

การหาเส้นทางที่เหมาะสมในสภาพแวดล้อมที่มีอันตรายด้วยแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay

Optimal Path in a Hostile Environment by Using Delaunay Triangulation

ชนานพ ลิ้มสุวรรณโรจน์¹, เทียนสิริ เหลืองวิไล², วีระพล วิลามาศ³, สมภูมิ มีชาวนา⁴, สุภาวดี ลีลายุทธ์⁵ และ
วิศรุต คล้ายแจ้ง⁶

Tananop Limsuwanroj¹, Thiansiri Luangwilai², Weerapol Welamas³, Sompoom Meechown⁴,
Supavadee Leelayuth⁵ and Witsarut Kraychang⁶

Received: May 10, 2023

Revised: June 16, 2023

Accepted: June 23, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้ มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอและแสดงตัวอย่างแนวทางการใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ในการวิเคราะห์เส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการปฏิบัติการทางอากาศ เส้นทางที่เหมาะสมในงานวิจัยชิ้นนี้ คือ เส้นทางที่สั้นที่สุดที่สามารถหลีกเลี่ยงการบินเข้าไปยังบริเวณที่เสี่ยงต่อการถูกตรวจจับด้วยระบบเรดาร์ข้าศึก

¹อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Tananop.lims@gmail.com

²อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Thiansiri.L@gmail.com

³อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Welamas@gmail.com

⁴อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Sompoom96@gmail.com

⁵อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Supavadee_k@rtaf.mi.th

⁶อาจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Lecturer, Academic Faculty Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Email: Witsarut_popmath@hotmail.com

และการชนเข้ากับภูมิประเทศ โดยขอบเขตงานนี้จะอธิบายการประยุกต์ใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay แต่ละขั้นตอนโดยละเอียด อีกทั้งยังอธิบายประสิทธิภาพและข้อจำกัดของแนวคิดนี้ด้วย ตัวอย่างของแนวคิดที่นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้นั้น จะถูกประยุกต์บนแผนที่สามมิติที่จำลองสร้างขึ้นมา กระบวนการของแนวคิดที่นำเสนอ จะเริ่มต้นจากการสุ่มจุดยอดของสามเหลี่ยม Delaunay บนแผนที่สามมิติ จากนั้นดำเนินการสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay ขึ้นมา โดยเส้นขอบของโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay จะถูกพิจารณาเป็นเส้นทางที่สามารถใช้บินได้ของอากาศยานบนพื้นที่สามมิติ จากนั้นพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการถูกตรวจจับจากระบบเรดาร์ข้าศึกหรือการถูกโจมตีจากข้าศึกจะถูกตัดออกจากโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay หลังจากนั้นโครงข่ายที่เหลืออยู่จะถูกนำมาคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากจุดเริ่มต้นไปยังเป้าหมายด้วยอัลกอริทึมของไดจ์สตรา (Dijkstra's Algorithm) และในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการปรับเส้นทางการบินให้ราบเรียบขึ้นด้วยสมการพหุนาม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาชิ้นนี้ แสดงให้เห็นว่าแนวคิดการประยุกต์ใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ในการใช้หาเส้นทางการบินที่เหมาะสมในการปฏิบัติการกิจของอากาศยานนั้น มีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งกระบวนการเหล่านี้ยังสามารถใช้สำหรับการวางแผนเส้นทางการบินได้อย่างดีและสามารถต่อยอดในปัญหาอื่น ๆ สำหรับการวางแผนเส้นทางของทหารเรือ ทหารบก หรือ แม้กระทั่งพลเรือนได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ระบบเรดาร์, แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay, อัลกอริทึมของไดจ์สตรา, เส้นทางที่เหมาะสม

Abstract

This study aims to propose and illustrate the process of using the Delaunay triangulation to find an optimal path for aerial operation. The optimal path is defined as the shortest path when avoiding all risks of enemy radar detection and terrain collision. The scope of this study is to demonstrate details of this process step by step as well as its effectiveness and limitation. The demonstration is the applied synthesis 3d terrain. The proposed process begins with randomly locating the vertex of the Delaunay triangulation. Then selected vertexes are elements to generate the Delaunay triangulation. The edges of the Delaunay triangulation are considered as available fly paths for aircraft over the 3D terrain. Secondly, the edges regard a high risk of enemy radar detection and terrain collision to be removed from the available edge paths. Dijkstra's algorithm is the tool to analyze the remaining edges for the shortest path. The last step is to smoothen the shortest path by using polynomial interpolation of the vertexes from the previous step. The results have shown that the idea of using the Delaunay triangulation for the optimization path is effective and robust. It is possible for path planning for aerial operations in various cases. This study can also be extended to the Navy, Army and civilian path planning problems.

