อมแขนเข้าถึงเป้าหมายได้

รูปที่ 8.48 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง ลำดับของรูปคือจากซ้ายไปขวาและจากแถวบนลงแถวล่าง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกับภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเฉลี่ยแล้ว 83 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทำงานในโลกจริง

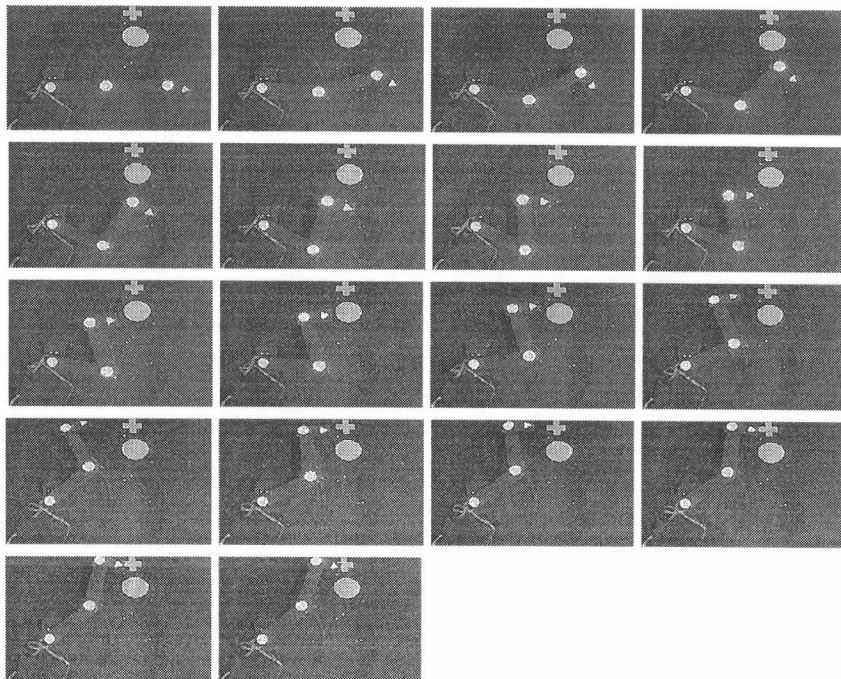
ส่วนโปรแกรมที่ไม่ประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงเป็นเพราะว่า บางโปรแกรมเกิดการวนซ้ำซึ่งเป็นผลมาจากการให้ค่าที่ไม่ถูกต้องของฟังก์ชัน INC? และ DEC? และบางโปรแกรมมีปัญหาในการหมุนของปลายแขนขึ้นมากเกินไปจึงไม่สามารถเข้าหาเป้าหมายได้



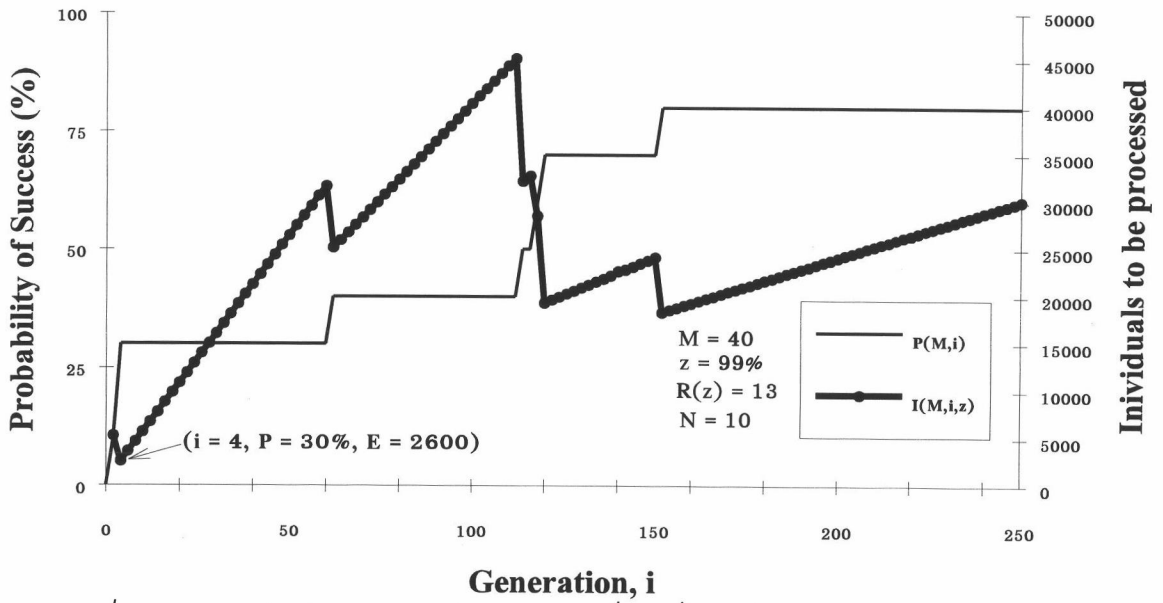
รูปที่ 8.43 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 15 ซึ่งต้องมีการประมวลผล 245440 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในวันที่ 1533 ที่มีโอกาสสำเร็จ 70% , $G = 1750$, $P_{15} = 70\%$, $E_{15} = 245440$



