

การหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยพฤติกรรมของกวาง: กรณีปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางขาย

An optimization algorithm for behavior of Siamese Rhinoceros Beetles: solving the Traveling Salesman Problem

เสกสรรค์ วินยางค์กุล¹

Seksan winyangkul¹

Received: 17 March 2017 ; Accepted: 3 August 2017

บทคัดย่อ

การหาค่าเหมาะสมของสมการ หรือปัญหาทางวิศวกรรมมีความสำคัญเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เช่นปัญหาเส้นทางเดินทางขาย (TSP) ซึ่งเป็นปัญหาเอ็นพีบริบูรณ์ โดยเทคนิคของการหาค่าตอบมีอยู่หลายวิธี เช่นหลักการของเมตาฮีริสติกส์ (Meta-heuristics) ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมของกวาง (SiRBA) ที่ได้ทำการเลียนแบบของพฤติกรรมของกวางในการเคลื่อนที่เข้าหา แสงไฟ อาหาร กวางอื่นเพื่อทำการสืบพันธุ์ และการหลีกเลี่ยงศัตรู มาสร้างเป็นอัลกอริทึมของกวาง เพื่อใช้ในการหาค่าสูงสุด ค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน และนำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ซึ่งหลักการเคลื่อนที่พิจารณาจากการเคลื่อนตัวเข้าหา แสง กับกลิ่นโดยการบินในช่วงที่อยู่ห่างจากคำตอบ และการสั่นสะเทือน กับกลิ่นโดยการเดินในช่วงที่อยู่ใกล้คำตอบได้ทดสอบ กับฟังก์ชันกำลังสอง และตัวแบบปัญหาการจัดเส้นทางแบบ TSP (Symmetric TSP) ซึ่งการหาค่าตอบโดยใช้ SiRBA สามารถใช้งานได้โดยมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: พฤติกรรมของกวาง อัลกอริทึมของกวาง การหาค่าเหมาะสมที่สุด ปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางขาย

Abstract

Optimization of methods for solving equations and engineering problems is currently important. The Traveling Salesman Problem (TSP) is a NP-complete problem solving technique employing the principles of meta-heuristics. This paper proposed a Siamese Rhinoceros Beetles Algorithm (SiRBA), which imitates the behavior of Siamese Rhinoceros Beetles. Movement toward light, food, reproduction and escaping from enemies are used to create a SiRBA which is then used to find the maximum and minimum value of functions, applied to solving engineering problems. Principles of the movement toward the light and smell by flying during an away from solution, Vibration and smell by walking at the near solution. The SiRBA was tested with a quadratic function and the Traveling Salesman Problem (Symmetric TSP). SiRBA was effective at finding a solution.

Keywords: Behavior of Siamese Rhinoceros Beetles, Siamese Rhinoceros Beetles Algorithm, Optimization, Traveling Salesman Problem.

¹ อาจารย์, โปรแกรมวิศวกรรมโลจิสติกส์ และการจัดการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย อ.เมือง จ.เชียงราย

¹ Lecturer, Logistics and Management engineering Program, Faculty of Industrial Technology(IN-TECH), Chiangrai Rajabhat University, Chiangrai, Thailand, 57100, E-mail Address: seksanwin@yahoo.com

บทนำ

ในการหาค่าเหมาะสมมีวิธีการหาผลเฉลยได้หลายวิธี โดยวิธีการ เช่น วิธีฮิวริสติกส์เป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อหาคำตอบสำหรับปัญหาการตัดสินใจในแต่ละปัญหาเท่านั้น (Domain-dependent method) แต่ไม่สามารถนำเอาวิธีฮิวริสติกส์ที่ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาหนึ่งไปใช้ในการหาคำตอบของอีกปัญหาหนึ่งได้ หรือแม้กระทั่งนำไปใช้ในการหาคำตอบของปัญหาเดิมที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือเงื่อนไขของปัญหาเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงวิธีฮิวริสติกส์ให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้นและสามารถถูกดัดแปลงเพื่อใช้ในการหาคำตอบของปัญหาการตัดสินใจใดๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ เป็นวิธีฮิวริสติกส์มาตรฐานที่เรียกว่า Meta-heuristic ซึ่งได้รับความนิยมและถูกใช้กันมากในปัจจุบัน ซึ่งได้แก่ SA, Neural Networks, GA, Tabu Search รวมถึงลักษณะการเลียนแบบการทำงานแบบเป็นฝูง (SOA) เช่น Ant Colony Optimization (ACO), Bat Algorithm (BA), Particle Swarm Optimization (PSO), Lévy Flight Algorithm (LFA), Bacteria Foraging Optimization Algorithm (BFA), Firefly Algorithm (FA), Fruit Fly Optimization Algorithm (FFA)^{1,2} ซึ่งวัตถุประสงค์ของบทความนี้ได้นำหลักการของพฤติกรรมเคลื่อนที่ของกวางมาสร้างอัลกอริทึมของกวาง, SiRBA เพื่อใช้ในการหาคำตอบของสมการ หรือปัญหาทางวิศวกรรม โดยหลักการของอัลกอริทึมของกวางได้นำพฤติกรรมพื้นฐานของกวางมาประยุกต์ใช้ในการสร้างดังนี้

กลไกการเคลื่อนที่ของกวางตามธรรมชาติ

การเคลื่อนที่ของกวางมีลักษณะการเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่อยู่ปัจจุบันไปยังตำแหน่งที่อยู่ใหม่ เนื่องจากปัจจัยของการดำรงชีวิต ได้แก่ การหาอาหาร การสืบพันธุ์ การหลีกเลี่ยงจากศัตรู โดยการเคลื่อนที่จะใช้การบินถ้าตำแหน่งใหม่อยู่ไกลจากที่อยู่อาศัยเดิม การบินจะใช้ปีกโดยจะมีปีกคู่หน้าด้านในสามารถโค้งงอได้ใช้ในการบิน ส่วนปีกคู่หน้าด้านนอกเนื้อปีกแข็งมาก (Elytra) ไม่มีเส้นปีกและไม่สามารถโค้งงอได้ จึงไม่ใช้ในการบิน³ และการเคลื่อนที่โดยใช้การเดินถ้าอยู่ใกล้ในการเลือกตำแหน่งใหม่ที่จะเคลื่อนที่ไปนั้นถ้าตำแหน่งอยู่ใกล้กวางจะอาศัยหลักการของการมองเห็น และการดมกลิ่น ถ้าอยู่ไกลจะอาศัยหลักการของการสัมผัสเพื่อเพิ่มขึ้นมา การเดินจะใช้ขาเดิน (walking leg) ขามีปล้องเล็กๆ 5 ปล้อง โดยลักษณะทางธรรมชาติของดวงตาของแมลงที่หากินในเวลากลางวันนั้น ดวงตาของกวางจะมีความสามารถในการมองเห็นแสงได้ดีมาก ในเวลากลางคืน โดยมีลักษณะตาเป็นแบบ ตารวม (compound eyes) จำนวน 1 คู่ ประกอบด้วยเลนส์เล็กๆ เรียก Facets ซึ่ง

ทำหน้าที่ในการมองเห็นภาพ ส่วนการดมกลิ่นจะใช้หนวดในการหาอาหาร และการสืบพันธุ์ซึ่งเป็นลักษณะโดยสัญชาตญาณของกวางเอง โดยมีลักษณะหนวดเป็นแบบหนวดแบบใบไม้ (lamellate) บริเวณปลายหนวดจะแผ่ขยายออกด้านหนึ่ง มีลักษณะเป็นแผ่นบางวางซ้อนกันหลายแผ่น มี 3-4 ปล้อง ปล้องสุดท้ายมีลักษณะคล้ายใบไม้ 3-4 แผ่น รวม กลายเป็นลูกกลม จำนวนปล้องหนวดมีทั้งหมด 8-11 ปล้องและตามผิวมีส่วนที่เป็นหนามใหญ่ ส่วนการสัมผัสของหนวด (ศัตรู, กวางตัวอื่น) ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับตัวกวางนั้นสามารถที่จะรับรู้ได้โดยผ่านขาที่ยึดเกาะผ่านมายังลำตัวทำให้ทราบว่ามีวัตถุอยู่ในบริเวณใกล้เคียง

ลักษณะโดยสัญชาตญาณการสืบพันธุ์จะเกิดขึ้นโดยกวางตัวผู้จะเคลื่อนที่ไปหากวางตัวเมียโดยอาศัยการดมกลิ่น ซึ่งกลิ่นของตัวเมียจะมีลักษณะที่แตกต่างจากวางตัวผู้ โดยลักษณะของกลิ่นที่เกิดขึ้นกับตัวกวางจะมีความเข้มข้นหรือรูปแบบของกลิ่นที่แตกต่างกัน ไม่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น ขนาดลำตัว หรือสีของตัวกวางเอง เมื่อกวางตัวผู้ หรือตัวเมียเคลื่อนที่ไปหากันแล้วจะทำการสืบพันธุ์โดยทันที

ส่วนลักษณะโดยสัญชาตญาณการหาอาหารเป็นกลไกหนึ่งในการเคลื่อนที่ โดยจะใช้หนวดเป็นตัวรับกลิ่นของอาหารในการดมกลิ่น และแยกลักษณะของอาหารที่มีความแตกต่างกัน เช่น อ้อยสด อ้อยบูด กล้วย ลำไย ยอดไม้ไผ่ เปลือกต้นหูหวาง ฯลฯ ซึ่งอาหารของกวางนั้นส่วนใหญ่จะมีความหวาน (จะมีกลูโคสอยู่ภายในเนื้อ) เมื่อกวางอยู่ในตำแหน่งที่ไม่มีอาหาร หรือได้ทำการกินอาหารจนหมดแล้วกวางจะเริ่มเคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งใหม่โดยการบิน ซึ่งอาศัยการดมกลิ่นโดยลักษณะของการเลือกตำแหน่งใหม่ที่จะไปนั้นกวางจะใช้ความเข้มข้นของกลิ่นอาหารในการกำหนดทิศทางที่จะไป ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วกวางจะเลือกไปยังตำแหน่งของอาหารที่อยู่ใกล้ที่สุด ถ้าลักษณะของอาหารเป็นชนิดเดียวกัน

