การประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสำหรับปัญหาการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์

An Application of Ant Colony Algorithm in Printed Circuit Board Drilling Problem

อุดม จันทร์จรัสสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ การใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดในการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์สามารถช่วยให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นได้ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำเอาขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดมาใช้ในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับปัญหาการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์ โดยอาศัยหลักการเลียนแบบธรรมชาติในการหาอาหารของกลุ่มมด ผู้วิจัยได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแก้ปัญหานี้โดยการทดลองจากกรณีตัวอย่าง และได้นำเสนอผลการทดลองจากกรณีตัวอย่างอื่นๆโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้ เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการใช้วิธีนี้

คำสำคัญ:ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด, ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย, ขั้นตอนวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด

Abstract

In printed circuit board (PCB) making industry, productivity can be improved significantly by providing a shortest path for the drilling sequence. In this paper, we presented an ant colony optimization algorithm which mimics the nature of ants in finding food to find the shortest path for the PCB drilling problem. In order to provide the best parameters for solving this problem, a sequence of experiments were performed by using our test instance. Computational results of additional instances were also presented to show the effectiveness of this method by using our best obtained parameters.

Key words: ACO, Ant Colony, Algorithm, TSP, Nearest Neighbor

1. บทนำ

แผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) เป็นแผงวงจรอีเล็คทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่รองรับและเชื่อมต่ออุปกรณ์อีเล็คทรอนิกส์เพื่อประกอบเป็นวงจร แผ่นวงจรพิมพ์ถูกนำมาใช้แทนการเชื่อมต่อวงจรด้วยสายไฟซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อน กระบวนการหนึ่งในการทำแผ่นวงจรพิมพ์คือการเจาะรูบนแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อเป็นที่ใส่อุปกรณ์อีเล็คทรอนิกส์ การวางตำแหน่งของอุปกรณ์และการกำหนดตำแหน่งของรูเจาะบนแผ่นวงจรพิมพ์จะถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรมออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ เนื่องจากจำนวนรูที่ต้องเจาะมีเป็นจำนวนมาก การเจาะรูจะใช้เครื่องเจาะรูอัตโนมัติซึ่งเชื่อต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้หัวเจาะวิ่งไปยังตำแหน่งของรูที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมไว้ แล้วทำการเจาะรูทีละรูตามลำดับ ดังนั้นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวเจาะจึงถูกกำหนดโดยตำแหน่งและลำดับของรูที่เจาะ และเวลาที่ใช้ในการเจาะรูทั้งหมดจะแปรผันโดยตรงกับระยะการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจึงเป็นวิธีหนึ่งในการลดเวลาในการผลิต ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตโดยเฉพาะในกรณีที่มีการผลิตเป็นจำนวนมาก

โปรแกรมออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์บางโปรแกรมได้รวมเอาฟังก์ชันในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดเข้าไว้ในตัวโปรแกรม อย่างไรก็ตาม การหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (Optimal Shortest Path) เป็นเรื่องที่ยากและต้องใช้เวลาในการประมวลผลนานเนื่องจากรูที่เจาะมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้น วิธีที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติจึงเป็นขั้นตอนวิธีแบบฮิวริสติก (Heuristic Algorithms) ซึ่งเป็นวิธีแก้ปัญหาแบบสามัญสำนึก และผลลัพธ์ที่ได้อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดเสมอไป ตัวอย่างของขั้นตอนวิธีแบบฮิวริสติกได้แก่ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) การค้นหาแบบทาบู (Tabu Search) รวมถึงขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization) ซึ่งผู้วิจัยได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย

ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดหรือเรียกชื่อย่อว่า ACO ได้ถูกคิดค้นขึ้นโดย M.Dorigo [1] ในช่วงต้นทศวรรศ 1990 สำหรับแก้ปัญหาเชิงการจัด (Combinatorial Problems) ACO จัดอยู่ในประเภทของขั้นตอนวิธีแบบเมต้าฮิวริสติกส์ (Metaheuristic) โดยใช้หลักการเลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของกลุ่มมด ซึ่งมดจะออกหาอาหารเป็นกลุ่มและมีการสำรวจเส้นทางแบบสุ่ม เมื่อมดตัวหนึ่งพบแหล่งอาหาร มันจะทิ้งสารเคมีที่เรียกว่าฟีโรโมน (Pheromone) ไว้ระหว่างทางกลับไปสู่รังเพื่อให้มดตัวอื่นๆสามารถตามรอยไปยังแหล่งอาหารได้ ฟีโรโมนเป็นสารระเหย ดังนั้น มดทุกตัวที่นำอาหารกลับไปสู่รังจะปล่อยฟีโรโมนเสริมบนเส้นทางที่เดินผ่านเพื่อไม่ให้ฟีโรโมนจางหายไป ในกรณีที่มีมดหลายตัวพบแหล่งอาหารแหล่งเดียวกันและเลือกใช้เส้นทางกลับไปสู่รังที่ต่างกัน ความเข้มข้นของสารฟีโรโมนบนเส้นทางที่สั้นที่สุดจะมีความเข้มข้นสูงสุดเนื่องจากมีจำนวนมดที่เดินผ่านบนเส้นทางนั้นมากที่สุด เมื่อเวลาผ่านไป ฟีโรโมนบนเส้นทางที่ยาวกว่าก็จะค่อยๆจางหายไปและเส้นทางนั้นจะถูกละทิ้งไปโดยปริยาย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อหาเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับแก้ปัญหาการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์ขึ้นด้วยภาษา C++ โดยได้นำหลักการของขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดมาใช้ การนำเสนองานวิจัยในบทความนี้ประกอบด้วยส่วนที่เหลือ 3 ส่วน ในส่วนที่ 2 เป็นการอธิบายหลักการทำงานของขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดรวมถึงการประยุกต์ใช้กับปัญหาการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์ ในส่วนที่ 3 เป็นการทดลองโปรแกรมกับตัวอย่างปัญหาและนำเสนอผลการทดลอง และส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปผลงานวิจัย

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ปัญหาการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์

ปัญหาการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์เป็นการหาลำดับของการเจาะรูจากเซตของรูที่กำหนดให้เพื่อให้ระยะการเคลื่อนที่รวมของหัวเจาะที่วิ่งจากรูหนึ่งไปยังอีกรูหนึ่งมีค่าน้อยที่สุด โดยรูแต่ละรูจะถูกกำหนดตำแหน่งโดยคู่อันดับ (x, y) ซึ่งอ้างอิงจากตำแหน่ง $(0,0)$ ดังนั้นระยะการเคลื่อนที่ของหัวเจาะจากรู i ไปยังรู j สามารถหาได้จาก

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \qquad (1)$$

ปัญหาการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์จัดเป็นปัญหาที่อยู่ในประเภทเดียวกันกับปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Travelling Salesman Problem) โดยจะต่างกันที่เส้นทางการเดินของหัวเจาะจะไม่เป็นวงรอบ เนื่องจากหัวเจาะไม่จำเป็นต้องกลับมายังตำแหน่งรูแรกหลังจากที่เจาะทุกรูเสร็จเรียบร้อยแล้ว

2.2 ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งหนึ่งที่สำคัญในการใช้ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด คือการกำหนดค่าฟีโรโมนเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสร้างคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) ข้อมูลฟีโรโมนจะถูกเก็บอยู่ในรูปของเมทริกซ์ขนาด $n \times n$ โดย n คือจำนวนรูทั้งหมด เมทริกซ์นี้เรียกว่าฟีโรโมนเมทริกซ์ซึ่งเขียนแทนด้วย $[\tau_{ij}], i, j \in \{1, \ldots, n\}$ ฟีโรโมนเมทริกซ์นี้จะถูกใช้ในการหาค่าความน่าจะเป็นในการเลือกรู j ต่อจากรู i โดยในเริ่มแรก ค่าฟีโรโมนในฟีโรโมนเมทริกซ์จะถูกกำหนดให้เป็นค่าเดียวกันสำหรับทุกๆ ค่าของ τ_{ij} ที่ $i \neq j$ รหัสเทียมของขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดได้แสดงไว้ใน Algorithm 1

