

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวิธีการคำตอบเชิงพันธุกรรมกับการหาค่า
เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง
A comparison of the efficiency between Genetic Algorithms and
Particle Swarm Optimization Algorithm for Solving VRP

จตุรวิทย์ ศศิธรานนท์¹ ปรียาณัฐ เอื้อยศิริเมธี¹ นันทิ สุทธิการณณัย²

บทคัดย่อ

การจัดเส้นทางขนส่ง (Vehicle Routing Problem: VRP) จัดเป็นวิธีการหนึ่งในการพัฒนาและแก้ปัญหาการขนส่งให้แก่ภาคธุรกิจ ที่มุ่งหวังให้เพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งพร้อมทั้งก่อให้เกิดต้นทุนในการขนส่งสินค้าต่ำที่สุด วิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับในหลายวงการว่าสามารถนำมาใช้หาค่าตอบของปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในระยะเวลาอันสั้น ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำวิธีการทั้งสองมาจัดเส้นทางขนส่งของกรณีศึกษา จากผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งสองวิธีพบว่า ทั้งสองวิธีก่อให้เกิดระยะทางรวมในการขนส่งในทุกเส้นทางเท่ากับ 168 กิโลเมตร แต่วิธีการแบบกลุ่มอนุภาคสามารถคำนวณหาค่าตอบได้ในเวลา 89.4 วินาที ในขณะที่วิธีการหาค่าคำตอบด้วยวิธีการคำตอบเชิงพันธุกรรมสามารถคำนวณหาค่าตอบได้ในเวลา 123.7 วินาที

คำสำคัญ: การขนส่งสินค้า, วิธีทางพันธุกรรม, การหาค่าคำตอบที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค, การจัดเส้นทางรถ

Abstract

Vehicle Routing Problem (VRP) is one the famous transportation improvement method, due to it can increase the transportation efficiency while keep the cost down. Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization are methods which are accepted in several industrial and education filed because both methods can solve a complex method within a small amount of time. This research aims to adopt both method to

¹ อาจารย์ประจำ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ วิทยาลัยนครราชสีมา E-Mail: eapsirimetee@gmail.com

² อาจารย์ประจำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

solve the Vehicle Routing Problem of the case study. Both method returns the same value of the total transportation distance of all routes at 168 kilometers. Particle Swarm Optimization use 89.4 seconds to solve the problem, while Genetic Algorithm returns the answer within 123.7 seconds.

Keywords: Transportation, Genetic Algorithms, Particle Swarm Optimization, Vehicle Routing Problem

บทนำ

โดยทั่วไประบบการขนส่งจะถูกจัดการหรือกำหนดให้อยู่ภายใต้กระบวนการหรือตารางเวลาที่กำหนดขึ้น ดังนั้นในการวิเคราะห์ระบบการขนส่งจะต้องพิจารณาถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบหลัก 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ผู้ต้องการเดินทางหรือสินค้าที่จะถูกขนส่ง ยานพาหนะที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายคนหรือสินค้า และโครงสร้างพื้นฐานที่ใช้ในการขนส่ง (เกษม ชูจารุกุล, 2555) ปัญหาการจัดเส้นทางรถ (Vehicle Routing Problem) เป็นการออกแบบเส้นทางรถในแต่ละคัน ให้มีความเหมาะสมที่สุดในเรื่องของค่าใช้จ่ายและ ข้อจำกัดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องด้วย โดยรู้ปริมาณสินค้าและตำแหน่งของลูกค้าในแต่ละราย ข้อจำกัดว่าปริมาณสินค้าที่จัดส่งหรือไปรับต้องไม่เกินความสามารถในการบรรทุกสูงสุดของรถขนส่งนั้นๆ และลูกค้าแต่ละรายจะได้รับหรือจ่ายสินค้าจากการขนส่งสินค้าจากคันเดียวหรือหลายคันก็ได้ รวมไปถึงเวลาในการวิ่งรถในแต่ละคันเพื่อส่งสินค้าให้ลูกค้านั้นมีจำกัดด้วย (นพรุจ สังข์แป้น และ สุรพงษ์ ศิริกุลวัฒนา, 2557) ด้วยเหตุนี้ ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดนั้นจำเป็นต้องทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computation) เป็นวิธีการหนึ่งที่มีความนิยมในศาสตร์ด้านการเรียนรู้ของเครื่องจักร ซึ่งเป็นกระบวนการเรียนรู้โดยจำลองหลักการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต ขั้นตอนวิธีการหนึ่งที่เป็นที่รู้จักและใช้งานอย่างกว้างขวาง ได้แก่ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) (พินิจ อ่อนน้อย, 2557) เป็นวิธีการทางเมตาฮิวริสติกที่ได้จำลองการสืบพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตที่เรียกว่า Genetic Algorithm โดยใช้หลักการในการเลียนแบบการพัฒนาทางวิวัฒนาการ มาเป็นวิธีการในการคัดเลือกคำตอบที่ดี และมีการพัฒนาจากรุ่นสู่รุ่นเพื่อที่จะให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด โดยลักษณะของรุ่นพ่อแม่จะถูกถ่ายทอดไปยังรุ่นลูกโดยใช้รูปแบบของโครโมโซม (Chromosome) และในโครโมโซมจะประกอบไปด้วยยีนส์ (Gene) ซึ่งจะบ่งบอกถึงลักษณะของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ เช่น สีผิว สีผม เป็นต้น และจากวิธีการ Evolutionary Algorithm สิ่งมีชีวิตที่แข็งแรงหรือสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้จะมีโอกาสที่จะสืบสายพันธุ์ต่อไป (Holland, 1975 อ้างถึงใน นพรุจ สังข์แป้น และ สุรพงษ์ ศิริกุลวัฒนา, 2557) โดยการงานจะใช้หลักการสุ่มสร้างคำตอบในรูปของสายอักขระที่มีความยาวจำกัด (Fixed-Length String)