การเคลื่อนที่โดยอาศัยตาในการมองหาแสงนั้นทั้งกวางตัวผู้และกวางตัวเมียจะมีลักษณะของตาที่เหมือนกันในการรับแสง และมองหาแสง ซึ่งโดยส่วนใหญ่กวางจะอยู่ในตำแหน่งที่มีความมืดกว่าเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่สว่างกว่าโดยอาศัยการบินไม่ว่าตำแหน่งใหม่นั้นจะอยู่ใกล้ หรือไกล และจะไม่ใช้การเดินถึงแม้ว่าตำแหน่งนั้นอยู่ใกล้ เนื่องจากกวางจะบินเข้าหาแสงไฟ เมื่อกวางอยู่ในตำแหน่งใหม่ที่มีแสงไปแล้วนั้น กวางก็จะมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่อื่นๆ อีกถ้าแสงไฟในตำแหน่งนั้นหรี่ หรือดับลง และอาจเกิดจากมีการกระตุ้นจากสิ่งเร้าอื่นๆ เช่น อาหาร ศัตรู การสืบพันธุ์

ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งใหม่

การเคลื่อนที่เนื่องจากศัตรู ซึ่งกว้างเป็นแมลงโดยจะมีศัตรูทางธรรมชาติอยู่หลายประเภท เช่น นกฮูก ตู๊กแก จิ้งจก กิ้งก่า ฯลฯ เมื่อกว้างตัวหรือตัวเมียอยู่ในตำแหน่งเดิมศัตรูจะทำการเคลื่อนที่มาหากว้าง เนื่องจากกว้างเป็นอาหาร เช่น นกฮูกจะบินหาอาหารกินในเวลากลางคืนเมื่อมาเจอกว้างก็จะทำการกินบริเวณส่วนลำตัวของกว้างเนื่องจากเป็นส่วนที่อ่อนหรือศัตรูจะมากินอาหารที่กว้างกินอยู่ เช่นตัวต่อจะมากินอ้อยเมื่อตัวต่อบินมากินอ้อยในบริเวณที่กว้างอยู่ตัวต่อจะทำการกัดซากกว้าง เป็นต้น เมื่อศัตรูเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กว้างจะรับรู้ได้โดยลักษณะของการเคลื่อนไหว การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น หรือศัตรูเข้ามาสัมผัสโดนตัวของกว้าง ซึ่งจะทำให้กว้างเคลื่อนที่หนีจากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งใหม่ที่ไม่มีศัตรูอยู่ ซึ่งเป็นลักษณะสัญชาตญาณทางธรรมชาติในการหลีกเลี่ยงเพื่อความปลอดภัย

ในการดำรงชีวิตอยู่ของกว้างนั้นจะมีปัจจัยที่กล่าวมาทำให้กว้างเกิดการเคลื่อนที่ย้ายตำแหน่งโดยปัจจัยต่างๆ ที่เกิดขึ้นนั้นอาจไม่ได้เกิดเพียงปัจจัยเดียวที่เกิดขึ้นในขณะนั้น แต่จะเกิดจากการรวมกันของปัจจัยที่เกิดขึ้น ที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของกว้างจากตำแหน่งเดิม ซึ่งมีความหมายว่าจุดเดิมที่กว้างนั้นเกาะอยู่ ไปยังตำแหน่งใหม่คือจุดที่กว้างเคลื่อนที่ไปเกาะใหม่

จากที่กล่าวมาการเคลื่อนที่ของกว้างมีรูปแบบที่แน่นอนโดยอาศัยหลักการทางธรรมชาติ เช่น การสืบพันธุ์ การหาอาหาร การบินเข้าหาแสงไฟ การหลบเลี่ยงจากศัตรู ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่จะเป็นการบินจากตำแหน่งที่อยู่เดิมไปยังตำแหน่งใหม่ โดยอาศัยปัจจัยที่กล่าวมาในการเคลื่อนที่แบบบิน และจะเป็นการบินแบบตัวเดียวที่มีความสัมพันธ์กันซึ่งจะมีลักษณะรูปแบบของการเคลื่อนที่เหมือน ผีเสื้อ ผีเสื้อแมลงต่างๆ หรือการเคลื่อนที่แบบมด และการเคลื่อนที่โดยการเดินจะอาศัย หลักการของการสั่นสะเทือน การดมกลิ่น เพื่อการสืบพันธุ์ หาอาหาร หลีกหนีศัตรู และการต่อสู้ โดยการเคลื่อนที่ทั้งแบบบิน และการเดินอาจจะเกิดจากปัจจัยหลักๆ ได้แก่ ปัจจัยที่เกิดขึ้นเองทางธรรมชาติ และปัจจัยที่เกิดจากสิ่งเร้าที่สร้างขึ้น

อัลกอริทึมของกว้าง

ในรูปแบบของอัลกอริทึมของกว้าง (Siamese Rhinoceros Beetles Algorithm, SiRBA) มีแนวคิดอยู่ 3 ประการด้วยกันคือ 1) กว้างจะทำการเคลื่อนที่เนื่องจาก แสง อาหาร การสืบพันธุ์ และศัตรู 2) ในการเคลื่อนที่ของกว้างนั้นพิจารณาจากความเข้มของ แสง กลิ่น แร่งสั่นสะเทือนที่เกิดจาก แสง

ไฟ อาหาร กว้าง และศัตรู ถ้าตำแหน่งของกว้างตัวไหนแสงสว่าง และกลิ่นมากกว่าก็จะมีกว้างตัวอื่นเคลื่อนที่เข้ามาหา ในทางตรงกันข้ามถ้าตำแหน่งไหนมีค่าความเข้มของแรงสั่นสะเทือนสูงกว้างจะไม่เคลื่อนที่ไปหา (ศัตรู) แต่จะไปในตำแหน่งที่ค่าต่ำ (กว้างตัวเมียเพื่อสืบพันธุ์) ส่วนความเข้มของแสง กลิ่น และแรงสั่นสะเทือนนี้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากจุดกำเนิดถ้ายิ่งห่างออกไปค่าความเข้มจะลดลง 3) ค่าความเข้มของแสง กลิ่น และแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากตำแหน่งของพื้นที่ในการหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การเข้าหาความเข้มของแสงของกว้าง

แมลงที่ออกมาหากินตอนกลางคืนจะอาศัยแสงในการนำทิศทางในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งใหม่ ดังนั้นส่วนที่สำคัญของการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับ ความเข้มของแสง (Attractiveness and Light Intensity) และการเลือกตำแหน่งใหม่ที่จะเคลื่อนที่ไป ดังตัวอย่างรูปแบบอัลกอริทึมของหิ่งห้อย (Firefly Algorithm, FA)⁴ ซึ่งได้ใช้หลักการของความเข้มของแสง (light intensity) เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับอัลกอริทึมของกว้างในการที่จะเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งโดยจะมีรูปแบบการเคลื่อนที่โดยการบินซึ่งกว้างจะบินไปหากว้างตัวอื่นโดยดูจากความสว่าง (brightness) ของตำแหน่งที่อยู่ ซึ่งความเข้มของแสงจะแปรผกผันกับรัศมีกำลังสอง ดังนี้ $I(r) = I_s / r^2$ เมื่อ $I(r)$ คือความเข้มของแสงที่ระยะรัศมี r ใดๆ และ I_s คือความเข้มของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง ถ้ากำหนดให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงคงที่เท่ากับ γ ความเข้มของแสงสามารถหาได้จาก $I(r) = I_0 e^{-\gamma r}$ เมื่อ I_0 คือจุดกำเนิดของความเข้มแสง ในกรณีที่ รัศมีอยู่ที่จุดกำเนิดสมการ I_s / r^2 ($r=0$) จะไม่สามารถหาค่าได้ แต่สามารถประมาณค่าได้จากรูปแบบของเกาส์ (Gaussian form) ดังนี้ $I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2}$

เมื่อแสงที่ออกมาจากตำแหน่งมีลักษณะคล้ายกับความเข้มของแสง ดังนั้นสามารถกำหนดรูปแบบของแสงที่ออกมาจากตำแหน่งดังนี้ $\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2}$ เมื่อ β_0 ($r=0$) คือแสงที่ออกมาจากตำแหน่งที่อยู่ เมื่อกำหนดลักษณะของระยะทางเป็น $\Gamma = 1/\sqrt{\gamma}$ จากสมการ $\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} = \beta_0 e^{-\gamma(\frac{1}{\sqrt{\gamma}})^2} = \beta_0 e^{-1}$ หรือ $\beta = \beta_0 / 2$ ในการเขียนรูปแบบของแสงสามารถเขียนในรูปของ ฟังก์ชันการลดลงแบบ monotonically ดังนี้

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, (m \geq 1)$$

ระยะทางระหว่างกว้าง 2 ตัว โดยกำหนดให้เป็น i และ j อยู่ที่พิกัดจากที่ตำแหน่ง x_i และ x_j มีค่าเป็น

$$r_{ij} = |x_i - x_j| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2}$$

เมื่อ $x_{i,k}$ ถูกกำหนดโดยอันดับที่ k ขององค์ประกอบของพิกัด x_i ของตำแหน่ง i และ d คือขนาดของมิติ เช่นในระบบ 2 มิติ $r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ ในการเคลื่อนที่ของกวางที่จุด i ไปยังจุดที่มีความสว่างกว่า ของกวางที่ตำแหน่ง j สามารถหาได้ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \mathcal{E}_i \tag{1}$$