Keywords: Radar, Delaunay Triangulation, Dijkstra's algorithm, Optimal Path.

1. บทนำ

ในอดีตนั้นการตัดสินใจเลือกเส้นทางในสมรภูมินั้นจะขึ้นอยู่กับ การตัดสินใจของผู้บังคับบัญชาไม่ว่าจะเป็นการรบบนพื้นดิน การรบทางอากาศ หรือ การรบทางทะเล โดยการตัดสินใจเลือกเส้นทางนั้นจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความรู้และประสบการณ์ของผู้บังคับบัญชา แต่ในปัจจุบันนั้นสมรภูมิมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เพราะองค์ประกอบของสมรภูมินั้นมีเพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นระบบเรดาร์ภาคพื้น สถานีจรวดต่อสู้อากาศยาน อากาศยานของฝ่ายศัตรู ระบบเตือนภัยล่วงหน้า ระบบเรดาร์เคลื่อนที่ ทำให้การตัดสินใจเลือกเส้นทางในการปฏิบัติการกิจจากประสบการณ์อย่างเดียวนั้นเป็นเรื่องที่ยากมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีแนวทางหรืออัลกอริทึมในการช่วยวิเคราะห์หาเส้นทางที่เหมาะสมในการปฏิบัติการกิจ [1-3] เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาในช่วงระยะเวลาคับขัน เพื่อลดความผิดพลาดในการปฏิบัติการกิจให้น้อยลง

โดยอัลกอริทึมในการหาเส้นทางที่เหมาะสมนั้น ได้มีการพัฒนาขึ้นมาหลายรูปแบบ [4] เพื่อให้เหมาะสมกับโจทย์ของแต่ละปัญหา ตัวอย่างเช่น อัลกอริทึมแบบเรย์ลไทม์ในงานวิจัยของ Bruce and Veloso (2002) [5] ในการหาเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ แต่อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมแบบเรย์ลไทม์นั้นจะเป็นการตัดสินใจแบบเป็นระยะๆ ทำให้ไม่สามารถเห็นเส้นทางทั้งหมด อาจจะทำให้เกิดการผิดพลาดและนำอากาศยานไปในจุดที่ไม่มี

เส้นทางที่ปลอดภัยต่อไปได้ อัลกอริทึมอีกรูปแบบคือการวิเคราะห์เส้นทางทั้งหมดตั้งแต่ต้น เช่น อัลกอริทึมที่ใช้การประยุกต์ของแผนภาพไวโรนอย [6-7] ควบคู่กับอัลกอริทึมอย่างอื่นๆ โดยตัวอย่างการนำไปใช้ในการหาเส้นทางเดินให้หุ่นยนต์หรือเครื่องจักร เช่น งานวิจัยของ Garrido and Moreno (2015) [8], งานวิจัยของ Al-Dahhan and Schmidt (2019) [9] และงานวิจัยของ Özcan and Yaman (2019) [10] อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมแผนภาพไวโรนอยนั้น มีข้อจำกัดที่สามารถใช้ได้ทั้งสองมิติเท่านั้น ทำให้การประยุกต์ใช้ในการหาเส้นทางของอากาศยานในสามมิตินั้นเป็นไปได้ยาก

ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอแนวคิดในการประยุกต์ใช้แผนภาพโครงข่ายที่สร้างจากชิ้นมาจากอัลกอริทึมสามเหลี่ยม Delaunay [11] ที่มีขีดความสามารถสร้างโครงข่ายรูปสามเหลี่ยมได้ทั้งในสองมิติและสามมิติ เพื่อมาประยุกต์ใช้ในการหาเส้นทางที่เหมาะสมของการปฏิบัติการกิจทางอากาศของอากาศยานในกองทัพอากาศต่อไป

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อวิเคราะห์และเสนอแนวทางการใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ในการสร้างโครงข่ายสมมุติสำหรับเส้นทางบินของอากาศยานในสามมิติ

2.2 เพื่อวิเคราะห์แนวทางหาเส้นทางการบินที่สั้นที่สุดของโครงข่ายแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay จากการตัดพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการถูกตรวจจับด้วยระบบเรดาร์และการชนเข้ากับภูมิประเทศ