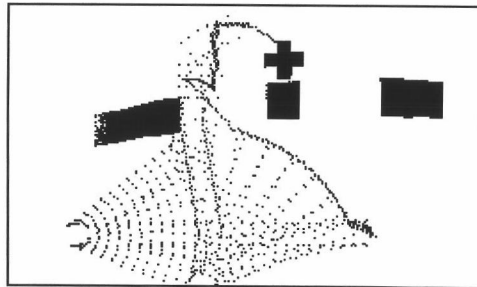
รูปที่ 8.44 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 15



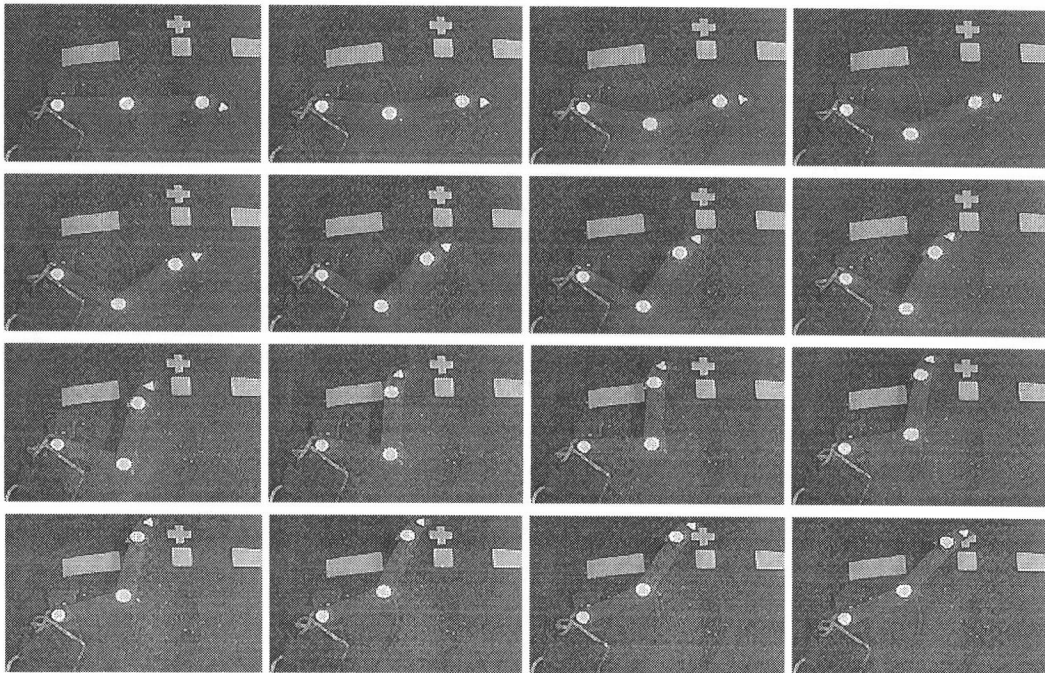
รูปที่ 8.45 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 15