เมื่อเทอมที่ 2 อยู่ในรูปแบบของการเข้าหาแสงสว่าง (attraction) เทอมที่ 3 อยู่ในรูปแบบของการสุ่ม โดยค่า α คือค่าเริ่มของการสุ่ม และ ค่า \mathcal{E}_i เป็นเวกเตอร์ของเลขสุ่มที่ได้จากการกระจายตัวแบบปรกติ (Gaussian distribution หรือ Uniform distribution)⁵ ตัวอย่างถ้าแทนเทอมของ \mathcal{E}_i ด้วย (rand - (1/2)) เมื่อ rand ค่าเลขสุ่มที่ได้จากการกระจายตัวแบบปรกติมีค่าอยู่ระหว่าง [0,1] โดยค่าอื่นๆ ในการกำหนดเริ่มสามารถแทนได้เช่น $\beta_0 = 1$ และ $\alpha \in [0,1]$

การดมกลิ่น

การดมกลิ่น (small) ของกวางนั้นจะใช้หน่วยโดยหลักการพื้นฐานของการหาอาหาร และการสืบพันธุ์ซึ่งอาศัยความเข้มของกลิ่นในการเคลื่อนที่ โดยจะขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างตัวกวางกับแหล่งที่กำเนิดกลิ่น จากหลักการสามารถเขียนขั้นตอนของการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย⁶ ได้ดังนี้

ขั้นตอนแรกทำการกำหนดจุดเริ่มต้นโดยการสุ่ม (Random initial location) ของกวางในพื้นที่ที่ต้องการหาค่าคำตอบ (X axis, Y axis) ทำการสุ่มตำแหน่งของกวาง n ตัว จากตำแหน่งเริ่มต้น

$$X_i = X \text{ axis} + \text{Random Value} \text{ และ}$$

$$Y_i = Y \text{ axis} + \text{Random Value}$$

ทำการหาค่าระยะทางจากจุดกำเนิดของกวางแต่ละตัว และทำการหาค่าความเข้มของได้รับกลิ่น (S_i) ของกวางแต่ละตัวจาก $Dist_i$ เมื่อ $Dist_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}$ และ $S_i = \frac{1}{Dist_i}$ จากนั้นทำการหาค่าของฟังก์ชันของการได้รับกลิ่น (Smell_i หรือ Fitness function) ดังสมการที่ (2) ของกวาง n ตัวที่อยู่ในตำแหน่งบนพื้นที่ที่ต้องการหาค่าตอบ

$$Smell_i = \text{Function} (S_i) \tag{2}$$

ทำการหาค่าโดยการเปรียบเทียบค่าที่ใหญ่ที่สุด (maximal value) ของการได้รับกลิ่น (Smell) ของกวาง n ตัว [BestSmell] = max(Smell_i)

ทำการเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนตำแหน่งของจุด (location) จากจุดเดิมมายังจุดที่มีค่าที่ใหญ่ที่สุด

$$X \text{ axis} = X (\text{BestSmell}) \text{ และ } Y \text{ axis} = Y (\text{BestSmell})$$

ทำขั้นตอนการสุ่มตำแหน่งของกวาง n จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าของการได้รับกลิ่น (Smell_i) ค่าเดิมกับค่าใหม่ที่ได้ถ้าค่าที่ได้ใหม่มีค่าที่ใหญ่กว่าให้ทำการเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งของจุด แต่ถ้าน้อยกว่าให้เริ่มทำขั้นตอนการสุ่มตำแหน่งของกวางใหม่

การสั่นสะเทือน

การเคลื่อนที่ของกวางโดยอาศัยหลักของการสั่นสะเทือน (Vibration) นั้นกวางจะใช้การเดินในการเคลื่อนที่ซึ่งจะเป็นบริเวณใกล้ จุดหมายคือการสืบพันธุ์ และการต่อสู้ โดยกวางจะพิจารณาถึงแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่อยู่ใกล้ๆ กับตัวกวางเองซึ่งในแต่ละตำแหน่งจะมีขนาดของการสั่นสะเทือนที่สูง หรือต่ำแตกต่างกันออกไป ซึ่งจะสื่อถึงกวางตัวเมีย กวางตัวผู้ตัวอื่น หรือศัตรูเช่นตุ๊กแก งู เป็นต้น ซึ่งลักษณะของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะแตกต่างกันจากลักษณะของ ขนาด และตำแหน่ง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ กวางตัวเมียมีขนาดของแรงสั่นสะเทือนน้อยที่สุด และกวางตัวผู้ก็จะเลือกเคลื่อนที่เข้าหากวางตัวเมีย หรือจุดที่มีแรงสั่นสะเทือนน้อยที่สุด ส่วนตำแหน่งอื่นๆ ที่มีค่าแรงสั่นสะเทือนที่สูงกว่าจะไม่เลือกเคลื่อนที่เนื่องจากเป็นศัตรู หรือกวางตัวผู้ตัวอื่น โดยกำหนดให้ขนาดของแรงสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับค่าขนาดของตำแหน่ง (Fitness of position) หรือ $f(P_{S_{irb}})$ ⁷, โดยตำแหน่งของตัวกวางเองกำหนดให้ความเข้มของการเกิดแรงสั่นสะเทือนเป็น $I(P_{S_{irb}}, P_{S_{irb}}, t)$ โดยสามารถแสดงดังนี้ $I(P_{S_{irb}}, P_{S_{irb}}, t) = 1/|f(P_{S_{irb}})|$ เมื่อกำหนดจำนวนของกวาง n ตัว ที่ตำแหน่งในบริเวณที่จะหาค่าตอบ โดยกวางแต่ละตัวจะสามารถจับการเคลื่อนไหวของกวางตัวอื่นๆ ได้โดยจะมีสัญญาณการเคลื่อนไหวในกวางแต่ละตัวเท่ากับ $n-1$ สัญญาณโดยสัญญาณความเข้มของการเกิดแรงสั่นสะเทือนระหว่างตำแหน่งเช่นตำแหน่งของกวาง B ที่ได้รับสัญญาณจากกวาง A สามารถหาได้ดังสมการที่ (3)

$$I(P_{\text{Sirb,A}}, P_{\text{Sirb,B}}, t) = I(P_{\text{Sirb,A}}, P_{\text{Sirb,B}}, t) \exp\left(-\frac{D(P_{\text{Sirb,A}}, P_{\text{Sirb,B}})}{D_{\text{max}} r_a}\right) \quad (3)$$

เมื่อ D_{max} คือระยะห่างระหว่างค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของขอบเขตที่ต้องการหาตั้งสมการ $D_{\text{max}} = |\bar{x} - \underline{x}|$ และระยะทางระหว่างกว้างสามารถหาได้จาก

$$D(P_{\text{Sirb,A}}, P_{\text{Sirb,B}}, t) = |P_{\text{Sirb,A}} - P_{\text{Sirb,B}}|$$

ส่วนค่า r_a เป็นพารามิเตอร์ควบคุม โดย $r_a \in (0,1)$ ตำแหน่งใหม่การเคลื่อนไปของกว้างเนื่องจากการสั่นสะเทือนนั้นกว้างแต่และตัวจะทำการเคลื่อนที่โดยพิจารณาจากตำแหน่งของกว้างตัวอื่นที่มีความเข้มของการเกิดแรงสั่นสะเทือนต่ำที่สุด (V_{min}) จากนั้นทำการเปรียบเทียบแรงสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งเดิม (V_{tar}) ถ้า ($V_{\text{min}} < V_{\text{tar}}$) ให้แทนตำแหน่งเดิม (V_{tar}) ด้วยตำแหน่งที่เกิดแรงสั่นสะเทือนต่ำที่สุด (V_{min}) โดยที่ตำแหน่งของกว้างทุกตัวจะมีเข้มของการเกิดแรงสั่นสะเทือนถ้ามีค่ามากกว่า V_{tar} กว้างจะทำการเคลื่อนที่ตั้งสมการที่ (4)

$$P_{\text{Sirb}}(t+1) = P_{\text{Sirb}} + (P_{\text{tar}} - P_{\text{Sirb}}) \cdot (1 - R \cdot R) \quad (4)$$

เมื่อ R คือค่าสุ่มจาก $\in (0,1)$ และ \cdot การคูณกันของคู่ลำดับของกว้างเมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งใหม่ที่กว้างทำการเคลื่อนที่ไปแล้วเข้มของการเกิดแรงสั่นสะเทือนน้อยกว่าเดิมให้แทนตำแหน่งเดิมด้วยตำแหน่งใหม่ แต่ถ้ามากกว่าเดิมให้ใช้ตำแหน่งเดิมจากนั้นทำการเริ่มต้นของขั้นตอนของการเปรียบเทียบตำแหน่งใหม่