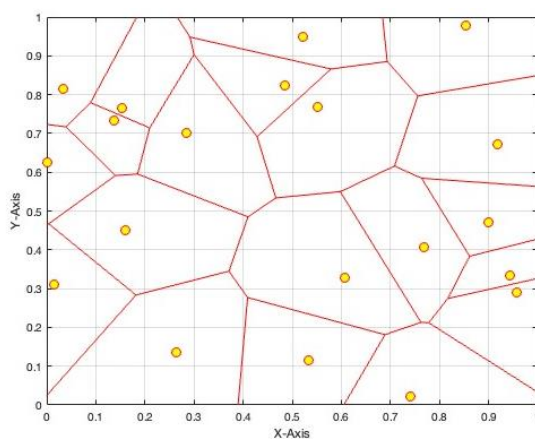
3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอขั้นตอนในการหาเส้นทางที่เหมาะสมในการปฏิบัติการกิจทางอากาศของอากาศยานในกองทัพอากาศในพื้นที่เสี่ยงภัยจากการตรวจจับของระบบเรดาร์ข้าศึกบนพื้นที่สามมิติ โดยแนวคิดที่นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้นั้น จำเป็นจะต้องใช้องค์ความรู้สำคัญ 4 ส่วน เพื่อวิเคราะห์และสร้างเส้นทางที่เหมาะสมขึ้นมา โดยองค์ความรู้ทั้ง 4 ส่วนนั้น คือ

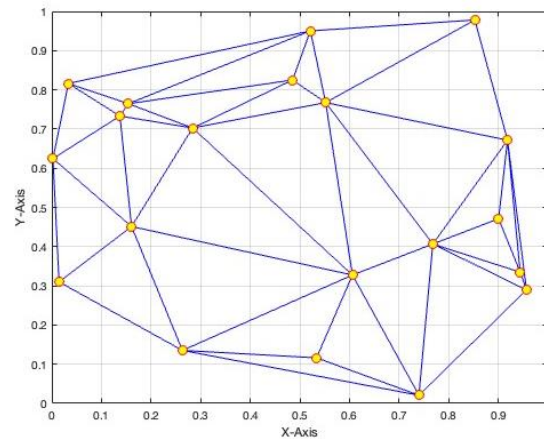
3.1 โครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay

ในทางคอมพิวเตอร์กราฟิกและการศึกษารูปทรงเรขาคณิตนั้น จะมีแนวทางการสร้างโครงข่ายที่เป็น การเชื่อมกันของจุดแต่ละจุดที่สามารถประยุกต์ใช้เป็นเส้นทางบินของอากาศยานอยู่หลายวิธี และวิธีที่นิยมอย่างมาก 2 แบบ คือ แผนภาพไวโรนอยและแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay โดยกระบวนการทั้งสองแบบนี้จะเป็นการสร้างโครงข่ายที่ไม่มีเส้นทางเดินตัดกัน จากจุดยอดที่กำหนดขึ้นมา โดยข้อแตกต่างนั้น ในแบบของแผนภาพไวโรนอยนั้น เส้นทางเดินที่ถูกสร้างขึ้นมา จะเป็นเส้นทางเดินที่อยู่ระหว่างกลางของจุดที่กำหนดขึ้น (จุดสีเหลือง) ในรูปที่ 1(ก) ในขณะที่การสร้างโครงข่ายจากแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay นั้นจะใช้จุดที่กำหนดขึ้น (จุดสีเหลือง) มาเป็นจุดยอดของสามเหลี่ยมของโครงข่ายนั้นๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 1(ข) โดยโครงข่ายจากแผนภาพของสามเหลี่ยม Delaunay นั้น จะมีความได้เปรียบในการสร้างที่รวดเร็วกว่า เพราะไม่จำเป็นต้องคำนวณหาจุดกึ่งกลางและหาแนวเส้นตัดของโครงข่ายตามแบบแผนภาพไวโรนอยที่จำเป็นต้องมีการคำนวณ

หลายขั้นตอน อีกทั้งแผนภาพโวโรนอยยังมีข้อจำกัดที่สามารถทำได้เฉพาะสองมิติเท่านั้น จึงทำให้เป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้กับสถานการณ์ที่มีพื้นที่เป็นสามมิติ ในทางตรงกันข้าม แผนภาพของสามเหลี่ยม Delaunay นั้นสามารถทำได้ดี โดยแสดงไว้ในตัวอย่างในรูปที่ 2 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำเสนอแนวทางการใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ที่ทีมผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมา มาประยุกต์ใช้ในการหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับอากาศยานต่อไป