รูปที่ 8.46 แสดงเส้นโค้งสมรรถภาพในการทดลองที่ 16 ซึ่งต้องการประมวลผล 2600 โปรแกรม จึงจะเพียงพอที่จะแก้ปัญหาในรุ่นที่ 4 ที่มีโอกาสสำเร็จ 30% , $G = 250, P_{16} = 30\%, E_{16} = 2600$



รูปที่ 8.47 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ตามโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ใน การทดลองที่ 16



รูปที่ 8.48 แสดงภาพการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริงของการทดลองที่ 16

การทดลองที่	เวลา (วินาที)	จำนวนรุ่นที่ใช้ใน การวิวัฒนาการ	จำนวนครั้งของ การ ล้างพันธุ	ขนาดของ โปรแกรม (ไบต์)	% ของความสำเร็จ การทดลองในโลก จริง
13	18292.9	701.3	12.0	971.0	81.0
14	21643.2	1052	7.2	1080.0	67.0
15	54121.1	2216	19.0	873.0	87.0
16	2431.7	117.9	2.2	347.3	83.0
เฉลี่ยทั้งหมด	24122.2	1021.7	10.1	817.8	79.5

ตารางที่ 8.4 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองของกลุ่มการทดลองที่ 4

8.5.5 ผลการทดลองของกลุ่มที่ 4 ตารางที่ 8.4 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองในแต่ละการทดลองที่ในกลุ่มที่ 4 ซึ่งจากการทดลองทั้ง 4 การทดลองพบว่า เวลาที่ใช้เฉลี่ยแล้วนานถึง 24122.2 วินาที หรือประมาณเกือบ 7 ชั่วโมง จำนวนรุ่นที่ใช้เฉลี่ยแล้วถึงเกือบ 1022 รุ่นของการวิวัฒนาการ มีการใช้การล้างพันธุเฉลี่ยแล้วประมาณ 10 ครั้ง ขนาดของโปรแกรมเฉลี่ยประมาณ 818 ไบต์ และเฉลี่ยแล้ว 79.5 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีในการทดลองในโลกจริง

จากผลการทดลองทั้งหมดของกลุ่มที่ 4 ซึ่งเป็นกลุ่มของสภาพแวดล้อมที่มีลักษณะของปัญหาจุดต่ำสุดเสมือน พบว่า

-จากข้อมูลเส้นโค้งสมรรถภาพของการทดลองที่ 5-8 แสดงให้เห็นว่าการทดลองที่ 15 เป็นปัญหาที่ยากที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะว่ามีลักษณะของปัญหาจุดต่ำสุดเสมือนที่เปิดกว้าง และเป้าหมายอยู่ในมุมที่เข้าถึงได้ลำบากทำให้การเอื้อมแขนทำได้ยากกว่า รองลงมาคือการทดลองที่ 14 เป็นเพราะว่ามีลักษณะของปัญหาจุดต่ำสุดเสมือนที่เปิดกว้างเหมือนกับการทดลองที่ 15 แต่ตำแหน่งเป้าหมายเข้าหาได้ง่ายกว่า ตามด้วยการทดลองที่ 13 ซึ่งมีลักษณะของปัญหาจุดต่ำสุดเสมือนที่จำกัด และการทดลองที่ 16 เป็นปัญหาได้ง่ายที่สุด เป็นเพราะว่ามีสิ่งกีดขวางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าด้านซ้ายช่วยบังคับการเอื้อมแขนทำให้เข้าหาเป้าหมายได้ง่าย และมีจุดต่ำสุดเสมือนที่จำกัด

-ขนาดของโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเฉลี่ยในแต่ละการทดลองไม่แน่นอน แต่พบว่าขนาดของโปรแกรมเฉลี่ยทั้งหมดในกลุ่มนี้มีขนาดมากกว่ากลุ่มอื่นๆซึ่งเป็นปัญหาที่ง่ายกว่า กล่าวได้ว่าในปัญหาที่ยากกว่าจะมีขนาดโปรแกรมที่ใหญ่กว่าด้วย