ขึ้นมาจำนวนหนึ่งเพื่อใช้เป็นประชากรเริ่มต้น (Initial Population) จากนั้นจะทำการวิวัฒนาการคำตอบโดยใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic Operator) ได้แก่ การสืบพันธุ์ (Reproduction) การไขว้เปลี่ยน (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) จนได้คำตอบที่ต้องการ

ส่วนวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) หรือที่ย่อว่า PSO เป็นวิธีการหาคำตอบแบบสุ่ม (Random Search Algorithm) ประเภทหนึ่ง เช่นวิธีการคำตอบเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) โดยโปรแกรมที่สร้างขึ้นนั้นมีพื้นฐานในการปรับปรุงชุดคำตอบจากหลักการทางจิตวิทยาต่างๆที่เป็นความจริงพื้นฐานนำมาใส่ไว้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์หลักจิตวิทยา ดังเช่น พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์, (2557) อธิบายว่ากลุ่มคนกลุ่มหนึ่งซึ่งมีสมาชิกหลากหลายคนและแต่ละคนมีหน้าที่ค้นหาดอกกล้วยไม้ หายากราคาแพง กลุ่มคนกลุ่มนี้ แยกย้ายกันหาดอกกล้วยไม้ตามจังหวัดต่างๆของประเทศไทย แต่ละคนมีโทรศัพท์มือถือที่สามารถติดต่อกันได้เมื่อใดที่สมาชิกคนใดคนหนึ่งค้นพบดอกกล้วยไม้ที่ดีกว่าที่สมาชิกในกลุ่มเคยพบมาจะทำการแจ้งข่าวแก่สมาชิกคนอื่นๆ เพื่อบอกให้สมาชิกคนอื่นมาช่วยตนเองหาดอกกล้วยไม้ในบริเวณละแวกที่ตนพบดอกกล้วยไม้นั้นแต่ในระหว่างที่เพื่อนกำลังเดินทางไปยังบริเวณที่แจ้งเพื่อช่วยกันหาบังเอิญพบว่ามีดอกกล้วยไม้ที่มีค่ามากกว่าสมาชิกคนนั้นก็ทำการแจ้งสมาชิกคนอื่นๆ ว่าพบดอกกล้วยไม้ที่ดีกว่าให้เปลี่ยนบริเวณรวมพลมาที่บริเวณใหม่ที่ตนเพิ่งพบดอกไม้ที่แพงกว่าแทนเป็นที่แน่นอน ว่าถ้าเราเป็นสมาชิกในกลุ่มที่ทำภารกิจค้นหาสมบัติเช่นนี้หรือเรากำลังเล่นเกมซ่อนแอบที่มีผู้หาหลายคน ทำงานเป็นทีมแล้วมันก็เป็นการเล่นสมมติผลที่จะใช้วิธีการค้นหาคล้ายๆกับการค้นหาในแบบ PSO ดังนั้น ด้วยแนวคิดดังกล่าว PSO จึงกลายมาเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพระดับต้นๆ ซึ่งในโลกยุคปัจจุบันที่มีงานวิจัยทางวิศวกรรมมากมายที่ประยุกต์ใช้วิธีการ PSO ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

วิธีการคำตอบเชิงพันธุกรรมกับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการหาค่าความเหมาะสมทั้งสองอัลกอริทึมเป็นอัลกอริทึมที่เลียนแบบมาจากพฤติกรรมกรหาอาหารของฝูงสัตว์ บทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคของวิธีการคำตอบเชิงพันธุกรรมกับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคและนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาค่าที่ดีที่สุด

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเทคนิคการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่งระหว่างวิธีการคำตอบเชิงพันธุกรรมกับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยดำเนินการวิจัยด้วยวิธีการทดลองอาศัยทฤษฎีอัลกอริทึมทางพันธุศาสตร์ (Genetic Algorithms; GAs) เปรียบเทียบกับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่ม

อนุภาค (Particle Swarm Optimization) สำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางของการขนส่งสินค้าในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยแนวคิดของ GAs เป็นการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยข้อมูลถูกพิจารณาในรูปแบบของโครโมโซมที่มีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากบรรพบุรุษไปสู่รุ่นลูกหลานโดยใช้ค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness function) ที่สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) จากขั้นตอนเหล่านี้ทำให้สามารถหาคำตอบที่มีค่าสูงสุด (หรือต่ำสุด) สมบูรณ์ได้ และจากการหาคำตอบโดยใช้โครโมโซมในแต่ละรุ่น (Generations) ซึ่งมีการสุ่มคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหา (Candidate Solution) ส่วนวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization ; PSO) เป็นวิธีการหาคำตอบแบบสุ่ม (Random Search Algorithm) เช่นเดียวกับวิธีการคำตอบเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) จากโปรแกรมที่สร้างขึ้นนั้นมีพื้นฐานในการปรับปรุงชุดคำตอบจากหลักการทางจิตวิทยาที่เป็นความจริงพื้นฐานนำมาใส่ไว้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

หลักการที่เกี่ยวข้องกับวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาการขนส่ง โดยการประยุกต์ใช้วิธีการคำตอบเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) กับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization Algorithm; PSO)

1. วิธีการอัลกอริทึมทางพันธุศาสตร์ (Genetic Algorithm)

Genetic Algorithm เป็นวิธีการหาคำตอบของปัญหาที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนเนื่องจากคุณสมบัติการเลียนแบบการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมตามธรรมชาติโดยปกติจะนำค่าที่เหมาะสมที่สุดจากประชากรรุ่นก่อนมาใช้พิจารณาในการหาคำตอบของประชากรรุ่นถัดมา ซึ่งมีการใช้ตัวดำเนินการ (Operator) คือ Selection, Crossover และ Mutation เป็นตัวสุ่มในการหาคำตอบในบริเวณของปัญหา เป็นการช่วยให้มีความหลากหลายในการหาคำตอบในทุกบริเวณของปัญหา ซึ่งองค์ประกอบของ Genetic Algorithm มีองค์ประกอบที่สำคัญ 5 ส่วนด้วยกัน ดังนี้