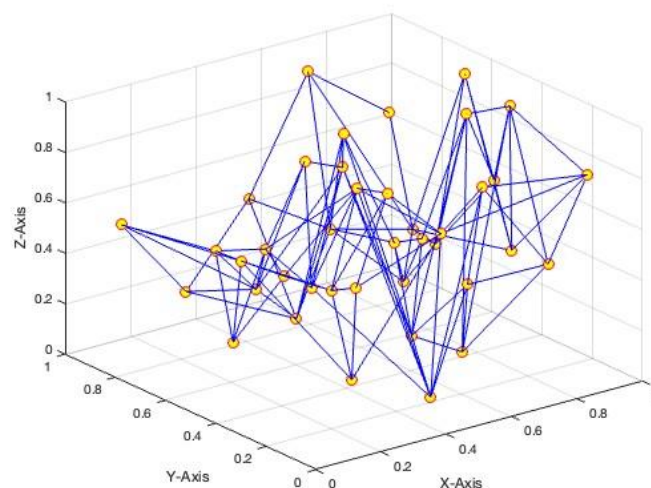


(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ตัวอย่างโครงข่ายเส้นทางที่ถูกสร้างขึ้นจากจุดยอดที่กำหนด (จุดสีเหลือง) ด้วย (ก) แผนภาพโวโรนอย
(ข) แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay



รูปที่ 2 ตัวอย่างโครงข่ายเส้นทางที่ถูกสร้างขึ้นจากจุดยอดที่กำหนดด้วยแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay
ในรูปแบบสามมิติ

3.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการบิน

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้พิจารณาถึงพื้นที่เสี่ยงภัย เป็นพื้นที่ที่อากาศยานไม่สมควรบินเข้าไป เพราะมีโอกาสสูญเสียเกินกว่าระดับที่รับได้ โดยความเสี่ยงภัยนั้นมีด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ พื้นที่ที่ถูกปิดด้วยภูมิประเทศหรือภูเขาจนทำให้อากาศยานไม่สามารถบินผ่านไปได้ และสองคือพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการถูกตรวจจับด้วยระบบเรดาร์ของข้าศึกและอาจถูกอาวุธโจมตีของข้าศึกได้ ซึ่งพื้นที่เสี่ยงต่อการถูกตรวจจับและเสี่ยงต่อการถูกโจมตีของข้าศึคนั้น จะพิจารณาได้จากการครอบคลุมของระบบเรดาร์ข้าศึก เพราะอาวุธปล่อยจากพื้นสู่อากาศนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้เรดาร์ในการตรวจจับเสียก่อน เพื่อให้ได้ความแม่นยำในการโจมตี โดยระยะตรวจจับนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการระบบเรดาร์ [12-16] ด้านล่าง

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e B F (SNR)_{min}} \right)^{1/4} \quad (1)$$

ซึ่งสมการนี้จะอธิบายพฤติกรรมของระยะตรวจจับจากข้อมูลของระบบเรดาร์ โดยมีตัวแปรที่สำคัญดังนี้ คือ R_{max} เป็นระยะตรวจจับไกลสุดของระบบเรดาร์, P_t (Peak Power) เป็นค่าพลังงานสูงสุดของระบบเรดาร์ที่สามารถปล่อยออกไปได้, G (Gain) คือค่ากำลังขยายของระบบเรดาร์, λ คือความยาวคลื่นของระบบเรดาร์, σ (Radar Cross Section (RCS)) คือค่าเฉพาะที่สะท้อนจากเป้าหมายแต่ละชนิดหรือเรียกว่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์, k (Boltzman Constant) คือค่าคงที่ของบ็อลทซ์มัน, B (Bandwidth) คือ ความกว้างของช่วงคลื่นที่ถูกส่งออกแล้วในแต่ละครั้ง, T_e (Effective Temperature) คืออุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การทำงานของระบบเรดาร์, F (Number of Noise Figure) คืออัตราส่วนค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio (SNR)) ของสัญญาณฝั่งเข้ากับค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของสัญญาณฝั่งออกและตัวแปรตัวสุดท้ายคือ $(SNR)_{min}$ เป็นค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนน้อยที่สุดที่ยังสามารถตรวจจับเป้าหมายได้ ซึ่งค่า $(SNR)_{min}$ จะเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์พื้นที่ No Fly Zone เพราะเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นในการตรวจจับ (Probability of Detection (Pd)) กับความน่าจะเป็นในการแจ้งเตือนภัยผิดพลาดของระบบเรดาร์ (Probability of False Alarm (PFA))