-จำนวนของการล้างพันธุจะเป็นเครื่องบอกถึงความซับซ้อนของปัญหาที่มีต่อการแก้ปัญหาด้วยกระบวนการโปรแกรมพันธุการ ในกลุ่มนี้มีการใช้การล้างพันธุในการ

วิวัฒนาการอยู่บ้างเฉลี่ยทั้งหมดแล้วถึง 10 ครั้งต่อการทดลอง ซึ่งมากกว่าการทดลองกลุ่มอื่นๆทั้งหมด แสดงให้เห็นถึงความความซับซ้อนของปัญหาอย่างมากในสภาพสิ่งแวดล้อมที่มีลักษณะของปัญหาจุดต่ำสุดเสมือน

-โปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงได้ดีพอสมควร สาเหตุที่ไม่ประสบความสำเร็จมีหลายอย่างคือ มีปัญหาในการขยับไปมาของปลายแขนหุ่นยนต์ที่ไม่ถูกต้องทำให้การตรวจสอบค่าจากฟังก์ชัน INC? และ DEC? ซึ่งจะให้ค่าที่ไม่ถูกต้องตามไปด้วย ปัญหาในการหมุนของปลายแขนที่ไม่พอดี

-มีโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บางตัวมีการใช้ข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของการมองเห็นทั้งด้านล่างและด้านบน ช่วยบังคับให้เกิดพฤติกรรมพิบขานและกางของแขนหุ่นยนต์

-ในการทดลองที่ 16 โปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้บางตัวอาศัยข้อจำกัดของการเคลื่อนที่เข้าชนสิ่งกีดขวางของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งจะบังคับให้ปลายแขนเข้าหาเป้าหมายได้

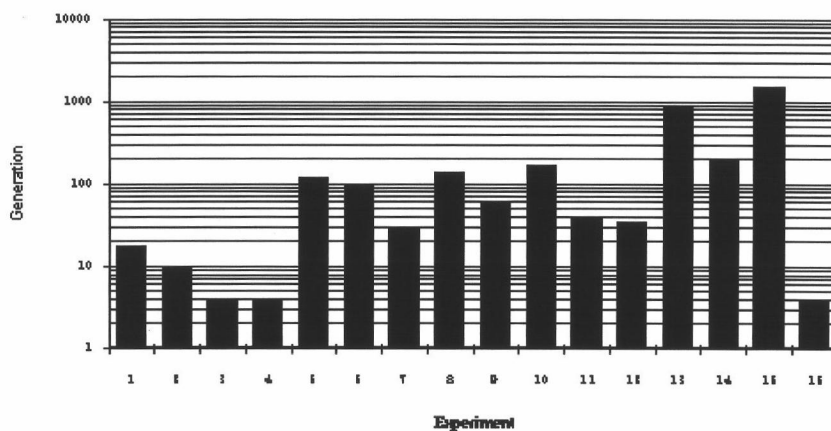
-จะเห็นว่าการทดลองในกลุ่มที่ 4 มีวิธีการแก้ปัญหาที่คล้ายกับการทดลองในกลุ่มที่ 2 แต่ใช้เวลานานกว่าและจำนวนรุ่นที่ใช้มากกว่ามากเพราะมีลักษณะของปัญหาจุดต่ำสุดเสมือน

-จากการเก็บข้อมูลในแต่ละการทดลองเพื่อหาว่า ตัวดำเนินการใดบ้างของการโปรแกรมพันธุการที่ใช้ในการสังเคราะห์โปรแกรมหุ่นยนต์ ที่มีผลต่อการค้นหาโปรแกรมตัวแรกที่ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหาได้ในแต่ละครั้งของการทดลอง ในการทดลองกลุ่มนี้จากการทดลองทั้งหมด 40 การทดลอง พบว่า 65 % ของโปรแกรมตัวแรกที่ประสบความสำเร็จทั้งหมด เกิดจากตัวดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อยอด 15 % เกิดจากตัวดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อปลาย และ 20 % เกิดจากตัวดำเนินการผสมพันธุ์