หลักการเคลื่อนตัวเข้าหาคำตอบของอัลกอริทึมกว้าง

การเคลื่อนที่เข้าหาคำตอบของอัลกอริทึมของกว้างนั้นในช่วงแรกของค่า x เริ่มต้นจะเป็นรูปแบบของการบิน โดยพิจารณาจากการเคลื่อนตัวเข้าหา แสง และกลิ่น จะเรียกช่วงนี้ว่าบริเวณของการบิน flying zone ดังแสดงใน (Figure 1) ซึ่งจะพิจารณาค่า x ที่ได้จากค่า Fitness ที่ค่า x ใดๆ ของแสง และกลิ่นจะนำมาเปรียบเทียบกัน ลักษณะการเคลื่อนตัวของค่า x ของแสง จะอยู่ในรูปของการแกว่งแบบสุ่ม (random walk) ที่มีค่าลู่อู่เข้าสู่ค่า x^* ส่วนของกลิ่นจะมีลักษณะที่ค่า x ลดลงในแต่ละรอบเพื่อเข้าสู่ค่า x^* เมื่อค่า x ที่ได้ของแสงของกว้างตัวที่มีค่า fitness ที่ดีที่สุดแล้ว แต่มีผลทำให้ค่า fitness ที่น้อยกว่ากลิ่นของกว้างตัวที่ดมกลิ่นได้ค่า fitness ที่สูงที่สุด โดยจะทำการแทนค่า x ที่ได้ของแสงตัวที่ได้ค่ามากที่สุดด้วย ค่า x ของกลิ่นตัวที่ได้ค่ามากที่สุด $x_{\text{Best Smell}} \rightarrow x_{\text{Best light}}$ แต่ถ้า $f(x_{\text{Best light}}) > f(x_{\text{Best Smell}})$ ไม่ต้องแทนถึงจะมีค่า x แสงของกว้างบางตัวที่ให้ค่า fitness ที่น้อยกว่าก็ตาม เมื่อดำเนินการรอบการทำงานไปจะทำการเปรียบเทียบค่า $(f(x_{\text{Best}})_{t+1} - f(x_{\text{Best}})_t) / f(x_{\text{Best}})_t \leq \%error$ ที่ตั้งไว้เช่น 0.5, 0.01 หรือ 0.005 เพื่อทำการเปลี่ยนรูปแบบการหาคำตอบจาก flying zone เป็นบริเวณของการเดิน walking zone ซึ่งจะใช้หลักการของการสั่นสะเทือน และกลิ่น ซึ่งลักษณะการเคลื่อนตัวของค่า x ของการสั่นจะคล้ายกับแสงคือเป็นแบบ random walk ที่มีค่าลู่อู่เข้าสู่ค่า x^* แต่จะแตกต่างกันในรูปแบบของการแทนค่า x ที่ได้ โดยถ้า $f(x_{\text{vibration}}) < f(x_{\text{Best Smell}})$ ซึ่งหมายความว่าถ้า x ที่ได้จากการสั่นของกว้างตัวใดๆ มีค่า fitness ที่น้อยกว่าค่า x ของกลิ่นตัวที่ได้ค่ามากที่สุดให้ทำการแทนกว้างด้วยค่าด้วยค่า x ของกลิ่นตัวที่ได้ค่ามากที่สุด $x_{\text{Best Smell}} \rightarrow x_{\text{vibration}}$ และในการหาคำตอบในแต่ละครั้งถ้ามีกว้างตัวใดได้ค่า x ที่ทำให้ fitness มากกว่าครั้งก่อนให้ทำการแทนค่า $x_{\text{Best}} \rightarrow x$ เป็นค่าเป้าหมายเพื่อที่จะให้กว้างตัวอื่นๆ เคลื่อนที่เข้าหาในรอบต่อไปโดยมีรูปแบบของสมการตั้งสมการที่ (5) และอัลกอริทึมดังนี้

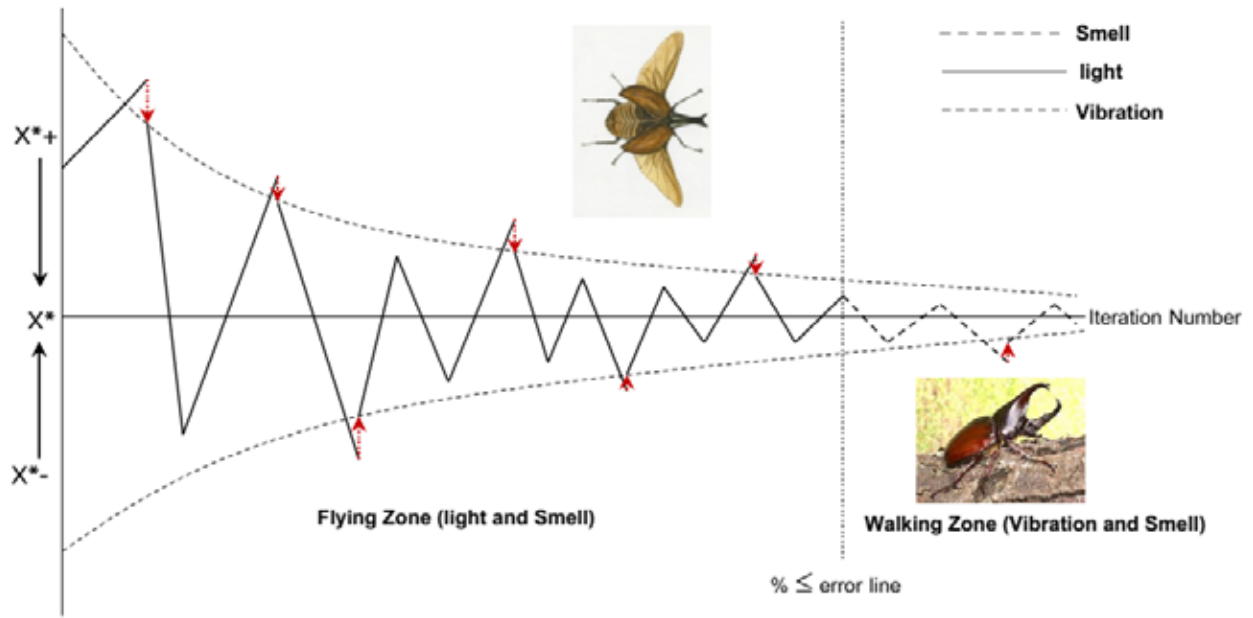


Figure 1 Mobility mechanism to solution for SiRBA Algorithm

$$\text{Fitness} \begin{cases} f(x_i) & \text{light} \\ f(S_i) & \text{Smell} \\ f(P_{\text{Sirb}}(t+1)) & \text{Vibration} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{เมื่อ } x_i = \{\tau_1[x_i + \beta_0 e^{-\gamma_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \mathcal{E}_j] + \tau_2[P_{\text{Sirb}} + (P_{\text{tar}} - P_{\text{Sirb}}) \bullet (1 - R \bullet R)]\}$$

$$\text{Smell}_i = \text{Function}(S_i)$$

$$\%f(x) = \frac{f(x_{\text{Best},t+1}) - f(x_{\text{Best},t})}{f(x_{\text{Best},t})}$$

$$\text{และ } \tau_1 = (0,1) \text{ เมื่อ } \begin{cases} \%f(x) > \%error \text{ เป็น } 1 \\ \%f(x) \leq \%error \text{ เป็น } 0 \end{cases}$$

$$\tau_2 = (0,1) \text{ เมื่อ } \begin{cases} \%f(x) > \%error \text{ เป็น } 0 \\ \%f(x) \leq \%error \text{ เป็น } 1 \end{cases}$$

Pseudo code for SiRBA:

1. Objective function of $f(x)$, where $x=(x_1, \dots, x_d)$
Search Space; $x \in 10^d[-1,1]$
2. Generate initial population of Siamese Rhinoceros Beetles;
 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$
: **Flying zone (light and Smell)**
3. Formulate light intensity I_i from $f(x_i)$; $I_i = f(x_i)$
4. Define absorption coefficient γ ;
5. **While** ($t < \text{MaxGeneration}$)
6. **For** $i = 1 : n$ (all n Beetles)

7. **For** $j=1$ to i (all n Beetles)
8. **If** ($I_j > I_i$), move Beetles i towards j ;
9. **end if**
10. Generate initial location; Initial (X, Y)
11. Random direction and distance; $(X_k, Y_k) = (i = 1, 2, \dots, m) X_i = X \text{ axis} + \text{Random Value}, Y_i = Y \text{ axis} + \text{Random Value}$
12. Find the smell concentration (Smell_i): $\text{Smell}_i = \text{Function}(S_i)$
13. **While** ($t < \text{MaxGeneration}$)
14. **For** $k = 1$ to m (all m location)
15. **If** ($\max(\text{Smell}) > \text{Smell}_i$), move Beetles i towards that location
16. **end if**
17. Evaluate new solutions and update light intensity and location;
18. **While** ($(f(x)_{t+1} - f(x)_t) / f(x)_t \leq 0.05$); Compare solution : **Walking zone (Smell and Vibration)**
19. Find v_{tar} for each Beetles; target vibration
20. **While** stopping criteria not met **do**
21. **for each** Beetles in pop **do**
22. Evaluate the fitness value of s .
23. Generate a vibration at the position of s .
24. **end for**
25. **for each** Beetles in pop **do**

26. Calculate the intensity of the vibrations V
27. generated by other spiders.
28. Select the strongest vibration v_{best} from V .
29. **if** The intensity of v_{best} is larger than v_{tar} **then**
30. Store v_{best} as v_{tar} .
31. **end if**
32. Perform a random walk towards v_{tar} .
33. Generate a random number R from $[0,1)$.
34. **While** ($v_{tar} < \text{MaxGeneration}$)
35. **For** $i = 1 : n$ (all n Beetles)
36. **For** $j=1$ to i (all n Beetles)
37. **If** ($v_j > v_i$), move Beetles i towards j ;
38. **end if**
39. Random direction and distance; $(X_k, Y_k) = (i = 1, 2, \dots, m)$
40. Find the smell (Smell_i); $\text{Smell}_i = \text{Function}(S_i)$
41. **While** ($t < \text{MaxGeneration}$)
42. **For** $k = 1$ to m (all m location)
43. **If** ($\max(\text{Smell}) > \text{Smell}_i$), move Beetles i towards that location
44. **end if**
45. Evaluate new solutions and update vibration intensity and location;
46. **End for** j ;
47. **End for** i ;
48. **End for** k ;
49. Rank the Beetles and find the current best;
50. **End while**;
51. Post process results and visualization;
52. **End procedure**;

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการทดสอบอัลกอริทึมของกวางจะใช้การทดสอบอัลกอริทึมในการหาค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของฟังก์ชันกำลังสอง และตัวแบบปัญหาการขนส่งแบบ TSP โดยใช้ MATLAB programs และ Microsoft Excel ติดตั้งลงบน Intel Core i3-3217U ที่ 1.80 GHz และ 4GB RAM ซึ่งทำการหาผลเฉลยของปัญหาซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้