Algorithm 1 PCBD-ACO

```
กำหนดค่าเริ่มต้นของฟีโรโมน
repeat
  for มด k ∈ {1,...,m}        [การสร้างคำตอบที่เป็นไปได้]
    S := {1,...,n}             [เซตของรูที่ยังไม่ถูกเลือก]
    เลือกรู i ซึ่งอยู่ใกล้ตำแหน่ง (0,0) มากที่สุดจาก S
    S := S − {i}
    repeat
      เลือกรู j ∈ S ด้วยค่าความน่าจะเป็น p_ij
      S := S − {j}
      i := j
    until S = ∅
  endfor
  forall i, j do
    τ_ij := (1 − ρ) · τ_ij      [การลดฟีโรโมน]
  endfor
  forall i, j ในขั้นตอนวนซ้ำที่ได้คำตอบที่ดีที่สุด do
    τ_ij := τ_ij + Δ           [การเพิ่มฟีโรโมน]
  endfor
until บรรลุเกณฑ์สิ้นสุดการทำงาน
```

การสร้างคำตอบที่เป็นไปได้

คำตอบที่เป็นไปได้ของปัญหาการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์คือการกำหนดลำดับของการเจาะรูจากรูที่มีอยู่ทั้งหมด โดยแต่ละรูจะถูกเจาะเพียงครั้งเดียวเท่านั้น โดยปกติ ก่อนที่จะทำการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์แต่ละครั้ง หัวเจาะจะถูกเลื่อนไปอยู่ที่ตำแหน่งอ้างอิง (0,0) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงกำหนดให้รูที่เจาะรูแรกเป็นรูที่อยู่ใกล้ตำแหน่งอ้างอิงมากที่สุด การกำหนดลำดับของการเจาะรู สามารถทำได้โดยวิธีการสุ่มเลือกรูออกจากเซตของรูทั้งหมดที่กำหนดให้จนกระทั่งไม่มีรูเหลืออยู่ในเซต การสุ่มเลือกรูจะถูกกำหนดโดยค่าความน่าจะเป็นที่ประกอบด้วยปัจจัยสองอย่างคือ ค่าความเข้มข้นของฟีโรโมน τ_{ij} และทัศนวิสัยของมด $\eta_{ij} := \lambda / d_{ij}$ โดย λ เป็นค่าที่กำหนดโดยผู้ใช้และ d_{ij} เป็นระยะทางจากตำแหน่ง i ไปยังตำแหน่ง j ตามสมการ (1) สมมติว่ามดตัวหนึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง i ค่าความน่าจะเป็นที่มดตัวนั้นจะเลือกไปยังตำแหน่ง j จะถูกกำหนดโดย

$$p_{ij} := \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{k \in S} \tau_{ik}^{\alpha} \cdot \eta_{ik}^{\beta}} \quad \forall j \in S \tag{2}$$

โดย α และ β เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดอิทธิพลของการเลือกตำแหน่งที่มาจากความเข้มข้นของฟีโรโมนและทัศนวิสัยของมดตามลำดับ

การปรับฟีโรโมน

ในแต่ละรอบการวนซ้ำจะใช้มดทั้งหมด m ตัวในการหาเส้นทาง เส้นทางที่ได้จากมดทั้งหมดจะถูกนำไปประเมินเพื่อหาระยะทางรวม โดยเส้นทางที่สั้นที่สุด (เขียนแทนด้วย x^*) ในบรรดา m เส้นทางจะถูกคัดเลือกมาเพื่อใช้ในการปรับค่าฟีโรโมน การปรับค่าฟีโรโมนจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ การลดค่าหรือการระเหย (Evaporation) ของฟีโรโมนและการเพิ่มค่าฟีโรโมน (Intensification)

การลดค่าฟีโรโมนจะกระทำกับค่าของฟีโรโมนทุกๆค่าโดยลดเป็นสัดส่วนที่กำหนดโดยอัตราการระเหย $\rho \in (0,1)$ ดังนี้

$$\tau_{ij} := (1 - \rho)\tau_{ij} \quad \forall i, j \in \{1, \ldots, n\}$$

ส่วนการเพิ่มค่าฟีโรโมนจะกระทำเฉพาะกับค่าฟีโรโมนที่อยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุด (x^*) ดังนี้

$$\tau_{ix^*(i)} := \tau_{ix^*(i)} + \Delta \quad \forall i \in \{1, \ldots, n\}$$