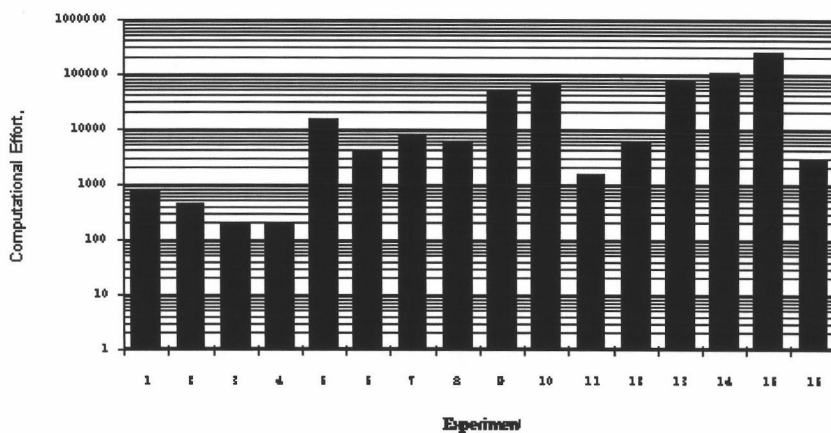
8.6 สรุปผลการทดลองทั้งหมด

การทดลองทั้ง 4 กลุ่มสามารถสรุปได้เป็นข้อๆดังต่อไปนี้

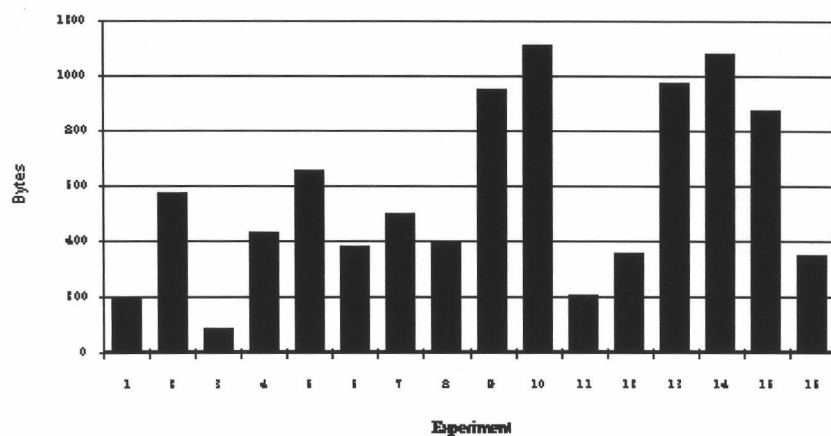
1) จากรูปที่ 8.49 กราฟแสดงจำนวนรุ่นที่ดีที่สุดที่ประสบความสำเร็จเป็นที่น่าสนใจในการแก้ปัญหาของแต่ละการทดลองด้วยความมั่นใจ 99% ซึ่งพบว่า การทดลองที่ 15 มีจำนวนรุ่นที่มากที่สุด ส่วนการทดลองที่ 3, 4 และ 16 มีจำนวนรุ่นที่น้อยที่สุด แต่การทดลองที่ 16 มีโอกาสสำเร็จเพียง 30 % และรูปที่ 8.50 กราฟแสดงค่าความพยายามในการคำนวณในแต่ละ