- 1) Chromosome Encoding หรือรูปแบบโครโมโซมที่ได้จากปัญหา
- 2) Initial Population คือ ประชากรต้นกำเนิดที่จะนำเข้ากระบวนการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม
- 3) Fitness Function ฟังก์ชันสำหรับประเมินค่าความเหมาะสม เพื่อกำหนดคะแนนให้แต่ละทางเลือกของคำตอบ
- 4) Genetic Operator ซึ่งใช้ในการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของข้อมูลตลอดกระบวนการ ได้แก่ Selection, Crossover และ Mutation
- 5) Parameter ที่สำคัญสำหรับ Genetic Algorithm เช่น ขนาดของประชากรความน่าจะเป็นของการ crossover ความน่าจะเป็นของการ mutation และจำนวนโครโมโซมที่ใช้ในการสร้างรุ่นถัดไป เป็นต้น

1.1 รูปแบบโครโมโซม (Chromosome Encoding) การถอดรหัสหรือการได้มาซึ่งโครโมโซมคือ ปัญหาแรกที่เริ่มแก้ปัญหาโดยใช้ Genetic Algorithm ในการถอดรหัสนั้นจะขึ้นอยู่กับปัญหาและในปัจจุบันปัญหามีมากมายหลายรูปแบบจึงทำให้รูปแบบของโครโมโซมมีซับซ้อนความแตกต่างกันออกไปตามปัญหาที่นั้นๆ เช่น

1) Binary Encoding ทุกตำแหน่งของยีนของโครโมโซมจะมีค่าเป็นบิต 0 หรือ 1 ตัวอย่างเช่น โครโมโซม A : 00110010001110

2) Value Encoding หรือเรียกว่า Direct Encoding ทุกตำแหน่งของยีนของโครโมโซมจะมีค่าบางค่าซึ่งสามารถเชื่อมโยงไปยังปัญหาได้ เช่น ตัวอักษร จำนวนจริง คำสั่ง ตัวอย่างเช่น

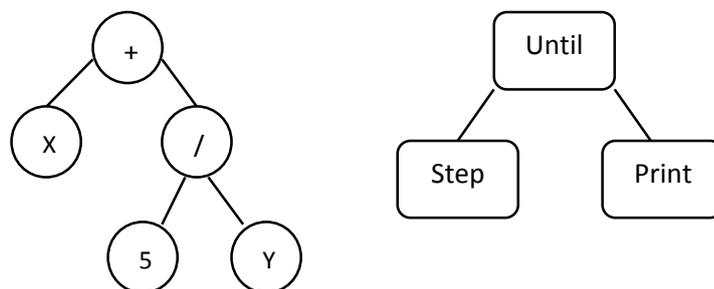
2.1) โครโมโซม A : 1.23 2.32 4.03 9.99 3.21

2.2) โครโมโซม C : back, right, left, back, left, right, back, back

Permutation

3) Encoding ทุกตำแหน่งของยีนบนโครโมโซมจะเป็นค่าของจำนวนนับที่แทนตำแหน่งต่างๆ ตัวอย่าง เช่น โครโมโซม B : 9 5 2 1 4 6 7 8 3

4) Tree Encoding ทุกตำแหน่งของยีนจะเป็น node ของต้นไม้ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงการถอดรหัสแบบ Tree Encoding

1.2 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรม

1.2.1 ประชากรต้นกำเนิด (Initial Population) เป็นขั้นตอนแรกก่อนที่จะเข้ากระบวนการ Genetic Operations โดยทำการสุ่มโครโมโซมเริ่มต้นจำนวนเท่ากับขนาดของรุ่น (Population size หรือ Generation) ที่ได้กำหนดไว้ และไม่สนใจค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม

1.2.2 ค่าความเหมาะสม (Fitness Function) โครโมโซมทุกตัวจะต้องมีค่าที่บ่งบอกถึงความเหมาะสมของตัวเอง เพื่อนำไปพิจารณาว่าสมควรนำไปสืบสายพันธุ์ต่อหรือไม่สมควร ดังนั้นจึงต้องมีกำหนดค่าความเหมาะสมกับแต่ละค่า โดยใช้สมการหาค่าความเหมาะสมที่สอดคล้องกับปัญหา

สรุปได้ว่าค่าความเหมาะสม คือตัวที่ใช้ประเมินว่าแต่ละเส้นทางเลือกนั้นมีความเหมาะสม หรือสามารถใช้แก้ปัญหาได้ดีเพียงใด ตัวอย่างของฟังก์ชันหาค่าความเหมาะสม เช่น

กำหนดให้ค่าความเหมาะสม = จำนวนของบิต 1 ทั้งหมดในโครโมโซม

โครโมโซม A : 100011100 * โครโมโซม A มีค่าความเหมาะสมเท่ากับ 4

โครโมโซม B : 110111001 * โครโมโซม B มีค่าความเหมาะสมเท่ากับ 6

1.2.3 การดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic Operator) วิธีการดำเนินการทางพันธุกรรม หรือ Genetic Operator เป็นหัวใจสำคัญของ อัลกอริทึมทางพันธุศาสตร์ หรือ Genetic Algorithm ซึ่งมีกระบวนการพื้นฐานที่สำคัญ 3 ส่วนดังนี้

1) การคัดเลือก (Selection) ในการคัดเลือกโครโมโซม เพื่อให้เกิดการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตนั้น ตามทฤษฎีของ Charles Darwin โดยคัดเลือกมาเป็นโครโมโซมพ่อ และโครโมโซมแม่ หรือที่เรียกว่า Parent ในการสืบสายพันธุ์ ทำให้เกิดปัญหาว่าจะอย่างไรให้เกิดจากการคัดเลือกโครโมโซมที่น่าพอใจ จึงทำให้เกิดรูปแบบการคัดเลือกโครโมโซมมากมาย เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจที่สุดในการนำไปสืบสายพันธุ์ เช่น การคัดเลือกแบบ roulette wheel การคัดเลือกแบบ ranking การคัดเลือกแบบ tournament การคัดเลือกแบบ elitist การคัดเลือกแบบ steady-state และอื่นๆ อีกมากมายหลายวิธีเพื่อให้ได้มาซึ่งวิธีการคัดเลือกโครโมโซมที่ดี