การทดสอบอัลกอริทึมในการหาค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด

การทดสอบอัลกอริทึมของกวางเบื้องต้นใช้ทดสอบการหาค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของฟังก์ชันกำลังสอง (Quadratic Function) ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$y = -10 + x^2 \quad (6)$$

$$y = 1 - x^2 \quad (7)$$

ในสมการที่ (6) ค่าต่ำสุดอยู่ที่ -10 และในสมการที่ (7) ค่าสูงสุดอยู่ที่ 1 ทำการกำหนดค่าตำแหน่งของกวางเริ่มต้นจำนวน $n = [3,6,9]$ ในช่วงตำแหน่ง $10^0[-1,1]$ เพื่อหาช่วงความกว้างของการหาค่าตอบที่เหมาะสม $x \in 10^0[-1,1]$ เมื่อ $d = 0,1,2,\dots,r$ คือจำนวนของตัวแปรอิสระที่มีในสมการ ในสมการที่ (6) และ (7) มีตัวแปรอิสระ 1 ตัว จะได้ $d = 0,1$ ดังนั้น จะได้ $x \in \{10^0[-1,1], 10^1[-1,1]\}$, $x \in \{-1,1\}, [-10,10]$, เมื่อพิจารณาช่วงทั้ง 2 จะเห็นได้ว่ายิ่ง x มีค่ามากขึ้น หรือลดลงจะทำให้ค่า $y(x)$ ในสมการที่ (6),(7) มีค่าสูงขึ้น และลดลง เมื่อ $(y([10],[10]) > y([1],[1]))$ และในระหว่างช่วง $([10],[1])$ และ $([-10],[1])$ ก็จะมีค่าสูงในสมการที่ (6) และลดลงในสมการที่ (7) กว่าช่วง $[-1,1]$ ดังนั้นทั้ง 2 สมการจะเลือกใช้ช่วง $[-1,1]$ กำหนดตำแหน่งที่กวางอยู่โดยการสุ่มตำแหน่ง $x \in [-1,1]$ เช่น $n = 3$ จะได้ $x = (0.998, 0.174, -0.191)$ กำหนดค่าเริ่มต้น $\beta_0 = 1, \alpha \in [0, 1]$ ซึ่ง α (randomness) = 0.2, $\gamma = 1$ และ $\mathcal{E}_i = (\text{rand} - (1/2))$ และค่าเริ่มต้นของพิกัดการดมกลิ่น $(X,Y) \in [0, 10]$ และค่าการสุ่มตำแหน่ง Random Value $\in [-1,1]$ $r_u \in (0,1)$, $\%f(x) = 0.005$ โดยผลที่ได้จากการทดสอบ 10 รอบ ค่าของ $f(x)_1$ และ $f(x)_2$ เมื่อกำหนด $f(x)_1 = f(x)_6$ และ $f(x)_2 = f(x)_7$ ได้ค่าที่ดีที่สุดที่ -9.9999994890709 และ 0.9999994890708 ดังแสดงใน (Figure 2) โดยมีค่าของ $x = 0.000226037$ ที่กว้าง 9 ตัว ในการเคลื่อนตัวของกวางเข้าสู่ค่า x^* ของกวางดังแสดงใน (Figure 3) รูปแบบจะมีค่าที่ลดลงมากในช่วงแรกเนื่องจากการเคลื่อนตัวโดยแสง จากนั้นค่าที่ได้จะเริ่มใกล้เคียงกัน จากนั้นจะเปลี่ยนจากรูปแบบของแสงเป็นการสั้นที่ $n = 3$ จะทำการเปลี่ยนในรอบที่ 5 ดังแสดงใน (Figure 3) ส่วน $n = 6,9$ จะทำการเปลี่ยนในรอบที่ 6 ดังแสดงใน (Figure 4) และ (Figure 5) โดยพิจารณาจากค่าที่ตั้งไว้ เมื่อพิจารณาผลของกลิ่นจะเห็นได้ว่ามีค่าลดลงแต่ค่า fitness ยังน้อยกว่า แสงและการสั้นสะท้อนโดยมีช่วงเดียวในการแทนที่คือที่ $n = 3$ ในรอบที่ 1 โดยผลของกลิ่นที่ลดลงช้าเนื่องจากการตั้งค่าของ Initial (X,Y) ในที่นี้ได้ตั้งไว้ $\in [0, 10]$ และ Random Value $\in [-1,1]$ จึงทำให้ผลของการหาค่าตอบจาก

กลิ่นลดลงช้า โดยมีเส้นทางการเคลื่อนที่ของ (X,Y) ดังแสดงใน (Figure 6) จากผลการทดสอบที่ได้ยิ่งจำนวนกว้างเยอะจะทำให้ผลการหาค่าตอบที่ได้เข้าสู่ค่า x^* ได้เร็วขึ้นเนื่องจากจำนวนของการตั้งค่าเริ่มต้นจะเท่ากับจำนวนของกว้างจึงมีผลทำให้การหาค่าตอบมีชุดของข้อมูลที่เยอะกว่า

การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมของกว้างในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินพนักงานขาย

ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ปัญหานี้มีวัตถุประสงค์คือ ต้องการหาเส้นทางที่ทำให้การเดินทางไปยังลูกค้าทุกจุดเกิดขึ้นด้วย ระยะทาง หรือค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุด โดยที่ลูกค้าแต่ละรายจะได้รับการบริการจากพนักงานขายเพียงครั้งเดียวในแต่ละรอบของการเดินทาง ถ้าหากระยะทางหรือค่าใช้จ่ายในการเดินทางระหว่างจุดสองจุดใดๆ คงที่ คือไม่ขึ้นกับเส้นทาง ปัญหาจะเป็นแบบสมมาตร (Symmetric TSP) TSP เป็นข้อปัญหาเอ็นพีบริบูรณ์ ถ้ามีตำแหน่งที่ต้องเดินทางผ่าน n ตำแหน่ง จะบอกไม่ได้ว่าเส้นทางรวมทั้งหมดจากการเดินทางผ่าน n ตำแหน่งตามลำดับที่วางไว้ต้องลำดับแบบไหนจึงจะได้คำตอบที่ดีที่สุด เพราะถ้าระยะทางรวมจากจำนวนเส้นทาง n ตำแหน่งของลำดับที่ 1 น้อยกว่าระยะทาง

รวมจากจำนวนเส้นทางจำนวน a ตำแหน่งของลำดับที่ 2 แล้วลำดับที่ 1 ไม่จำเป็นต้องมีระยะทางรวมทั้งหมด n ตำแหน่งน้อยกว่าเสมอไป ดังนั้นจึงอาจจะต้องสลับตำแหน่งถึง $(n-1)$ เพื่อหาลำดับตำแหน่งที่มีระยะทางรวมทั้งน้อยที่สุด ปัญหาลักษณะนี้เรียกว่าเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard Problem) ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย มีประโยชน์ในลักษณะต่างๆ กันของการบริหารจัดการรวมทั้ง การบริหารจัดการโซ่อุปทาน (Supply Chain) และ โลจิสติกส์ (Logistics)

ในการหาค่าตอบของอัลกอริทึมของกว้างทางวิศวกรรมรูปแบบของการหาค่าตอบเป็นรูปแบบของวิธีการทาง Metaheuristics ที่มีลักษณะการเลียนแบบการทำงานแบบเป็นฝูง (SOA) โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาผลเฉลยของรูปแบบปัญหาเช่น ปัญหาการจัดเส้นทาง (Routing Problems) แบบ TSP หรือ VRP การจัดสินค้า (Bin Packing Problems) การจัดตารางเวลา (Time Scheduling Problems) เป็นต้น ในการหาค่าตอบของ SiRBA จะเป็นแบบต่อเนื่อง ($x \in \mathcal{R}^n$) แต่สามารถที่จะประยุกต์ใช้ในรูปแบบของคำตอบที่เป็นการจัดเรียงลำดับ ($\pi \in \mathcal{S}_n$) โดยที่ π คือกลุ่มเซตของเส้นทางที่แตกต่างกัน (1, 3, 7... n) กัน \mathcal{S}_n คือกลุ่มเซตที่เป็นไปได้ของคำตอบ (1, 2... n)

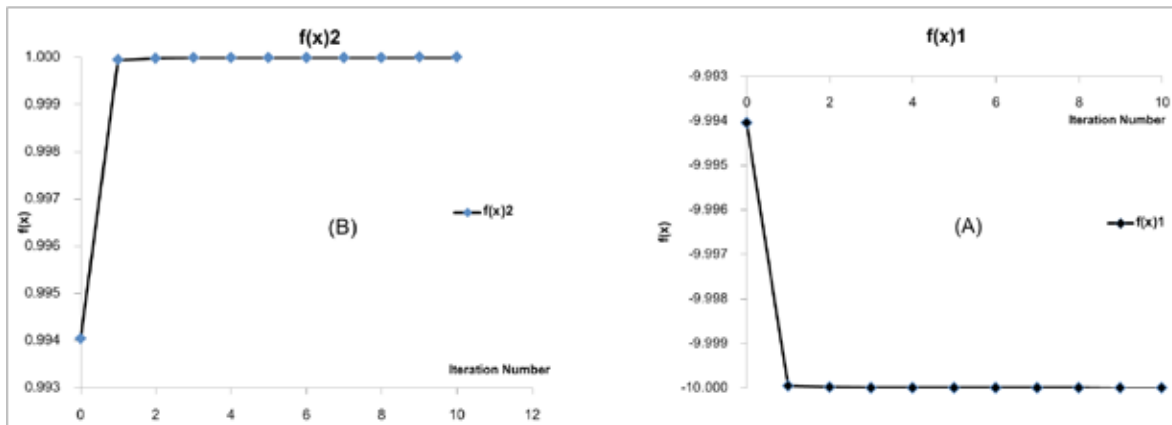


Figure 2 Testing 10 Iteration Number for A) f(x)1 and B) f(x)2

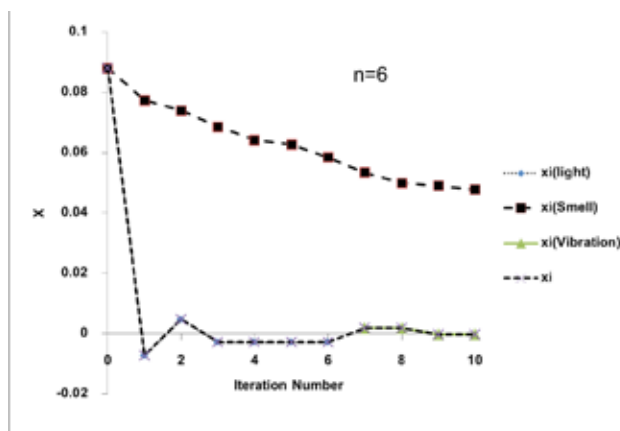


Figure 3 Movement into value x^* (n=3)