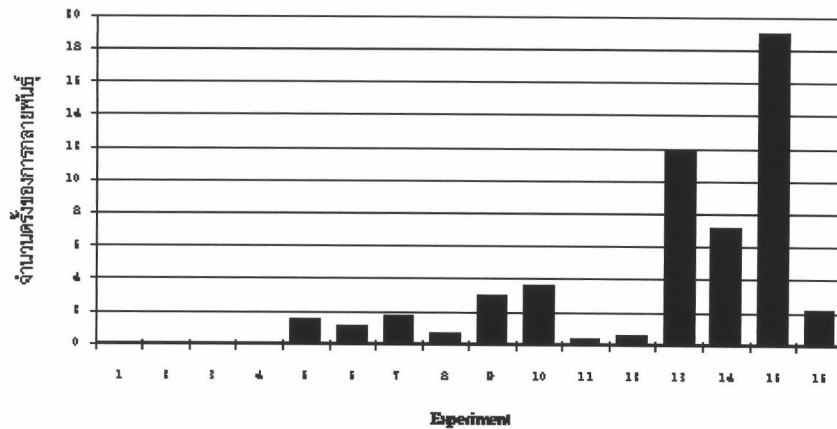
รูปที่ 8.49 กราฟแสดงจำนวนรุ่นที่ดีที่สุดในแต่ละการทดลอง



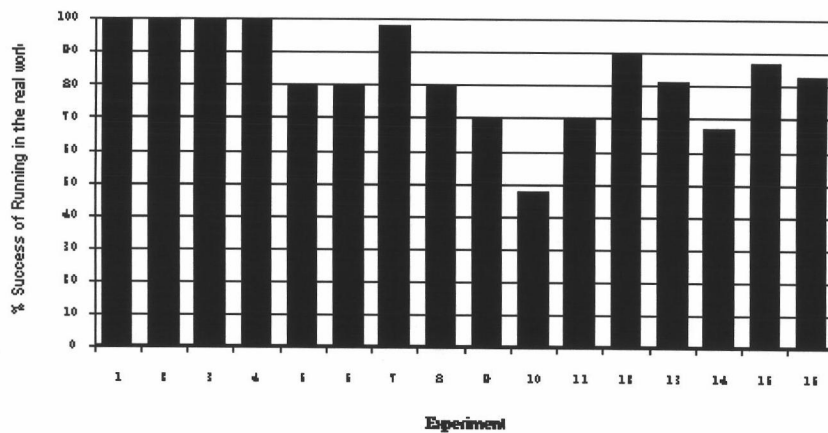
รูปที่ 8.50 กราฟแสดงค่าความพยายามในการคำนวณในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 8.51 กราฟแสดงขนาดของโปรแกรมเฉลี่ยที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 8.52 กราฟแสดงจำนวนครั้งของการล้างพันธุในแต่ละการทดลอง



รูปที่ 8.53 กราฟแสดงร้อยละของความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงในแต่ละการทดลอง

การทดลอง ซึ่งจะเห็นว่า กลุ่มการทดลองที่ 4 มีความยากในการแก้ปัญหามากที่สุด รองลงมาคือ การทดลองกลุ่มที่ 3 การทดลองกลุ่มที่ 2 และการทดลองกลุ่มที่ 1 ตามลำดับ โดยการทดลองที่ 15 เป็นปัญหาที่ต้องใช้การประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์จำนวนมากที่สุดจึงจะเพียงพอต่อการค้นหา โปรแกรมหุ่นยนต์ที่สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้ และการทดลองที่ 3 และ 4 เป็นปัญหาที่ต้องใช้ การประมวลผลโปรแกรมหุ่นยนต์จำนวนน้อยที่สุดจึงจะเพียงพอต่อการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ สามารถแก้ปัญหาที่กำหนดได้

2)ขนาดของโปรแกรมที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละกลุ่มการทดลองมีขนาดเฉลี่ย ไม่แน่นอนไม่ขึ้นกับจำนวนรุ่นที่ใช้ในการวิวัฒนาการ แต่พบว่าขนาดของโปรแกรมเฉลี่ยทั้งหมดมี ขนาดเพิ่มขึ้นตามลำดับตั้งแต่กลุ่มที่ 1 - 4 กล่าวได้ว่าในปัญหาที่ยากจะมีขนาดโปรแกรมที่มีขนาด