โดย Δ เป็นปริมาณฟีโรโมนที่เพิ่มขึ้นซึ่งถูกกำหนดโดยผู้ใช้

เกณฑ์สิ้นสุดการทำงาน

การกำหนดเกณฑ์สิ้นสุดการทำงานของขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสามารถทำได้หลายวิธี สำหรับในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีแบบผสมโดยการจำกัดรอบการวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซ้ำบวกกับการตรวจสอบสถานะของการวนซ้ำ กล่าวคือ หากคำตอบที่ได้ในแต่ละรอบการวนซ้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงติดต่อกันเกินกว่าจำนวนครั้งที่กำหนด ก็จะให้สิ้นสุดการทำงาน

3. การทดลองและผลการทดลอง

3.1 ตัวอย่างปัญหา

ตัวอย่างปัญหาที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย 7 กรณีตัวอย่าง โดยกรณีตัวอย่าง cp_drill เป็นตัวอย่างที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นจากข้อมูลวงจรจริง ส่วนกรณีตัวอย่างที่เหลือเป็นตัวอย่างที่สร้างขึ้นจากวงจรที่มาพร้อมกับโปรแกรมออกแบบวงจร KiCad ข้อมูลของตัวอย่างปัญหาจะอยู่ในรูปแบบของรายการตำแหน่งรูที่เจาะ โดยกำหนดไว้เป็นคู่อันดับ (x, y) ในกรณีตัวอย่าง cp_drill หน่วยที่ใช้จะเป็น 1/10,000 ของนิ้ว ส่วนกรณีตัวอย่างที่เหลือมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร รายชื่อของกรณีตัวอย่างและจำนวนรูทั้งหมดของแต่ละกรณีตัวอย่างได้สรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1: กรณีตัวอย่าง

กรณีตัวอย่าง	จำนวนรู
cp_drill	137
carte_test	272
ecc83-pp	33
interf_u	400
kit-dev-coldfire-xilinx_5213	523
pic_programmer	264
sonde_xilinx	81
video	1727

3.2 การทดลอง

การทดลองประกอบด้วยสองส่วน ในส่วนที่หนึ่งเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดที่เหมาะสมสำหรับแก้ปัญหาการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้กรณีตัวอย่าง cp_drill ในส่วนที่สองเป็นการแก้กรณีตัวอย่างทั้งหมดโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองในส่วนที่หนึ่ง ในแต่ละการทดลองจะทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง โดยจำกัดจำนวนรอบการวนซ้ำสูงสุดไว้ที่ 200 รอบและตั้งเงื่อนไขสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมไว้หากคำตอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นจำนวน 5 รอบการวนซ้ำติดต่อกัน

การทดลองส่วนที่หนึ่ง

เนื่องจากพารามิเตอร์มีทั้งหมด 6 ตัว ผู้วิจัยจึงได้แบ่งการทดลองออกเป็นการทดลองย่อยทั้งหมด 6 การทดลอง โดยในแต่ละการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เพียงตัวเดียวเท่านั้น โดยพารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนในการทดลองที่ 1 ถึง 6 มีดังนี้คือ 1) จำนวนมดในแต่ละรอบการวนซ้ำ (m) 2) ค่าสัมประสิทธิ์ทัศนวิสัยของมด (λ) 3) อิทธิพลของฟีโรโมน (α) 4) อิทธิพลของทัศนวิสัย (β) 5) อัตราการระเหย (ρ) และ 6) ปริมาณฟีโรโมนที่เพิ่มขึ้น (Δ) รายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละการทดลองได้สรุปไว้ในตารางที่ 2 สาเหตุที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่คงที่ของแต่ละการทดลองไม่เท่ากันในตารางที่ 2 เนื่องจากผู้วิจัยได้ใช้วิธีลองผิดลองถูก และได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ในระหว่างการทดลอง