3.3 เส้นทางเดินที่สั้นที่สุดของโครงข่าย

หลังจากตัดพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการบินของอากาศยานเกินกว่าระดับที่รับได้ออกไปหมดแล้ว จะเหลือเพียงแต่พื้นที่ที่อากาศยานสามารถบินไปทำภารกิจและอยู่ในเกณฑ์ความเสี่ยงที่รับได้ โดยเส้นทางที่จะใช้ในการบินไปปฏิบัติภารกิจนั้น จำเป็นจะต้องเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดเพื่อลดความเสี่ยงโดยรวมในการปฏิบัติภารกิจ ประหยัดเวลาและทรัพยากรในการปฏิบัติภารกิจมากที่สุด ในงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการนำเสนอแนวทางในการใช้อัลกอริทึมของไดจ์สตรา (Dijkstra's Algorithm) [17-18] มาประยุกต์ใช้ในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากโครงข่ายเส้นทางที่เหลืออยู่ โดยอัลกอริทึมนี้เป็นอัลกอริทึมที่ง่ายและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ได้ เช่น การค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับการเดินทาง การวางแผนโครงข่าย การส่งสินค้า การจัดเส้นทางขนส่ง

อัลกอริทึมของไดจ์ยังมีความนิยมอย่างมากในหลายงานวิจัย เช่น ในงานวิจัยของ Broumi et al. (2016) [19] และ Qing et al. (2017) [20] อีกด้วย แม้ว่าอัลกอริทึมในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดนั้น มีอยู่ด้วยกันหลากหลาย แต่อัลกอริทึมของไดจ์สตรา (Dijkstra's Algorithm) [17-18] ยังเป็นหนึ่งในอัลกอริทึมที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้ง่ายและหาคำตอบได้เสมอในทุกกรณีที่มีคำตอบ ซึ่งงานวิจัยในอนาคตผู้วิจัยจะดำเนินการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมชนิดอื่นๆ ต่อไป

3.4 การปรับเส้นทางบินให้เรียบด้วยสมการพหุนาม

เส้นทางที่ได้จากแนวทางเดินของโครงข่ายที่สร้างขึ้นจากแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ในบางครั้งมีแนวเส้นทางที่มีมุมหักเลี้ยวแคบเกินไปหรืออาจจะบ่งบอกถึงความจำเป็น เพื่อให้เส้นทางการบินสามารถนำไปใช้ได้จริง ในงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการดำเนินการปรับเส้นทางเหล่านั้นให้มีความราบเรียบมากยิ่งขึ้น จนสามารถนำไปใช้ในการบินได้จริงๆ โดยกระบวนการในการปรับเส้นทางการบินนั้น สามารถทำได้โดยใช้เส้นทางที่ได้จากการประมาณค่าด้วยสมการพหุนาม (Polynomial Interpolation) [21] ของจุดทางเดินของโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay มาแทนเส้นทางเดิมของแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ซึ่งกระบวนการประมาณค่าด้วยสมการพหุนามนี้ เป็นที่นิยมและถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยหลากหลาย เช่น งานวิจัยของ Dai and Cochran (2010) [22] และงานวิจัยของ Artuñedo et al. (2017) [23]

4. วิธีดำเนินการศึกษา

หลังจากอธิบายองค์ความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay มาหาเส้นทางการบินที่เหมาะสมในหัวข้อที่แล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำเสนอกระบวนการและขั้นตอนในการประยุกต์ใช้แนวคิดเหล่านี้ เพื่อให้สามารถหาเส้นทางที่เหมาะสมต่อการบินเพื่อปฏิบัติการกิจของกองทัพอากาศต่อไป โดยขั้นตอนนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ตามแผนภาพในรูปที่ 3