ใหญ่ด้วย ดังรูปที่ 8.51 จะเห็นว่า การทดลองในกลุ่มที่ 4 มีขนาดของโปรแกรมเฉลี่ยสูงกว่าการทดลองอื่นๆ และการทดลองในกลุ่มที่ 4 มีขนาดของโปรแกรมเฉลี่ยน้อยที่สุด

3) การล้างพันธุ์ในการวิวัฒนาการเฉลี่ยทั้งหมดแล้วมีการใช้ประมาณ 3.3 ครั้งต่อการทดลอง ซึ่งกลุ่มการทดลองที่ 1 แทบจะไม่มีการใช้เลย และมีการใช้เพิ่มขึ้นตามลำดับในกลุ่มการทดลองที่ 1 จนถึงกลุ่มการทดลองที่ 4 ที่มีการใช้การล้างพันธุ์มากที่สุด โดยมีการทดลองที่ 15 ที่มีการใช้เฉลี่ยแล้วสูงที่สุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากปัญหาจุดต่ำสุดเสมือน แสดงให้เห็นความซับซ้อนของปัญหาในสภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์ที่มีต่อการแก้ปัญหาด้วยกระบวนการโปรแกรมพันธุการ ดังแสดงในรูปที่ 8.52

4) จากการทดลองพบว่า 83.4 % ของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดสามารถประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงได้ จากรูปที่ 8.53 แสดงให้เห็นว่ากลุ่มการทดลองที่ 1 สามารถประสบผลสำเร็จในการทดลองในโลกจริงได้ทั้งหมด การทดลองที่ 10 ประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงได้น้อยที่สุดแค่ 48 %

นอกจากนี้ยังพบว่า มีถึง 19 การทดลองที่ไม่สามารถประสบความสำเร็จในการทดลองในโลกจริงได้เลย โดยมีปัญหาที่ทำให้ไม่สามารถประสบความสำเร็จหลายอย่าง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้คือ

- ปัญหาของการหมุนของส่วนปลายแขนที่ไม่พอดี โดยถ้าหมุนขึ้นมากเกินไปจะไม่สามารถเข้าหาเป้าหมายได้ และถ้าหมุนลงมากเกินไปจะมีปัญหาในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

- ปัญหาในการขยับไปมาของปลายแขนหุ่นยนต์ที่ไม่ถูกต้องทำให้การตรวจสอบค่าจากฟังก์ชัน INC? และ DEC? ซึ่งจะให้ค่าที่ไม่ถูกต้องตามไปด้วย ซึ่งทำให้โปรแกรมหุ่นยนต์ที่ใช้ฟังก์ชันดังกล่าวในการแก้ปัญหาไม่สามารถแก้ปัญหาได้เหมือนที่ได้จำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์

- ปัญหาในเรื่องความยาวของแขนส่วนล่างและแขนส่วนบนที่ไม่เท่ากันในการจำลองการทำงาน(ในโลกจริงความยาวของแขนส่วนบนและส่วนล่างจะเท่ากัน) ซึ่งพบว่าแขนส่วนล่างมีความยาวน้อยกว่าแขนส่วนบน ทั้งนี้เป็นผลมาจากการคำนวณความยาวของแขนทั้งสองจากสัญญาณภาพวิดีโอ ซึ่งบริเวณขอบของภาพจะถูกบีบอัดมากกว่าบริเวณกลางภาพ ทำให้ส่วนของแขนส่วนบนซึ่งอยู่ใกล้ขอบภาพมากกว่าสั้นลง จะมีปัญหาเมื่อในการจำลองการทำงานไม่มีการชนกับสิ่งกีดขวาง โดยทำให้โปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้นั้นไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้เมื่อเกิดการชนกับสิ่งกีดขวางในการทดลองในโลกจริง ยิ่งไปกว่านั้นพบว่า มีบางโปรแกรมหุ่นยนต์ที่

ไม่มีการชนกับสิ่งกีดขวางในระหว่างการจำลองการทำงาน แต่สามารถแก้ปัญหาเมื่อเกิดการชนในการทดลองในโลกจริงได้