ตารางที่ 2: ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละการทดลอง

การทดลอง	m	λ	α	β	ρ	Δ
1	ปรับ m	50	0.15	5	0.1	5
2	200	ปรับ λ	0.1	5	0.1	0.2
3	100	50	ปรับ α	5	0.1	0.2
4	100	50	0.1	ปรับ β	0.1	0.2
5	200	5000	0.1	5	ปรับ ρ	0.2
6	100	50	0.1	5	0.1	ปรับ Δ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

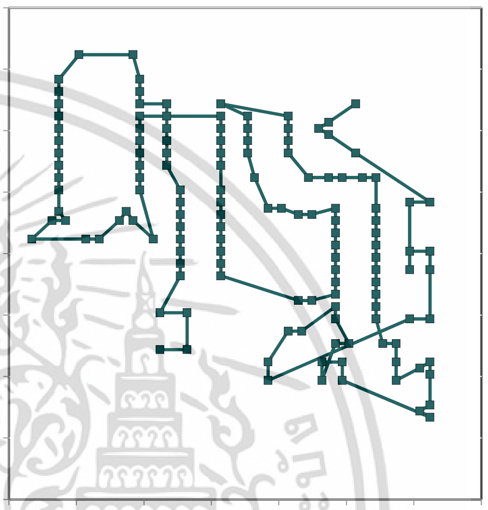
ตารางที่ 3: ค่าเฉลี่ยของระยะทางรวมที่ได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์ในแต่ละการทดลองสำหรับกรณีตัวอย่าง cp_drill

พารามิเตอร์ที่แปรผัน	ระยะทางรวมเฉลี่ย(ค่าพารามิเตอร์)						
m	244739(10)	2403158(20)	235806(50)	232103(100)	228040(200)	232600(500)	231067(1000)
λ	228414(2)	228301(10)	229317(50)	229219(200)	229497(1000)	227375(5000)	228985(10000)
α	254769(0.005)	244788(0.01)	227357(0.05)	229882(0.1)	233473(0.2)	241167(0.5)	248183(1)
β	955900(0.1)	824368(0.2)	469652(0.5)	331805(1)	259383(2)	230178(5)	229118(10)
ρ	227473(0.1)	227086(0.2)	225586(0.5)	265937(1)	276185(2)	277199(5)	270125(10)
Δ	231397(0.1)	230925(0.2)	228932(0.5)	230548(1)	232203(2)	230305(5)	228940(10)

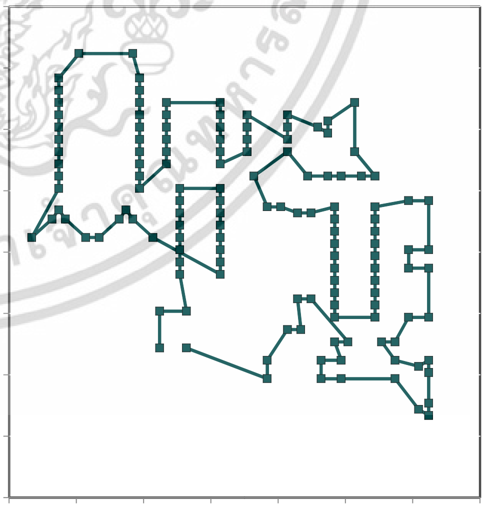
ตารางที่ 3 เป็นการแสดงผลการทดลองโดยนำเสนอเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองทั้ง 10 ครั้ง ในแต่ละการทดลอง ค่าพารามิเตอร์ที่แปรผันจะถูกกำกับไว้ในวงเล็บดังที่เห็นในตาราง จากผลการทดลองในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลสูงสุดคือ β หากค่าที่ใช้ไม่เหมาะสม จะทำให้คำตอบที่ได้ห่างไกลจากค่าที่ดีที่สุดมาก แต่โดยภาพรวม ผลลัพธ์ที่ได้ส่วนใหญ่ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างดีเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีฮิวริสติกของโปรแกรมออกแบบวงจรสำเร็จ Eagle ซึ่งให้ค่าระยะทางรวมเท่ากับ 252331 และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากขั้นตอนวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (Nearest Neighbor Algorithm) ซึ่งให้ค่าระยะทางรวมเท่ากับ 259148