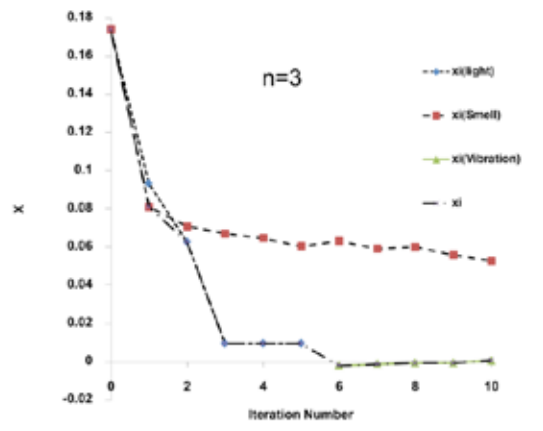


Figure 4 Movement into value x^* (n=6)

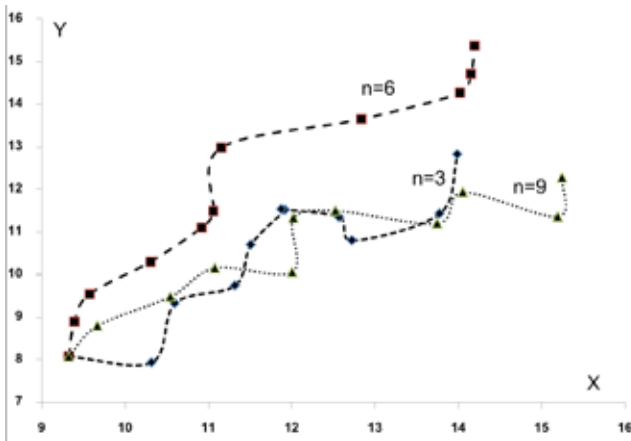


Figure 5 Movement into value x^* ($n=9$)

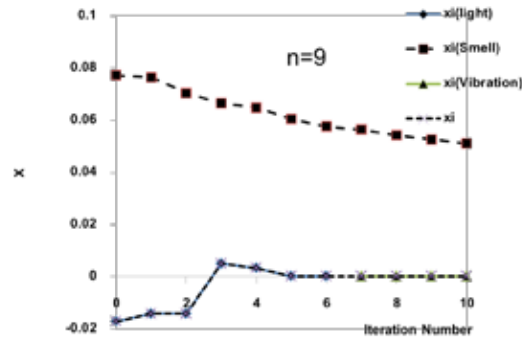


Figure 6 Moving paths X, Y for smelling

การหาคำตอบของปัญหาแบบ TSP ในขั้นแรกจะทำการกำหนดจำนวนของกว้าง และเซตลำดับของจุดของกว้าง n ตัว ซึ่งในแต่ละเซตจะมีค่าระยะทาง (Fitness) ของเซต เช่นลำดับของกลุ่ม $\pi_i = [2 \ 1 \ 4 \ 3 \ 5 \ 7 \ 6 \ 1] = L_i$, $\pi_j = [2 \ 4 \ 3 \ 5 \ 6 \ 7 \ 1] = L_j$ โดยกำหนดให้ผลต่างของ $L_i - L_j = r_{ij}$ ในการหาค่าเริ่มต้นจะใช้รูปแบบของความเข้มของแสง $\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r}$ และการดมกลิ่น (random position, $L(\min)$) เมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ของ Fitness ในรอบต่อมาน้อยกว่า 0.5% จะใช้หลักการของความเข้มของการเกิดแรงสั่นสะเทือนเป็น $I(P_{Sirb}, P_{Sirb}, t)$ คู่กับการดมกลิ่น ในการหาเส้นทาง และกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ในการใช้เนบอร์ฮูด และแบบการสุ่มสลับตำแหน่งแบบ 3 จุด และ 4 จุด (3-4 permutations) โดยรูปแบบโครงสร้างแบบ 3 neighborhood (k-opt) โดยจะทำการสุ่มเอา link ($d_i, d_i + 1$) ใดๆ ออกมาจาก π เมื่อเอา Link ใดๆ จำนวน 3 อัน ออกไปแล้ว จากนั้นนำเอา link 3 อันใหม่เข้ามาแทนที่เดิมจะสามารถทำได้ 2 ทางเลือก โดยทางเลือกนี้จะนำค่า Fitness ที่ได้จากการเลือกโดยจุดต่อโดยการพิจารณาความเข้มของแสง และการดมกลิ่นไปพร้อม (%Fitness > 0.5%) และความเข้มของแรงสั่นสะเทือน และการดมกลิ่นไปพร้อม (%Fitness ≤ 0.5%) โดยตัวใดให้ค่าที่ต่ำสุด กว่าจะทำการเลือกเป็นเส้นทางในการทำในรอบต่อไป และเมื่อผลต่างของค่า Fitness ที่ได้มีค่าน้อยกว่า

สำหรับตัวอย่างปัญหาเป็นการเลือกเส้นทางการขนส่งที่มีเส้นทางปัญหาเป็นแบบสมมาตร (Symmetric TSP) โดยพิจารณาหาเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับการขนส่งสินค้า ซึ่งมีข้อกำหนดให้ผ่านที่จุด 1 คือจุดกระจายสินค้าและเมื่อขนส่งครบทุกจุดแล้วต้องกลับมายังจุดเริ่มต้นคือจุดที่ 1 โดยมีจุดที่จะต้องนำสินค้าไปส่งจำนวน 7 จุด ได้แก่จุดที่ 2 3 4 5 6 7 และ 8 ซึ่งมีเส้นทางการเดินทางเดิมคือ 1-2-3-4-5-6-7-8-1 รวมระยะทางการขนส่งทั้งหมด 16.18 กิโลเมตร เมื่อทำการประยุกต์ใช้วิธีการจำลองการอบเหนียว (SA) ในการแก้ปัญหาจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้เส้นทางใหม่เป็น 1-4-3-5-6-8-7-2-1 โดยมีระยะทางรวมคือ 16.11 กิโลเมตร โดยเส้นทางใหม่ประหยัดกว่าเส้นทางเก่า 0.07 กิโลเมตรคิดเป็น 0.43 % จากเส้นทางเก่า

เมื่อนำอัลกอริทึมของกว้างมาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาคำตอบคือการเดินทางที่เดินทางโดยมีข้อมูลระยะทางระหว่าง Node ดังแสดงใน (Table 1) ซึ่งทำการกำหนดค่า $k = 3$ (3-opt) เพราะว่า เมื่อนำเอา Link ใดๆ จำนวน 3 อันออกไปแล้ว การนำเอา link 3 อันใหม่เข้ามาแทนที่เดิมจะสามารถทำได้ $n! - 1$ ทางเลือก³ และการสุ่มสลับตำแหน่งแบบ 3-4 จุดสามารถทำได้ n^2 ทางเลือก ในกรณีนี้จะทำให้วิธี SirBA สามารถลดระยะเวลาในการหาคำตอบและทำให้ขั้นตอนวิธีทางคอมพิวเตอร์มีความกระชับมากยิ่งขึ้น กำหนดค่าเริ่มต้น $\beta_0 = 1, \gamma = 1, r_0 \in (0,1)$ จำนวนกว้าง $n = 3$ และทำการสุ่มเส้นทางเริ่มต้น ดัง (Table 1)

Table 1 Distance matrix between Node (km)

N	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0					Random initial assignment		
2	1.03	0				3-6-8-1-4-7-2-5-3= 25.63 km		
3	2.42	1.39	0			7-3-4-2-8-5-6-1-7= 24.73 km		
4	2.73	1.69	1.28	0		6-2-5-7-1-3-8-4-6= 28.3 km		
5	2.17	1.1	1.06	1.36	0	(Best Solution = 16.1 km)		
6	3.66	2.58	2.68	2.98	1.61	0		
7	4.98	3.91	4.75	4.64	3.33	2.97	0	
8	5.78	4.68	5.51	5.4	4.09	3.73	0.76	0

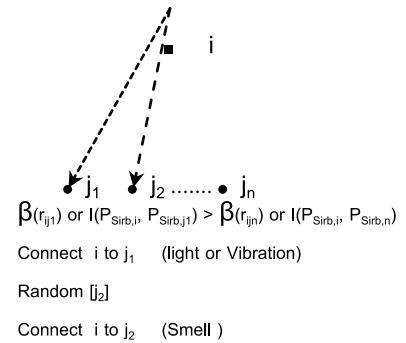


Figure 7 Connection of path

จากนั้นกำหนดให้ v_1 คือจุดในตำแหน่ง i ภายในทัวร์แบบแรกคือ 3-opt ทำการสุ่มเอา link $(v_1, v_{i+1}), (v_i, v_{i+1})$ และ (v_k, v_{k+1}) ออกไป จะมีทางเลือกในการแทนที่ link 3 อันเดิมด้วย link 3 อันใหม่น้อยกว่าหรือเท่ากับ $n! - 1$ ทางเลือก ซึ่งจะทำให้ทัวร์ยังคงมีความสมบูรณ์อยู่ (ทัวร์ที่มีรูปทรงเรขาคณิตปลายปิด (Valid tour)) ลำดับการเดินทางไปยังจุดต่างๆจำนวน 8 จุด (ตัวเลขภายในตาราง) สมมติว่าค่าเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ Iteration 0 Initial tour $L_0 = (3-6-8-1-4-7-2-5-3)$ Fitness = 25.63 km (กว้าง 1 ตัวจะทำการสุ่มในแต่ละรอบได้แก่แสงหรือแรงสั่นสะเทือน 3 ครั้ง และดมกลิ่น 3 ครั้งโดยจะได้ 6 เส้นทางต่อกว่า 1 ตัวใน 1 รอบ ดังนั้นกว้าง 3 ตัวจะให้ $3 \times 6 = 18$ เส้นทางต่อ 1 รอบ) ขั้นตอนต่อไปจะสร้างคำตอบขึ้นมาใหม่ที่เป็นสมาชิกที่อยู่ภายในเนเบอร์ฮูด ใช้ค่า $k=3$ แล้วทำการสุ่มเอา link 3 อันใดๆ ออกมา และจะมีทางเลือกที่เป็นไปได้้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 ทางเลือกที่จะเชื่อมเส้นให้เป็นรูปทรงเรขาคณิตแบบปิดที่สมบูรณ์ และไม่ซ้ำกับตำแหน่งของเส้นเดิมที่เพิ่งถูกตัดออกไป ในการพิจารณาเชื่อมเส้น จะใช้รูปแบบการบินของกว้างโดยพิจารณาความเข้มของแสง และการดมกลิ่น (Flying zone (light $\beta(r)$ and Smell)) และรูปแบบของการเดินโดยพิจารณาความเข้มของการเกิดแรงสั่นสะเทือน และการดมกลิ่น (Walking zone (Smell and Vibration (I))) ดังแสดงใน (Figure 7) โดยมีขั้นตอนของอัลกอริทึมกว้างในการใช้เนเบอร์ฮูดแบบ 3 opt ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่ในการใช้เนเบอร์ฮูดแบบ 3 opt โดยทำการสุ่มเอา link $(d_i, d_i + 1)$ ใดๆ ออกมาจาก