2) การข้ามสายพันธุ์ หรือ Crossover ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญของ Genetic Algorithm ซึ่งเมื่อเกิดการข้ามสายพันธุ์ขึ้นในทางพันธุศาสตร์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนของสิ่งมีชีวิตที่หลากหลายซึ่งการข้ามสายพันธุ์ อาศัยกระบวนการวิวัฒนาการที่เป็นเวลานานแต่ในทำนองเดียวกันในทางการแก้ปัญหากระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดความหลากหลายของคำตอบที่ได้ทำให้เราได้รับคำตอบที่หลากหลายจึงสามารถเลือกเอาคำตอบที่เหมาะสมกับความต้องการได้มากที่สุด ขั้นตอนในการการข้ามสายพันธุ์ คือ นำ 2 โครโมโซม (Parent) มาผสมกันเพื่อให้ได้โครโมโซมใหม่ขึ้นมา จากนั้นใช้วิธีการที่ง่ายที่สุด คือ สุ่มตำแหน่งการข้ามสายพันธุ์และทำการคัดลอกทุกอย่างที่อยู่หน้าตำแหน่งการข้ามสายพันธุ์ ของพ่อและคัดลอกทุกอย่างหลังตำแหน่งการข้ามสายพันธุ์ ของแม่รวมกันจะได้ลูกตัวที่ 1 ออกมา จากนั้นทำการคัดลอกทุกอย่างที่อยู่หน้าตำแหน่งการข้ามสายพันธุ์ ของแม่ และคัดลอกทุกอย่างหลังตำแหน่งการข้ามสายพันธุ์ ของพ่อรวมกันจะได้ลูกตัวที่ 2 ออกมา

ลักษณะของการข้ามสายพันธุ์ มี 2 ลักษณะ คือ การข้ามสายพันธุ์ แบบขวาง (Horizontal) และการข้ามสายพันธุ์ แบบตั้งฉาก (Vertical) ในกระบวนการการข้ามสายพันธุ์แบบขวางจะต้องมีการดำเนินการกับข้อมูลที่เป็นเมตริกซ์ 2 มิติเท่านั้น แต่ในกรณีการข้ามสายพันธุ์แบบตั้งฉากสามารถทำได้กับข้อมูลทุกรูปแบบ

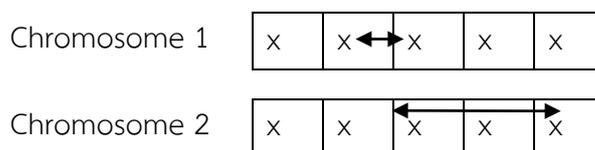
อย่างไรก็ตาม เทคนิคของการข้ามสายพันธุ์ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับรูปแบบโครโมโซมและมีการข้ามสายพันธุ์ กับรูปแบบโครโมโซมในลักษณะต่างๆ เช่น Crossover กับ Binary Encoding ที่มีลักษณะการ การข้ามสายพันธุ์หลายลักษณะดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงลักษณะการ crossover แบบต่างๆ กับ Binary Encoding

ลักษณะการ crossover	พ่อ	แม่	ลูกที่ 1	ลูกที่ 2
Single Point	11 0110010	00 1011111	111011111	000110010
Two Point	11 011001 0	00 101111 1	111011110	000110011
Arithmetic	110110010	001011111	000010010 and	111111111 or

เมื่อ | คือ ตำแหน่ง crossover ที่มีลักษณะการ Crossover หลายแบบ เช่น single point คือ สุ่มตำแหน่ง Crossover เพียง 1 ตำแหน่ง two point คือ สุ่มตำแหน่ง Crossover เพียง 2 ตำแหน่ง arithmetic คือ การใช้ Operator and และ or

3) การผ่าเหล่าหรือการสลับตำแหน่งของยีนภายในโครโมโซมแต่ละตัว (Mutation) ซึ่งแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางพันธุกรรมแบบผ่าเหล่า

ที่มา : ฉกร อินทร์พยุง (2548)

จากภาพที่ 2 ประชากรที่ผลิตออกมา (ซึ่งอาจจะเป็นจำนวนโครโมโซมตัวเดียวหรือหลายๆตัว) เรียกว่า ประชากรรุ่นลูก (Offspring population) ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $C(t)$ และประชากรรุ่นลูกนี้จะถูกประเมินว่าให้ค่าฟิตเนสดีมาน้อยเพียงใด ต่อจากนั้น จะสร้างประชากรรุ่นใหม่ (New generation) ซึ่งประกอบไปด้วยจำนวนโครโมโซมหลายๆอันรวมกัน ในแนวคิดโดยทั่วไปจะเลือกโครโมโซมที่มีค่าฟิตเนสที่ดีว่าโครโมโซมอันอื่นจากกลุ่มของประชากรบรรพบุรุษ (Parent population) และจากกลุ่มของประชากรรุ่นลูก (Offspring population) มาสร้างเป็นประชากรรุ่นใหม่ หลังจากที่วิธีเชิงพันธุกรรมได้ผลิตประชากรรุ่นใหม่ออกมาเป็นจำนวนหลายๆรุ่น เราจะได้ประชากรรุ่นใหม่ที่มีคุณภาพทางพันธุกรรมที่ดี (หรือเราจะได้ Fitness ที่มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด) สังเกตด้วยว่าวิธีการหาคำตอบเชิงพันธุกรรมนี้ บางครั้งอาจจะถูกเรียกว่าวิธีการหาคำตอบโดยใช้กลุ่มของประชากร (Population-based search) ซึ่งแตกต่างไปจากวิธี Simulated Annealing (SA) และวิธีทาบู ซึ่งเป็นการพัฒนาการหาคำตอบจากคำตอบอันหนึ่งไปยังอีกคำตอบหนึ่ง ซึ่งอาจเปรียบเสมือนได้กับพัฒนาการของโครโมโซมเพียงจำนวน 1 ตัว ไปยังโครโมโซมตัวใหม่ที่มีคุณภาพดีกว่า ณ เวลานี้ คงเห็นภาพแล้วว่าวิธีการหาคำตอบเชิงพันธุกรรมนั้นเอื้อประโยชน์ในการนำคอมพิวเตอร์หลายๆเครื่องมาช่วยในการหาคำตอบภายในเวลาเดียวกัน (Parallel computing)