5) มีการใช้ข้อจำกัดของการเคลื่อนออกนอกขอบเขตของการมองเห็นทั้งด้านล่างและด้านบน และข้อจำกัดของการเคลื่อนที่เข้าชนสิ่งกีดขวางของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งจะทำให้แขนหุ่นยนต์เกิดพฤติกรรมต่างๆ เช่น พฤติกรรมพับแขนและกางแขนเพื่อช่วยบังคับให้แขนหุ่นยนต์เข้าหาเป้าหมายได้ และพฤติกรรมการคลำทางเพื่อช่วยในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยเมื่อเกิดการชนจะหมุนข้อต่อหัวไหล่ลงในขณะที่หมุนข้อต่อข้อศอกขึ้นไปด้วย

6) จากการเก็บข้อมูลในแต่ละการทดลองเพื่อหาว่า ตัวดำเนินการใดบ้างของการโปรแกรมพันธุกรรมที่ใช้ในการสังเคราะห์โปรแกรมหุ่นยนต์ ที่มีผลต่อการค้นหาโปรแกรมตัวแรกที่ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหาได้ในแต่ละครั้งของการทดลอง ในการทดลองครั้งนี้ จากการทดลองทั้งหมด 160 การทดลอง พบว่า 42.86 % ของโปรแกรมตัวแรกที่ประสบความสำเร็จทั้งหมด เกิดจากตัวดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อยอด 20.71 % เกิดจากตัวดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อปลาย 18.57 % เกิดจากตัวดำเนินการผสมพันธุ์ และ 17.86 % เกิดจากการสุ่มสร้างในครั้งแรก

ทั้งนี้เป็นเพราะว่าตัวดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อยอดเป็นการสังเคราะห์โปรแกรมใหม่ขึ้นมาโดยมีโปรแกรมที่มีอยู่เดิมเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม ทำให้มีโอกาสมากที่จะสังเคราะห์รูปแบบใหม่ๆ ของโปรแกรมขึ้นมา ในขณะที่ตัวดำเนินการกลายพันธุ์แบบต่อปลายเป็นสังเคราะห์โปรแกรมใหม่เพื่อมาเป็นส่วนขยายของโปรแกรมที่มีอยู่เดิม ซึ่งจะยังคงมีรูปแบบของโปรแกรมเดิมหลงเหลืออยู่มาก และตัวดำเนินการผสมพันธุ์เป็นการแลกเปลี่ยนส่วนของโปรแกรมซึ่งกันและกัน ทำให้โอกาสที่จะเกิดรูปแบบโปรแกรมใหม่ๆ ขึ้นมามีไม่มากนัก ส่วนการสุ่มสร้างในครั้งแรกนั้นใช้ได้กับปัญหาต่างๆ มากๆ เท่านั้น ดังเช่นการทดลองในกลุ่มที่ 1 ซึ่งเป็นปัญหาที่สภาพแวดล้อมไม่มีสิ่งกีดขวาง ซึ่งฟังก์ชัน SEE? จะเป็นจริงเสมอ และ ฟังก์ชัน HIT? จะมีค่าเป็นเท็จเสมอ ทำให้โปรแกรมไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงนัก ทำแขนหุ่นยนต์อาจใช้เพียงการเคลื่อนที่ง่ายๆ เพียงรูปแบบเดียวเท่านั้นในการแก้ปัญหา พบว่า มีการทดลองที่ประสบความสำเร็จด้วยการสุ่มสร้างในครั้งแรกถึง 25 การทดลอง

7) ลักษณะของสภาพแวดล้อมของแขนหุ่นยนต์ที่มีผลต่อความยากง่ายในการแก้ปัญหา มีดังนี้คือ มีสิ่งกีดขวางหรือไม่, ตำแหน่งของสิ่งกีดขวางอยู่ใกล้แขนหุ่นยนต์มากน้อยเพียงใด, จำนวนของสิ่งกีดขวาง, มีลักษณะของปัญหาจุดต่ำสุดเสมอหรือไม่, และการวางตำแหน่งของสิ่งกีดขวางและเป้าหมายในสภาพแวดล้อม