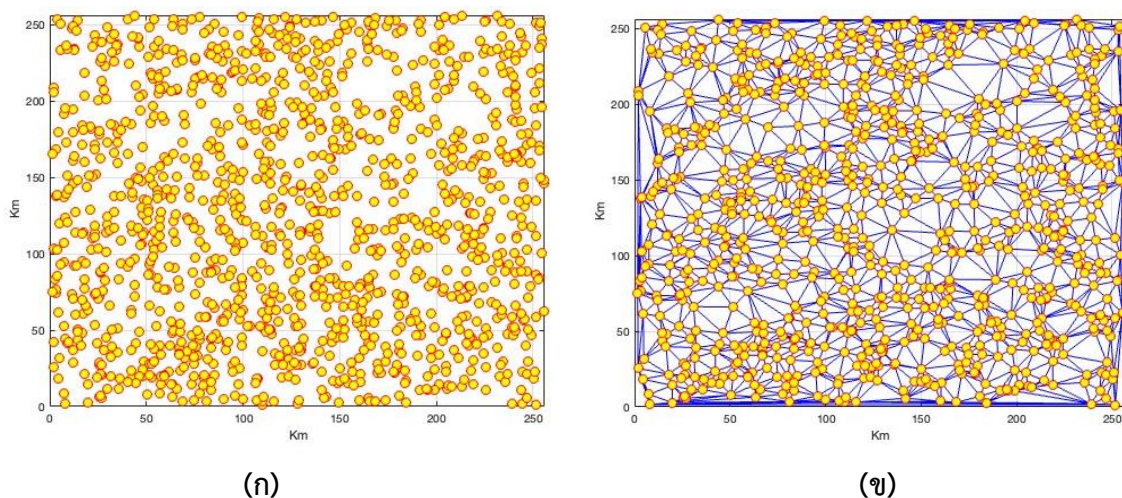


รูปที่ 3 ขั้นตอนในการประยุกต์ใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay ในการหาเส้นทางที่เหมาะสมต่อการบินปฏิบัติการกิจในพื้นที่สามมิติ

โดยในขั้นตอนแรกนั้นจะเป็นการสรุปตำแหน่งจุดยอด เพื่อที่จะใช้ในกระบวนการสร้างโครงข่ายเส้นทางการบินของอากาศยานต่อไป โดยจุดที่สุ่มขึ้นมาี้ ถ้ามีจำนวนน้อยก็จะทำให้การคำนวณสามารถเกิดขึ้นได้รวดเร็ว แต่จำนวนจุดที่เพิ่มมากขึ้นก็จะสามารถเพิ่มความละเอียดของเส้นทางได้ ดังนั้นการนำไปใช้สามารถ

ปรับแต่งได้ตามความต้องการของผู้ใช้ โดยตัวอย่างที่นำเสนอในรูปที่ 4(ก) ได้ดำเนินการสุ่มจำนวนจุดยอดมาจำนวน 800 จุด ให้กระจายตัวบนพื้นที่ 256×256 ตารางกิโลเมตร ที่ระดับความสูง 800 เมตร โดยในรูปที่ 4(ก) นั้นจะเป็นภาพที่มองจากมุมบน

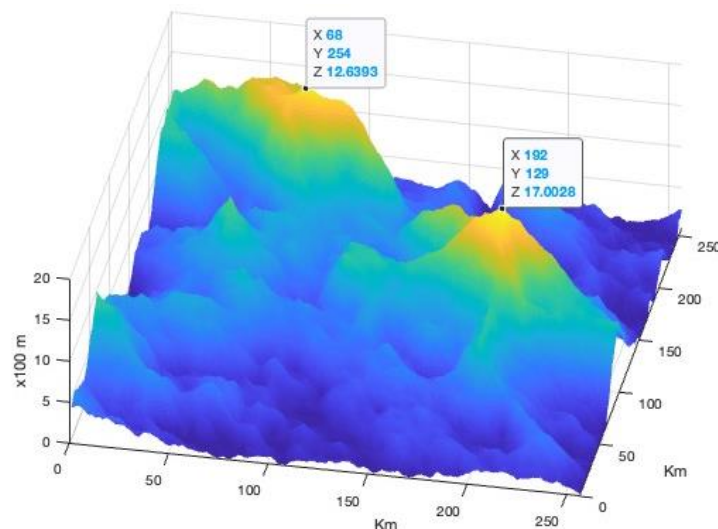
ขั้นตอนที่สองนั้น จะเป็นการสร้างโครงข่ายของเส้นทางจากจุดที่สุ่มมาจากขั้นตอนแรก ซึ่งจุดที่สุ่มขึ้นมา นั้นจะทำหน้าที่เป็นจุดยอดของอัลกอริทึมการสร้างรูปสามเหลี่ยม Delaunay และผลที่ได้นั้น ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4(ข) ซึ่งโครงข่ายนี้จะเป็นการจำลองเส้นทางการบินของอากาศยาน