ขั้นตอนทางคอมพิวเตอร์ของวิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรม สามารถเขียนได้ดังนี้

Procedure: Genetic algorithm (GA)

Begin

$t \leftarrow 0$;

initialize $P(t)$;

evaluate $P(t)$;

while not stopping condition **do**

begin

recombine $P(t)$ to yield $C(t)$;

evaluate $C(t)$;

select $P(t+1)$ from $P(t)$ and $C(t)$;

$t + 1 \leftarrow$

end

end

จากขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรมนั้นมียุคประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ

1. การเลือกคำตอบที่มีค่าที่ดีที่สุด (Best solution) เพื่อจะพัฒนาประชากรรุ่นใหม่ที่ดียิ่งขึ้น
2. การสำรวจพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ (Exploration of the search space)

จะเห็นว่าวิธีเชิงพันธุกรรมอาศัยการหาค่าตอบแบบสุ่ม (Random sampling) จากพื้นที่ในการหาค่าตอบ (Search space) และหวังว่าคำตอบหรือโครโมโซมที่เลือกมานั้นจะนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นวิธีเชิงพันธุกรรมจึงมีขั้นตอนวิธีการค้นหาค่าตอบทางคอมพิวเตอร์ (อัลกอริทึม) ที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าตอบของปัญหาการตัดสินใจต่างๆได้ง่าย กลยุทธ์ที่สำคัญในการพัฒนาวิธีเชิงพันธุกรรมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในการที่จะแก้ปัญหาในอุตสาหกรรมที่มีความสลับซับซ้อนมากและขนาดใหญ่ ควรจะต้องคำนึงถึงการผสมผสานระหว่างการสำรวจพื้นที่ในการหาค่าตอบที่ดี และการใช้ประโยชน์ข้อมูลที่สามารถได้จากพื้นที่นั้นๆในการพัฒนาประชากรในรุ่นถัดไป (Next generation)

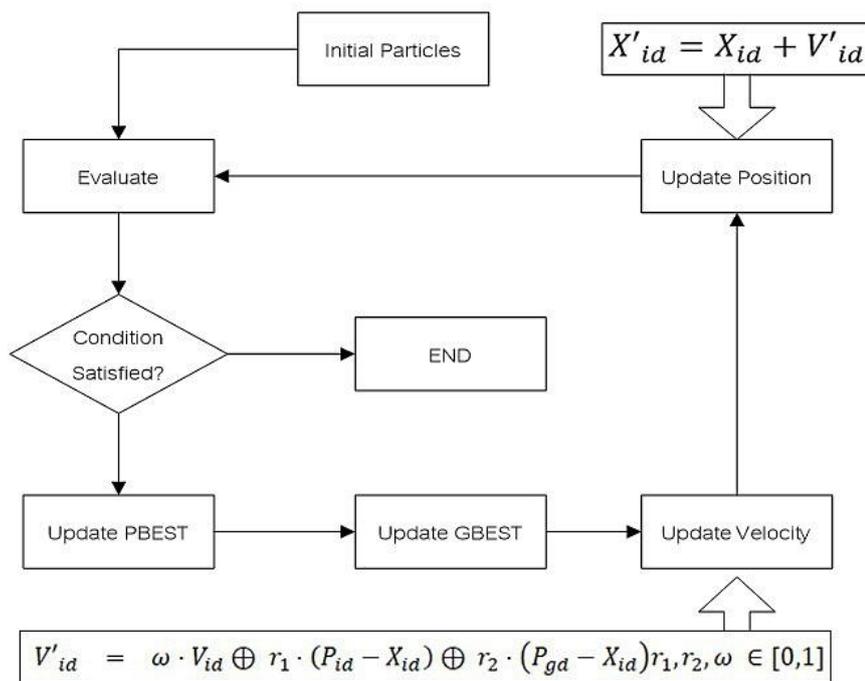
2. วิธีการแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization Algorithm; PSO)

Kennedy และ Eberhart, (1995) และ Kennedy และ Shi Y, (2001) ได้พัฒนาวิธีการ PSO ให้เป็นวิธีการค้นหาค่าตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไข (Unconstrained Optimization Problem) ซึ่งต้องการหาค่าตอบที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) มีค่าที่ดีที่สุดซึ่งอาจหมายถึงค่าที่มากที่สุดหรือน้อยที่สุดตามแต่

วัตถุประสงค์ของปัญหา ตัวอย่างปัญหาการ หาค่าที่ดีที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไขแสดงไว้ในสมการ (1)

$$f(x) = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \quad (1)$$

วิธีการ PSO เริ่มต้นจากการสุ่มกลุ่มของคู่คำตอบกับเวกเตอร์ที่ใช้ปรับปรุงคำตอบนั้น กลุ่มของคู่คำตอบกับเวกเตอร์จะมีจำนวนเท่ากับ K โดย PSO จะเรียกคำตอบว่า ตำแหน่ง (Position) และเรียกเวกเตอร์ที่ใช้ปรับปรุงคำตอบว่าความเร็ว (Velocity) คู่ของตำแหน่งและความเร็วที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งนั้นๆ จะเรียกว่า พาร์ติเคิล (Particle) หรืออนุภาค ซึ่งอนุภาคนี้อาจเปรียบเสมือนสัตว์ปีกหนึ่งตัวนั่นเอง และอาจกล่าวได้ว่าอนุภาคหนึ่งตัวจะทราบถึงตำแหน่งและความเร็วของตัวเอง ดังนั้นกล่าวได้ว่าวิธีการ PSO จะมีจำนวนอนุภาคเท่ากับ K ตัว แต่ละตัวมีตำแหน่งและความเร็วของตัวเอง โดยอนุภาคทุกตัวจะมีหมายเลขกำกับต่อเนื่องกันไปตั้งแต่อนุภาคหมายเลข 1 อนุภาคหมายเลข 2 ไปจนถึง อนุภาคหมายเลข K ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการแบบกลุ่มอนุภาค

จากกระบวนการขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรมกับวิธีการแบบกลุ่มอนุภาคทั้ง 2 วิธีนั้นแต่ละวิธีจะทำการสุ่มเส้นทางที่ใช้ในการเดินทางของรถแต่ละคันและนำระยะทางรวมของเส้นทางทั้งหมดที่ใช้ในการขนส่งสินค้ามาเป็นตัววัดประสิทธิภาพของแต่ละวิธี และเก็บค่าที่ดีที่สุดของแต่ละรอบเอาไว้ และจะทำขั้นตอนต่างๆ วนไปเรื่อยๆ จนกว่าจะถึงค่าที่กำหนด

ตัวอย่างและการแก้ปัญหา

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณความต้องการสินค้าของลูกค้า ระยะทางระหว่างศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้า

	DC	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C13	ปริมาณสินค้า ที่ต้องการ (หน่วย)
	0														0
C01	12	0													45
C02	8	9	0												36
C03	17	8	10	0											43
C04	15	9	8	4	0										92
C05	15	17	9	14	11	0									57
C06	20	23	15	20	16	6	0								16
C07	17	22	13	20	16	5	4	0							56
C08	8	17	9	19	16	11	14	10	0						30
C09	6	18	12	22	20	17	20	16	6	0					57
C10	16	23	14	22	19	9	8	4	8	14	0				47
C11	21	28	18	26	22	11	7	6	13	19	5	0			91
C12	11	22	14	24	21	14	16	12	5	7	9	13	0		55
C13	15	27	20	30	28	22	23	20	12	9	16	20	8	0	38

เพื่อให้เข้าใจกระบวนการวิเคราะห์ผู้วิจัยกรณีศึกษาตามตารางที่ 2 โดยมีรายละเอียด ดังนี้ ลูกค้าทั้งสิ้น 13 ราย (C01 - C13) ลูกค้าแต่ละรายมีปริมาณสินค้าที่ต้องการ และระยะห่างระหว่างศูนย์กระจายสินค้าถึงลูกค้าแต่ละรายด้วยตัวเอง และกำหนดให้รถแต่ละคันสามารถบรรทุกน้ำหนักสูงสุดได้ 200 หน่วย โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลอง ดังนี้

เงื่อนไขในการทดลอง

1. วิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms)

1.1 กำหนดจำนวนโครโมโซม ในแต่ละรุ่นมีจำนวนคงที่ เท่ากับ 60 โครโมโซมโดยแต่ละโครโมโซมจะเป็นค่าการสุ่มเส้นทางของการขนส่งของรถแต่ละคันและเก็บค่าของระยะทางรวมของรถทั้งหมด

1.2 ลูกค้ารายที่ C1 และรายที่ C2 ถูกกำหนดให้เท่ากับ 1 จำนวนอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง คือ 400 อนุภาค แต่ละอนุภาคเป็นค่าการสุ่มเส้นทางของการขนส่งของรถแต่ละคันและเก็บค่าของระยะทางรวมของรถทั้งหมด กำหนดอัตราการผสมพันธุ์ (Crossover Operation) เท่ากับ 90 % หรือ 54 คู่ โครโมโซม

1.3 กำหนดอัตราการกลายพันธุ์ (Mutation Operation) เท่ากับ 1 %

1.4 ใช้จำนวน รุ่น (Generation) เป็นตัวกำหนด การหยุดโปรแกรม และตั้งค่าไว้ 400 รุ่น

2. วิธีการแบบกลุ่มอนุภาค (PSO)

2.1 กำหนดเงื่อนไขการทดลองไว้ดังนี้ $\omega = 0.8$, $R1 = 0.7$, $R2 = 0.7$

2.2 ลูกค้ำรายที่ C1 และรายที่ C2 ถูกกำหนดให้เท่ากับ 1 จำนวนอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง คือ 400 อนุภาค แต่ละอนุภาคจะสุ่มเส้นทางการเดินทางของรถแต่ละคันและเก็บค่าของระยะทางรวม

2.3 รอบในการค้นหาคำตอบ คือ 400 รอบ

3. การประยุกต์พาทิเคิล สวอม ออปติไมเซชัน สำหรับการแก้ปัญหาการขนส่งสินค้า

Kennedy และ Shi Y, (2001) กล่าวว่า จาก PSO ถูกออกแบบมาสำหรับการแก้ปัญหาออปติไมซ์ประเภทต่อเนื่อง (continuous optimization problem) เพื่อให้ PSO สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาออปติไมซ์ประเภทเชิงจัดการ (combinatorial optimization problem) จึงต้องมีการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานก่อนโดยจากงานวิจัยของ L. Huang, K. Wang, c. Zhou, R. Pang, L. Dong and L. Peng, (2003) ได้เสนอ พาทิเคิล สวอม ออปติไมเซชัน สำหรับการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (A Discrete Particle Swarm Optimization for Traveling Salesman Problem, DPSO) โดยแต่ละอนุภาคจะมีรูปแบบของมิติเป็นลำดับของโหนด (Node) เช่น 1, 2, 4, 3 หมายความว่า การเดินทางของพนักงานขาย ต้องเดินทางเริ่มต้นจากโหนดที่ 1 ไป โหนดที่ 2 ไป โหนดที่ 4 ไป โหนดที่ 3 และกลับมาโหนดที่ 1 สำหรับการคำนวณค่าความเหมาะสมของแต่ละอนุภาค จะคำนวณได้จากระยะการเดินทางตามลำดับของโหนดที่ได้ จัดเรียงไว้ในอนุภาคแต่ละตัว ซึ่งจุดประสงค์ของการแก้ปัญหา Travelling Salesman Problem(TSP) คือ ต้องการจัดเรียงให้ค่าความเหมาะสมมีค่าน้อยที่สุดเพื่อให้สามารถปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งของอนุภาค สำหรับปัญหาในรูปแบบ TSP ได้ DPSO จึงต้องแก้ไขสมการปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งของอนุภาค ดังนี้