π ซึ่งจากจำนวนของจุดมีจำนวน 8 จุดและเป็นการเดินแบบปิด(กลับมาตำแหน่งเดิมในจุดเริ่มต้น) จะมีเส้นเชื่อมจำนวน 8 เส้น จะกำหนด ค่าการสุ่มตำแหน่ง Random Value $\in [0,1]$ โดยแบบความกว้างของช่วงเป็น $1/8=0.125$ ซึ่งสามารถสร้างช่วงในการนำเส้นเชื่อมออกได้ดังแสดงใน (Table 2) เมื่อทำการสุ่มค่าของช่วงการบิน ตัวอย่างดังแสดงใน (Table 2) เป็นการพิจารณาของแสง และกลิ่นของกว้างตัวที่ 1 ในครั้งที่ 1 โดยในรอบที่ 1 ทำการสุ่มมา 3 ครั้ง เช่นได้ค่าการสุ่มของแสงเป็น $[0.189 \ 0.611 \ 0.732]$ ซึ่งจะทำให้การตัดจุดเชื่อมที่ 2, 5 และ 6 และค่าการสุ่มของกลิ่นเป็น $[0.073 \ 0.478 \ 0.698]$ ซึ่งจะทำให้การตัดจุดเชื่อมที่ 1, 4 และ 6 จากนั้นจะทำการตัดจากเส้นทางเริ่มต้นที่ได้กำหนด 3-6-8-1-4-7-2-5-3 เช่นของแสง $[3-6) (8-1-4) (7) (2-5-3]$ และของกลิ่นเป็น $[3) (6-8-1) (4-7) (2-5-3]$ โดยเครื่องหมาย [ไม่สามารถเชื่อมได้เนื่องจากเป็นรูปแบบของการเดินแบบปิด

ขั้นตอนที่ 2 ในการเชื่อมต่อกันจุดจะทำการพิจารณาความสามารถในการเชื่อมต่อของจุดโดยมีข้อกำหนดว่าจะต้องไม่มีการเกิดเส้นทางย่อย หรือการปิดเส้นทางในการเดินทาง ซึ่งในการตัดจุดเชื่อมนั้นสามารถสร้างเส้นทางได้ดังแสดงใน (Table 3)

ขั้นตอนที่ 3 นำเส้นทางที่ได้แต่ละเส้นมาพิจารณาค่าของแสง และกลิ่น ในช่วงของการบินดังสมการ $x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha \epsilon_i$ และ Smell_i = Function (S_i)

Table 2 Range of random values and random values in Flying zone

link	Range of Random Value	Light1	Small1
1	0 - 0.125	-	0.073
2	0.125 - 0.25	0.189	-
3	0.25 - 0.375	-	-
4	0.375 - 0.50	-	0.478
5	0.50 - 0.625	0.611	-
6	0.625 - 0.75	0.732	0.698
7	0.75 - 0.875	-	-
8	0.875 - 1.00	-	-

ซึ่งในรูปแบบของฟังก์ชันของการดมกลิ่นกำหนดให้เป็น $Smell_i = x_i + S_i(x_j - x_i)$
 เมื่อ $S_i = \frac{1}{Dist_i}$ โดยที่ $Dist_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}$ และ
 $X_i = X \text{ axis} + \text{Random Value}$,
 $Y_i = Y \text{ axis} + \text{Random Value}$

Table 3 Transportation routes from SiRBA in 1st round of Insects No.1

	Routing	Fitness (km)	$L_i - L_j$
Initial	3-6-8-1-4-7-2-5-3	25.63	-
Light 1	3-6-4-1-8-7-2-5-3	21.00	-4.63
2	3-6-7-8-1-4-2-5-3	18.77	-6.86
3	3-6-7-4-1-8-2-5-3	25.64	0.01
Small 1	3-1-8-6-4-7-2-5-3	25.62	-0.01
2	3-1-8-6-7-4-2-5-3	23.39	-2.24
3	3-6-8-1-7-4-2-5-3	25.66	0.03
4	3-4-7-6-8-1-2-5-3	21.59	-4.04
5	3-4-7-1-8-6-2-5-3	25.15	-0.48
6	3-7-4-6-8-1-2-5-3	25.07	-0.56
7	3-7-4-1-8-6-2-5-3	26.37	0.74

ซึ่งทำการกำหนดค่าคงที่ในสมการดังนี้ $\beta_0 = 1, \gamma = 1, \alpha \in [0,1], \epsilon_i = (\text{rand}[0,1] - (1/2))$ และ Initial (X,Y) ในที่นี้ได้ตั้งไว้ $\in [0, 10]$ และ Random Value $\in [-1,1]$ ซึ่งสามารถหาค่าของแสง และกลิ่น ในเส้นทางต่างๆ ที่ได้ตั้งแสดงใน (Table 4) ตัวอย่างเช่นใน Light 1 เส้นทาง 3-6-4-1-8-7-2-5-3 มีค่า $L_j - L_i = -4.63$ ดังนั้น $x_i = 25.63 + \frac{-4.63}{e^{\frac{1}{100}}}(-4.63) + (0.332)(-0.458) = 20.838$

Table 4 Fitness of light and smell in 1st round of Insects No.1

	Routing	Fitness
Light 1	3-6-4-1-8-7-2-5-3	20.838
2	3-6-7-8-1-4-2-5-3	18.734
3	3-6-7-4-1-8-2-5-3	25.735
Small 1	3-1-8-6-4-7-2-5-3	25.629
2	3-1-8-6-7-4-2-5-3	25.242
3	3-6-8-1-7-4-2-5-3	25.633
4	3-4-7-6-8-1-2-5-3	24.893
5	3-4-7-1-8-6-2-5-3	25.565
6	3-7-4-6-8-1-2-5-3	25.573
7	3-7-4-1-8-6-2-5-3	25.804

ใน Small 1 มีค่าเป็น $Smell_i = 25.63 + (1/\sqrt{(7.33 + (-0.27))^2 + (3.87 + 0.11)^2})(-0.01) = 25.629$

ขั้นตอนที่ 4 นำค่า Fitness ของทั้งแสง และกลิ่นมาพิจารณาร่วมกันเพื่อเลือกเส้นทางที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะได้เส้นทาง 3-6-7-8-1-4-2-5-3 ซึ่งมีค่า Fitness เท่ากับ 18.734 กว่าจะแต่ละตัวจะทำการการสูดมโนแต่ละรอบได้แก่แสงหรือแรงสั่นสะเทือน 3 ครั้ง และดมกลิ่น 3 ครั้งโดยจะได้ 6 เส้นทางต่อกว่า 1 ตัวใน 1 รอบ ดังแสดงใน (Table 5)

เมื่อจำนวนกว้าง $n = 3$ จะได้เส้นทางที่ดีที่สุดในรอบที่ 1 ดังแสดงใน (Table 6)

ขั้นตอนที่ 5 จากนั้นนำค่า Fitness ที่ได้มาพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์จาก

$$|f(x_{Best\ t+1}) - f(x_{Best\ t})| / f(x_{Best\ t}) \leq \%error$$

Table 5 Routing from SiRBA in 1st round of Insects No.1

	Routing	Fitness (km)
Light1	3-6-7-8-1-4-2-5-3	18.77
Light2	3-6-2-7-8-1-4-5-3	20.86
Light3	3-7-4-1-8-6-2-5-3	26.37
Small1	3-4-7-6-8-1-2-5-3	21.59
Small2	3-6-2-7-4-1-8-5-3	27.47
Small3	3-6-7-4-1-8-2-5-3	25.64

Table 6 Routing from SiRBA in 1st round of Insects No.1-3

No.	Routing	Fitness	%
1	3-6-7-8-1-4-2-5-3	18.77	26.76
2	7-8-2-4-3-5-6-1-7	19.72	20.26
3	6-2-5-3-1-7-8-4-6	21.28	24.81

ว่าน้อยกว่า 0.5% ซึ่งจะได้ค่า $|18.77 - 25.63| / 25.63 = 0.2676 \approx 26.76\%$ ซึ่งมากกว่า 0.5% ($0.5\% < 26.76\%$) ที่ตั้งไว้ดังนั้นในรอบต่อไปของกว้างตัวที่ 1 จะยังอยู่ในช่วงของการบิน ซึ่งในรอบต่อไปกว้างทั้ง 3 ตัวจะอยู่ในช่วงของการบินอยู่ในรอบที่ 2 นำเส้นทางที่ดีที่สุดในรอบที่ 1 มาเป็นค่าเริ่มต้น (ถ้าเส้นทางที่ได้ในรอบที่ n มีระยะทางไกลกว่าเดิมให้แทนด้วยเส้นทางเริ่มต้นในรอบที่ n-1) และทำขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 5 ดังที่กล่าวมา ซึ่งในรอบต่างๆ จะได้ผลต่างของระยะทางที่ลดลงดังแสดงใน (Table 7) ซึ่งการพิจารณารูปแบบของการหาคำตอบจะมีทั้ง บริเวณของการบิน (flying zone) และบริเวณของการเดิน (walking zone) โดยมีความแตกต่างกันโดยการแทนสมการ $P_{Sirb}(t+1) = P_{Sirb} + (P_{tar} - P_{Sirb}) \cdot (1 - R \cdot R)$ ในการหาคำตอบแทนรูปแบบของแสง ส่วนของการดมกลิ่นจะมีรูปแบบการหาคำตอบแบบเดิม