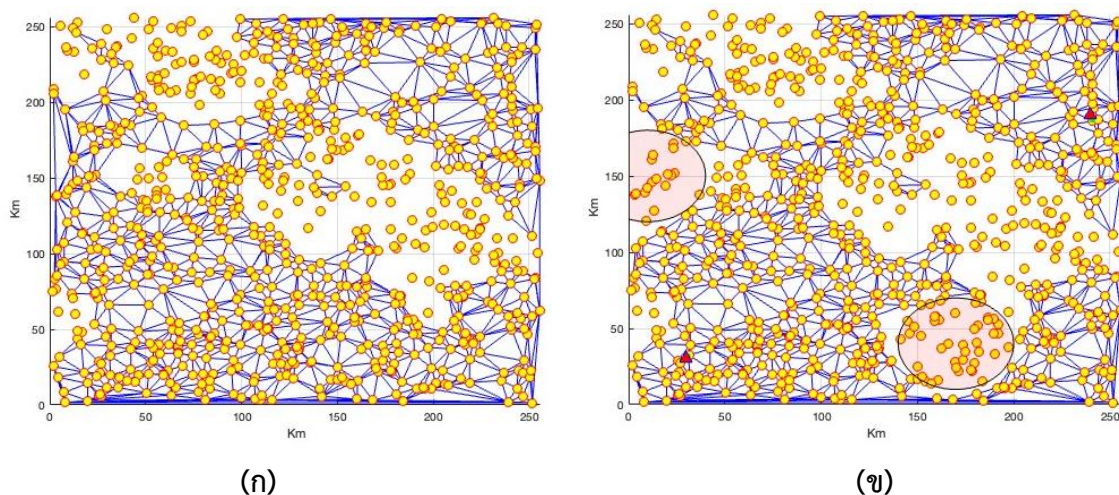
รูปที่ 4 ตัวอย่างโครงข่ายที่สร้างขึ้นจากอัลกอริทึมรูปสามเหลี่ยม Delaunay

ขั้นตอนที่สามนั้น จะเป็นการตัดเส้นทางของโครงข่ายที่สร้างขึ้นมาแล้วในขั้นตอนที่สอง โดยพิจารณาจากพื้นที่ที่ถูกบดบังด้วยภูมิประเทศในสามมิติทำให้อากาศยานไม่สามารถบินไปยังพื้นที่เหล่านั้นได้ นอกจากนี้แล้วยังพิจารณาตัดพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการถูกตรวจจับจากระบบเรดาร์และอาวุธต่อสู้อากาศยานของข้าศึกด้วย โดยขั้นตอนนี้ได้ดำเนินการสมมุติสร้างภูมิประเทศขนาด 256×256 ตารางกิโลเมตร โดยมีความสูงอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1,700 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยภูมิประเทศที่สุ่มสร้างขึ้นมานั้นจะมียอดเขาสูงอยู่สองยอด โดยยอดที่หนึ่งสูง 1,700 เมตร ส่วนยอดที่สองสูง 1,263 เมตร โดยภูเขาจำลองในภูมิประเทศนี้ จะบดบังทำให้อากาศยานไม่สามารถบินทะลุภูเขาได้ ดังนั้นโครงข่ายที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่สองที่ระดับความสูง 800 เมตร จะถูกตัดออก และผลที่ได้นั้นแสดงในรูปที่ 6(ก) จากนั้นในขั้นตอนต่อไปจะสาธิตการตัดพื้นที่เสี่ยงภัยออกจากโครงข่ายแผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay โดยในกรณีนี้ในสมมุติว่าฝ่ายข้าศึกนั้นมีเรดาร์และอาวุธปล่อยจากพื้นสู่อากาศ ตั้งอยู่ที่ พิกัด (10,150) และพิกัด (170,40) โดยทั้งสองพิกัดนั้นจะมีเรดาร์เคลื่อนที่ติดตั้งอยู่ โดยเรดาร์เหล่านี้มีค่าตัวแปรดังนี้ คือ $P_t = 3 \text{ kW}$, $f = 1 \text{ GHz}$, $\lambda = 0.3 \text{ m}$, $G = 20 \text{ dB}$, $B = 0.1 \text{ Mhz}$, $F = 0$ $L = 3 \text{ dB}$ และ $(\text{SNR})_{\min} = 12.2387 \text{ dB}$ (ซึ่งค่าตัวแปรเหล่านี้เป็นค่าที่สมมุติขึ้นมา แต่มีความใกล้เคียงกับค่าตัวแปรมาตรฐานที่พบได้ในเรดาร์เคลื่อนที่ที่มีการใช้งานอยู่ในกองทัพ) โดยค่าตัวแปรเหล่านี้ ทำให้สามารถคำนวณได้ว่า ระบบเรดาร์เหล่านี้