$$V'_{id} = \omega \cdot V_{id} \oplus r_1 \cdot (P_{id} - X_{id}) \oplus r_2 \cdot (P_{gd} - X_{id}) \quad r_1, r_2, \omega \in [0, 1] \quad (2)$$

$$X'_{id} = X_{id} + V'_{id} \quad (3)$$

โดย

$(P_{id} - X_{id})$ และ $(P_{gd} - X_{id})$ คือ พื้นฐานการสลับที่ของลำดับ

\oplus คือ การบวกการสลับที่ของลำดับ (circle plus)

$\omega \cdot V_{id}$ และ $r_1 \cdot (P_{id} - X_{id})$ และ $r_2 \cdot (P_{gd} - X_{id})$ หมายความว่า การสลับที่ของลำดับใน $V_{id}(P_{id} - X_{id})$ และ $(P_{gd} - X_{id})$ จะยังคงลำดับนั้นเอาไว้ในความน่าจะเป็นของ ω และ r_1 และ r_2 ตามลำดับ

จากสมการที่ 2 ทำการปรับปรุงเนื่องจากค่าของสมการ พาดิเคิล สวอม ออปติไมเซชัน เป็นค่าแบบความเป็นเชิงเส้น แต่ปัญหาของ TSP จะมีค่าการเปลี่ยนตำแหน่งและความเร็วเป็นคู่ลำดับ ซึ่งเมื่อสลับลำดับของ X_{id} ตามลำดับที่อยู่ใน V_{id} จะทำให้ได้รับคำตอบใหม่ในการทดสอบ

Kennedy และ Shi Y, (2001) กล่าวว่า สำหรับวิธีนี้มีการหักล้างการสลับตำแหน่งกัน ซึ่งจะ ไม่สอดคล้องกับหลักการทำงานของ PSO (L. Zhong and H. Lei, 2010) เช่น $(P_{id} - X_{id}) \oplus (P_{gd} - X_{id}) = [(1, 2)] + [(1, 2)] = []$ ซึ่งไม่ตรงตามหลักของ PSO ที่ PBEST และ GBEST ไปใน ทิศทางเดียวกันควรจะมีความเร็วเสริมกัน ผลจากการหักล้างการสลับตำแหน่งกันทำให้ผลลัพธ์การ ค้นหาคำตอบไม่ดีเท่าที่ควร

4. การคำนวณค่าความเหมาะสม (Fitness Value; FV)

การคำนวณได้จากค่าใช้จ่ายรวมในการขนส่งของรถทุกคัน ในที่นี้จะพิจารณาจากเวลาใน การจัดส่งรวมทั้งหมด รายการใดที่มีเวลาในการจัดส่งรวมต่ำที่สุดจะมีค่าความเหมาะสมสูงสุด สำหรับกรณีนี้ ค่าความเหมาะสมจะเป็นผลรวมของระยะเวลาการขนส่งสินค้าไปยังลูกค้าแต่ละราย ของรถแต่ละคัน โดยสามารถสร้างสมการได้ดังนี้

L = ระยะทางระหว่างจุดสองจุดบนระนาบ x, y โดยใช้สูตรต่อไปนี้ ระยะทางจาก (x_1, y_1) ไปยัง (x_2, y_2) คำนวณได้จาก

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \tag{4}$$

ระยะเวลาในการเดินทางระหว่างจุดสองจุดหาได้จาก

$$T = \frac{(60 \times L)}{A} \tag{5}$$

โดยที่ A คือ ความเร็วเฉลี่ยของรถที่ใช้ในการขนส่งสินค้า

ดังนั้น ระยะเวลาทั้งหมดของรถแต่ละคันจึงสามารถหาได้จากสมการ

$$Q = \sum_{n=1}^m T_n ; n = \text{ลูกค้าที่รถต้องไปส่งสินค้า} \tag{6}$$

ดังนั้นค่าความเหมาะสมจึงสามารถหาได้จากสมการ

$$\sum_{r=1}^m Q_r ; r = \text{จำนวนรถที่ต้องใช้ในการขนส่งสินค้า ณ ช่วงเวลานั้นๆ} \tag{7}$$

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองแก้ปัญหาแก้ปัญหาการขนส่งสินค้าด้วยกรณีศึกษา โดยเปรียบเทียบค่าคำตอบที่เหมาะสมระหว่างวิธีการแบบกลุ่มอนุภาคกับวิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรม ซึ่งสามารถจัดเส้นทางการขนส่งเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด สำหรับรถแต่ละคัน ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าความเหมาะสมระหว่างวิธีการแบบกลุ่มอนุภาคและวิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรม

เส้นทาง	การแบบกลุ่มอนุภาค		การหาค่าตอบเชิงพันธุกรรม	
	ระยะทาง	บรรทุก	ระยะทาง	บรรทุก
	(หน่วย)	(หน่วย)	(หน่วย)	(หน่วย)
DC > C09>C13 >C12> C08 > DC	36	180	36	180
DC > C01>C04 >C03> DC	42	180	42	180
DC > C02>C05 >C06> DC	43	109	43	109
DC > C11>C07 >C10> DC	47	194	47	194
รวม		168		168
ระยะเวลาเฉลี่ยในการหาค่าตอบ (วินาที)		89.4		123.7