Table 7 Transportation routes from SiRBA, Area zone of flying and walking in each round

round	Routing	Fitness	%	zone
1	3-6-7-8-1-4-2-5-3	18.77	26.76	flying flying
2	3-4-1-8-7-6-2-5-3	18.26	2.72	flying walking
3	3-5-2-6-7-8-1-4-3	18.26	0	flying walking
4	3-5-2-1-8-7-6-4-3	16.96	7.12	walking
5	3-6-7-8-1-2-5-4-3	16.96	0	
6	3-6-8-7-2-1-5-4-3	16.92	0.24	
7	3-4-5-6-8-7-2-1-3	16.10	4.85	

ในการหยุดการทำงานของการหาคำตอบของอัลกอริทึมของกว้างนั้นพิจารณาได้สองรูปแบบคือกำหนดจำนวนรอบในการหาคำตอบ เช่น round เป็น 50, 100 รอบ และพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ความต่างของค่าตอบที่ได้ในรอบที่ n และ n+1 จำนวน m ครั้ง เช่น m=5 ครั้ง หมายถึงถ้าค่าเปอร์เซ็นต์ความต่างเป็นศูนย์โดยไม่มีเส้นทางอื่นที่ทำให้ระยะทางลดลงจำนวน 5 ครั้งให้หยุดการทำงาน ในการหาคำตอบของการจัดเส้นทางแบบการสุ่มสลับตำแหน่งแบบ 3 จุด และ 4 จุดทำเช่นเดียวกับหลักการของ 3 opt โดยการสลับตำแหน่ง

แบบ 3 จุดสามารถสร้างชุดคำตอบของเส้นทางได้ $2^3 - 1 = 7$ เส้นทาง และการสลับตำแหน่งแบบ 4 จุด ได้ $2^4 - 1 = 15$ เส้นทางและทำการจัดเส้นทางแบบการสุ่มสลับตำแหน่งแบบ 3 จุด และ 4 จุด โดยใช้หลักการเดิมตั้งที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อพิจารณาจำนวนของการสลับตำแหน่ง และจำนวนของเส้นทางที่เกิดขึ้นของการหาคำตอบตามขั้นตอนของอัลกอริทึมของกว้าง ในกรณีของ 3 opt โดยในแต่ละรอบของการหาเส้นทางจะขึ้นอยู่กับจำนวนของกว้างที่กำหนด (n) โดยจำนวนเส้นทางเริ่มต้นจะเท่ากับจำนวนของกว้างที่กำหนด และจำนวนที่จะทำการสุ่มในแต่ละรอบ เช่นแสงหรือแรงสั่นสะเทือน 3 ครั้ง และดมกลิ่น 3 ครั้งโดยจะได้ 6 เส้นทางที่ดีที่สุดของเส้นทางย่อยในการเดินทางในการสลับตำแหน่ง เท่ากับ 14 เส้นทาง ต่อแสงหรือแรงสั่นสะเทือน 1 ครั้ง และดมกลิ่น 1 ครั้ง ต่อกว้าง 1 ตัวใน 1 รอบ ดังนั้น เมื่อใช้กว้าง 3 ตัวจะให้ $3 \times 6 = 18$ เส้นทางต่อ 1 รอบ และมีการสุ่มจำนวน 3 ครั้งต่อการตัด 3 เส้นทางต่อ 1 เส้นทาง ดังนั้นจะต้องทำการสุ่มเท่ากับ $3 \times 3 \times 6 = 54$ ครั้งต่อ 1 รอบ สำหรับ 3 opt เมื่อพิจารณาถึงจำนวนเส้นทาง และจำนวนของการสุ่มตำแหน่งที่เกิดขึ้นจนเข้าสู่เส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับตัวอย่างที่ยกมาสามารถแสดงได้ดัง (Table 8)

Table 8 Number of routing and random in SiRBA process for TSP example

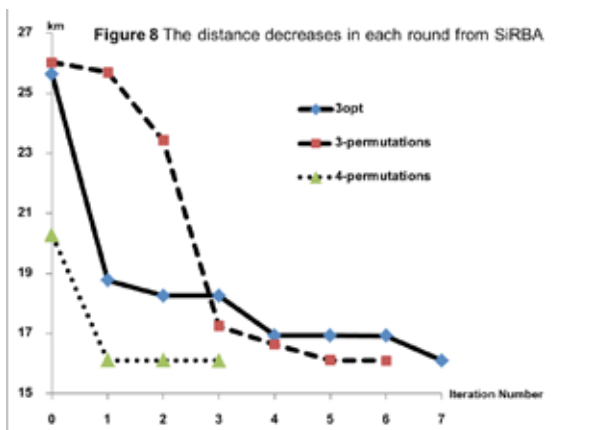
	Iteration Number	Number of Routing	Number of random
3-opt	7	126	378
3-permutations	6	108	324
4-permutations	3	54	216

ผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมของกว้างกับตัวแบบปัญหาการจัดเส้นทางแบบ TSP (Symmetric TSP) นั้นสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเคลื่อนที่ในการใช้เนบอร์ชุด แบบ 3 opt ใช้รอบในการหาคำตอบที่ 7 รอบ และแบบการสุ่มสลับตำแหน่งแบบ 3 จุด ใช้รอบในการหาคำตอบที่ 6 รอบ และ โดยการทำแบบ 4 จุด จะใช้รอบในการหาคำตอบอยู่ที่ 3 รอบ ดังแสดงใน (Table 9) และ (Figure 8) และผลของเส้นทางที่ได้จาก SiRBA จะให้คำตอบของเส้นทางที่สั้นที่สุดที่ 16.10 กิโลเมตร ซึ่งถ้าเทียบกับวิธีการจำลองการอบเหนียว ในการแก้ปัญหาจะสามารถลดระยะทางลงได้อีก 0.01 กิโลเมตร จากระยะทาง 16.11 กิโลเมตร ซึ่งสามารถได้เส้นทางใหม่ประหยัดกว่าเส้นทางเก่า 0.08 กิโลเมตรคิดเป็น 0.49% จากเส้นทางเก่า

Table 9 Transportation routes from SiRBA

	Routing	Fitness (km)	Iteration Number
SiRBA			
3-opt	3-4-5-6-8-7-2-1-3	16.10	7
3-permutations	7-8-6-5-4-3-1-2-7	16.10	6
4-permutations	1-2-7-8-6-5-4-3-1	16.10	3
SA*	1-2-7-8-6-5-3-4-1	16.11	50

(*ศศินภา และคณะ. 2555)⁹



สรุปผลการทดลอง

ลักษณะรูปแบบของการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต เช่น การหาอาหาร การสืบพันธุ์ การหลีกเลี่ยงจากศัตรู เป็นต้น มีรูปแบบพฤติกรรมที่เป็นขั้นตอนสามารถนำมาเขียนเป็นหลักการของอัลกอริทึมได้ ซึ่งในบทความนี้ได้นำรูปแบบของพฤติกรรมของกวางในการเคลื่อนที่เข้าหา แสงไฟอาหาร กวางอื่นเพื่อทำการสืบพันธุ์ และการหลีกเลี่ยงจากศัตรู มาสร้างเป็นอัลกอริทึมของกวาง SiRBA เพื่อใช้ในการหาค่าสูงสุด ค่าต่ำสุดของฟังก์ชันและนำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ซึ่งหลักการเคลื่อนที่ที่พิจารณาจากการเคลื่อนที่เข้าหา แสง กับกลับโดยการบินในช่วงที่อยู่ห่างจากคำตอบ และการสั่นสะเทือนกับกลับโดยการเดินในช่วงที่อยู่ใกล้คำตอบโดยได้ทดสอบกับฟังก์ชันกำลังสอง และตัวแบบปัญหาการจัดเส้นทางแบบ TSP (Symmetric TSP) นั้นการหาคำตอบโดยใช้ SiRBA สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

1. M. K. A. Ariyaratne, T. G. I. Fernando, 2014, A Comparative Study on Nature Inspired Algorithms with Firefly Algorithm, Int. J. Engineering and Technology Vol. 4, No. 10, pp. 611-617.
2. N. Sureja, 2012, New Inspirations in Nature: A Survey, Int. J. Computer Applications & Information Technology Vol. I, Issue III, November, pp. 21-24.
3. Pisuth Ek-Amnuay. 2007, The Beetles of Thailand 2nd, Siam Insect Zoo, Chiang Mai.
4. X. S. Yang, 2008, Nature-Inspired Meta heuristic Algorithm, Luniver press, pp. 83-96.
5. X. S. Yang, 2010, Firefly Algorithm: Stochastic Test Functions and Design Optimization, Int. J. Bio-Inspired Computation Vol. 2, No. 2, pp.78-84
6. W. T. Pan, 2012, A new Fruit Fly Optimization Algorithm: Taking the financial distress model as an example, Int. J. Knowledge-Based Systems 26 pp. 69-74.
7. J. Q. James, O. K. Victor, 2013, A Social Spider Algorithm for Global Optimization, Technical Report No.TR-2003-004, Dept. of Electrical & Electronic Engineering, The University of Hong Kong.
8. S. N. Kumbharana, G. M. Pandey, 2013, Solving Travelling Salesman Problem using Firefly Algorithm, Int. J. Research in Science & Advanced Technologies Issue-2, Volume-2, pp. 053-057.
9. ศศินภา รูปงาม และคณะ, 2555, การจัดเส้นทางขนส่งแคบหมูร้านแคบหมูพอบุญศรีโดยวิธีการเลียนแบบการอบอุ่น, โครงการงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.