การเพิ่มจำนวนมดในแต่ละรอบการวนซ้ำอาจเพิ่มโอกาสในการค้นพบเส้นทางที่ดีกว่า แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้เวลาในการประมวลผลนานขึ้นด้วย จากการทดลองพบว่า มดจำนวน 100 ถึง 200 ตัวในแต่ละรอบการวนซ้ำให้ผลลัพธ์ที่ดี และการใช้จำนวนมดมากเกินไปไม่ได้ช่วยให้ผลลัพธ์ดีขึ้น

รูปที่ 1 และ 2 เป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากกรณีตัวอย่าง cp_drill ระหว่างเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวเจาะที่จัดลำดับรูเจาะด้วยขั้นตอนวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (รูปที่ 1) และเส้นทางที่จัดลำดับรูเจาะด้วยขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด (รูปที่ 2) โดยระยะทางรวมได้ลดลงจาก 259148 เป็น 220814 หลังจากจัดด้วยขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด



รูปที่ 1: ตัวอย่างลำดับการเจาะรูที่จัดโดย NNB สำหรับกรณีตัวอย่าง cp_drill



รูปที่ 2: ตัวอย่างลำดับการเจาะรูที่จัดโดย ACO สำหรับกรณีตัวอย่าง cp_drill

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4: ผลการทดลอง

Instance	NNB	ACO Average	ACO Best
carte_test	1397.87	1249.41	1223.41
ecc83-pp	261.09	224.10	224.10
interf_u	1646.94	1570.17	1546.83
kit-dev-coldfire-xilinx_5213	2130.85	1943.40	1888.77
pic_programmer	1708.17	1398.28	1370.68
sonde_xilinx	561.871	492.70	481.20
video	5831.12	5582.89	5513.38

การทดลองส่วนที่สอง

ในการทดลองส่วนที่สอง ผู้วิจัยได้ทำการทดลองกับกรณีตัวอย่างที่เหลือโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้คือ $m = 100$, $\lambda = 5000$, $\alpha = 0.1$, $\beta = 10$, $\rho = 0.1$, และ $\Delta = 0.2$ ผลการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 โดยเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด ในแต่ละกรณีตัวอย่าง จะแสดงผลการทดลองไว้ทั้งหมด 3 ค่าคือ ระยะทางรวมที่จัดโดยขั้นตอนวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (NNB) ระยะทางรวมเฉลี่ยที่จัดโดยขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด (ACO Average) และระยะทางรวมที่ดีที่สุดที่ได้จากขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดจากการทดลองซ้ำ (ACO Best) จากผลการทดลองในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า การจัดลำดับรูเจาะด้วยขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดสามารถช่วยลดระยะการเคลื่อนที่ของหัวเจาะได้อย่างมาก ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าค่าที่ได้จากขั้นตอนวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดในกรณีตัวอย่างทั้งหมด

4. สรุป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำเอาขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการเจาะรูของแผ่นวงจรพิมพ์ โดยได้ทดสอบขั้นตอนวิธีนี้กับกรณีตัวอย่างต่างๆ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแก้ปัญหานี้ และได้เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดเป็นวิธีที่มีประสิทธิผลในการแก้ปัญหาการเจาะรูแผ่นวงจรพิมพ์ และให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าค่าที่ได้จากขั้นตอนวิธีเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Dorigo, M. *Optimization, learning and natural algorithms.* Ph.D. Thesis, Dipartimento di elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1992.

[2] Marco Dorigo and Christian Blum. *Ant colony optimization: A survey*. Theoretical Computer Science, 334:243-278, 2005.

[3] Marco Dorigo and Gianni Di Caro. *Ant colony optimization: A new meta-heuristic*. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, IEEE Press, pages 1470-1477, 1999.

[4] Jun Ouyang and Gui-Rong Yan. *A multi-group ant colony system algorithm for tsp*. Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybermetics, 1:117-121, 2004.

[5] Jinhui Yang, Xiaohu Shi, Maurizio Marchese, and Yanchun Liang. *An ant colony optimization method for generalized tsp problem*. Progress in Natural Science, 18:1417-1422, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้