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3 เมื่อนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าความเหมาะสมระหว่างวิธีการแบบกลุ่มอนุภาค และ วิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรม พบว่าทั้งสองวิธีสามารถหาค่าตอบที่ดีที่สุดโดยมีระยะทางรวมเท่ากันคือ 168 หน่วย แต่จะเห็นได้ว่าการหาค่าคำตอบด้วยวิธีการแบบกลุ่มอนุภาค มีความเร็วในการค้นหาค่าตอบเท่ากับ 89.4 วินาที ในขณะที่วิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรม มีความเร็วในการคำนวณหาค่าตอบเท่ากับ 123.7 วินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการแบบกลุ่มอนุภาคมีประสิทธิภาพการค้นหาได้ดีกว่า วิธีการหาค่าคำตอบด้วยวิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรม

อภิปรายผลการวิจัย

การแก้ปัญหาการขนส่งสินค้า เป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับระบบการขนส่งโลจิสติกส์และการจัดการห่วงโซ่อุปทานของหน่วยงานภาครัฐและอุตสาหกรรมของทุกประเทศ แม้ว่าจะมีการศึกษามาอย่างยาวนานกว่า 20 ปี แต่ปัญหานี้ยังคงได้รับความสนใจจากนักวิจัยจำนวนมากทั้งในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากปัญหานี้มีความยุ่งยากซับซ้อนในการหาค่าตอบโดยวิธีแมนตรง ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยส่วนใหญ่จึงนิยมใช้วิธีการหาค่าตอบเชิงพันธุกรรมและวิธีการแบบกลุ่มอนุภาคมาใช้ในการแก้ปัญหา อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีใดยืนยันได้ว่าเป็นวิธีที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด ด้วยเหตุนี้การแก้ปัญหาการขนส่งสินค้า (Vehicle Routing Problem) จะขึ้นอยู่กับความรู้ ความถนัด และความชอบรายบุคคล

(นรงค์ วิชาภา และคณะ, 2562) ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการคำตอบเชิงพันธุกรรมกับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคสำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง โดยเริ่มจากการสร้างประชากรและทำการทดลองด้วยวิธีการคำตอบเชิงพันธุกรรมกับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค จนได้คำตอบที่น่าพอใจ ผลการทดลองพบว่า การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคสามารถค้นหาคำตอบโดยใช้เวลาน้อยกว่าวิธีการคำตอบเชิงพันธุกรรมซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคมีประสิทธิภาพการค้นหาได้ดีกว่า วิธีการคำตอบเชิงพันธุกรรม

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

1. จากผลการแก้ปัญหาการขนส่งสินค้า (Vehicle Routing Problem) สามารถนำวิธี Genetic Algorithm และ PSO มาใช้ในการค้นหาคำตอบได้ แต่วิธี PSO สามารถค้นหาคำตอบโดยใช้เวลาน้อยกว่า GAs ซึ่งแสดงให้เห็นว่าควรใช้ PSO ที่มีประสิทธิภาพการค้นหาได้ดีกว่า Gas

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ผู้วิจัยดำเนินการพัฒนาอัลกอริทึมนี้ร่วมกับเทคนิคอื่นๆ เพื่อนำไปทดสอบกับปัญหามาตรฐานและทดสอบกับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอันนำไปสู่วิธีการที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาการขนส่งต่อไปในอนาคต
2. ผู้วิจัยจะนำอัลกอริทึมที่นำเสนอนี้ไปประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาอื่นๆ ต่อไป เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาค่าคำตอบที่เหมาะสม

บรรณานุกรม

- จิรรัตน์ อีระวาราทฤกษ์ และธราธร กุลภัทรนิรันดร์. (2546). การประยุกต์หลักการทางพันธุกรรมศาสตร์ในการคัดเลือกกลุ่มโครงการภายใต้ข้อจำกัดด้านงบประมาณ. การประชุมข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ตุลาคม 2546. 153-160.
- ณกร อินทร์พยุง. (2548). การแก้ปัญหาการตัดสินใจในอุตสาหกรรมขนส่งและลอจิสติกส์. กรุงเทพฯ: บริษัท ซี เอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน).
- นพรุจ สังข์แป้น และ สุรพงษ์ ศิริกุลวัฒนา. (2557, ก.ย. - ธ.ค.). การประยุกต์ใช้วิธีการเชิงพันธุกรรมสำหรับปัญหาเส้นทางขนส่งของโรงกำจัดซากไก่. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 24 ฉบับที่ 3. 526 – 536.
- นรงค์ วิชาภา และ คณะ. (2562, ม.ค.-มี.ค.). การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งแบบมีกรอบเวลาโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมแบบผสมผสานด้วยฮิวริสติกแบบแทรกไปข้างหน้าและวิธีการค้นหาคำตอบเฉพาะที่. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 29 ฉบับที่ 1. 4-13.

- พินิจ อ่อนน้อย. (2557). การเพิ่มประสิทธิภาพขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบกระชับด้วยการปรับเวกเตอร์ความน่าจะเป็นโดยค่าน้ำหนักตามความเหมาะสม. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- พิศุทธิ พงศ์ชัยฤกษ์. (2557). การอธิบายขั้นตอนการทำงานของวิธีการพาทีเคิลสวอมออปติไมเซชัน ผ่านตัวอย่าง (Discrete Optimization in Transport and Logistics). กรุงเทพฯ: บริษัท ซี เอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน).
- Kennedy, J. & Eberhart, R.C. (1995). Particle Swarm Optimization. **IEEE International Conference on Neural Network**, New Jersey. pp. 1942-1948.
- Kennedy, J., Eberhart, R.c. & Shi Y. (2001). **Swarm Intelligence**. Morgan Kaufmann Publishers.
- L. Huang, K. Wang, c. Zhou, R. Pang, L. Dong and L. Peng,. (2003). Particle swarm optimization for traveling salesman problems. **Journal of Ji Ling University (Science Edition)**. 477 - 480.
- L. Zhong and H. Lei. (2010). **A Mixed Discrete Particle Swarm Optimization for TSP**. 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE), 208 - 211.