มีระยะในการตรวจจับอยู่ที่ระยะ 31.75 กิโลเมตร จากการแทนค่าในสมการที่ 1 ด้วยค่าความน่าจะเป็นในการตรวจพบเข้าคืออยู่ที่ 95% จากนั้นเมื่อได้ค่าระยะการตรวจจับของระบบเรดาร์และพิกัดของระบบเรดาร์ทั้งสองมาแล้ว จะมาดำเนินการตัดพื้นที่ของโครงข่ายออก เพื่อไม่ให้อากาศยานฝ่ายเราบินเข้าไปยังบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการถูกตรวจจับและถูกโจมตีจากอาวุธปล่อยจากพื้นสูงอากาศได้ โดยผลที่ได้นั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 6(ข) โดยพื้นที่ครอบคลุมของระบบเรดาร์นั้น แสดงด้วยพื้นที่สีแดง



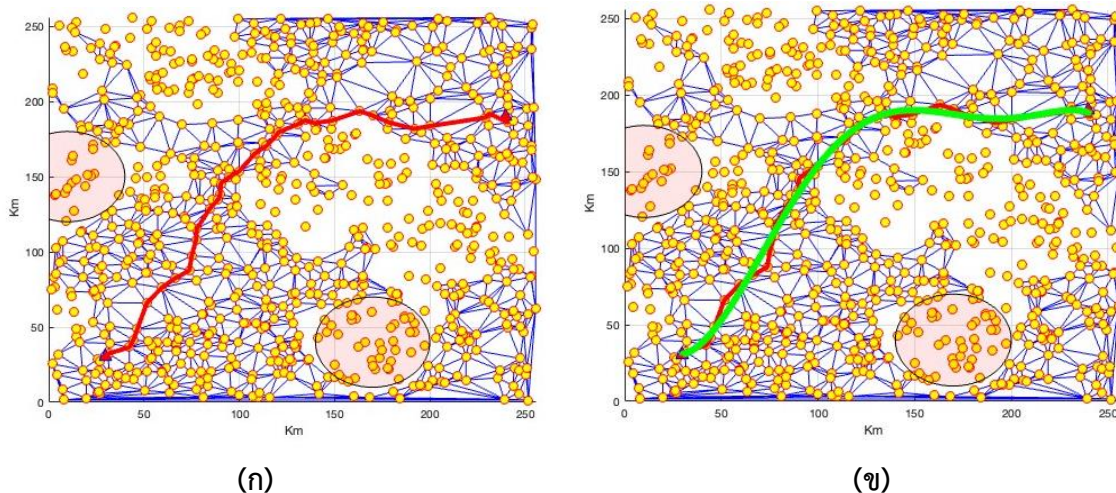
รูปที่ 5 ภูมิประเทศจำลอง ขนาด 256x256 ตารางกิโลเมตร ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 6 แผนภาพโครงข่ายจากอัลกอริทึมสามเหลี่ยม Delaunay เมื่อตัดพื้นที่เสี่ยงภัยจาก (ก) การชนกับภูมิประเทศที่ความสูง 800 เมตร (ข) การชนกับภูมิประเทศและระบบเรดาร์

ขั้นตอนที่สี่นั้น จะเป็นการหาเส้นทางที่เหมาะสมหรือเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับอากาศยานบินไปปฏิบัติภารกิจ จากโครงข่ายของเส้นทางบินที่เหลืออยู่หลังจากตัดพื้นที่เสี่ยงภัยที่เกินจากระดับความเสี่ยงที่รับได้ออกไปหมดแล้ว โดยตัวอย่างที่ใช้สาธิตการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมชนิดนี้นั้น ได้สมมติว่า อากาศยานอยู่ที่พิกัด (30,30) ต้องการที่จะบินไปโจมตีพิกัดเป้าหมายอยู่ที่ตำแหน่งพิกัด (240,190) โดยจำเป็นที่จะต้องบินอยู่ในระดับต่ำที่ความสูง 800 เมตร เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศยานของฝ่ายข้าศึกที่อยู่ด้านบนตรวจพบได้ โดยกระบวนการนี้จะต้องดำเนินการเพิ่มจุดเริ่มต้นของอากาศยานและตำแหน่งเป้าหมายเข้ากับโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay เสียก่อน โดยการเพิ่มเส้นเชื่อมระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดเป้าหมายไปหาจุดยอดของโครงข่ายที่อยู่ใกล้ที่สุดและยังไม่ถูกตัดออกไปจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ จากนั้นจึงใช้อัลกอริทึมของไดจ์สตรา (Dijkstra's Algorithm) เพื่อค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดบนโครงข่ายที่เหลืออยู่นี้ และผลลัพธ์ที่ได้แสดงด้วยเส้นสีแดงในรูปที่ 7(ก) โดยมีระยะทางทั้งหมดเท่ากับ 319.18 กิโลเมตร

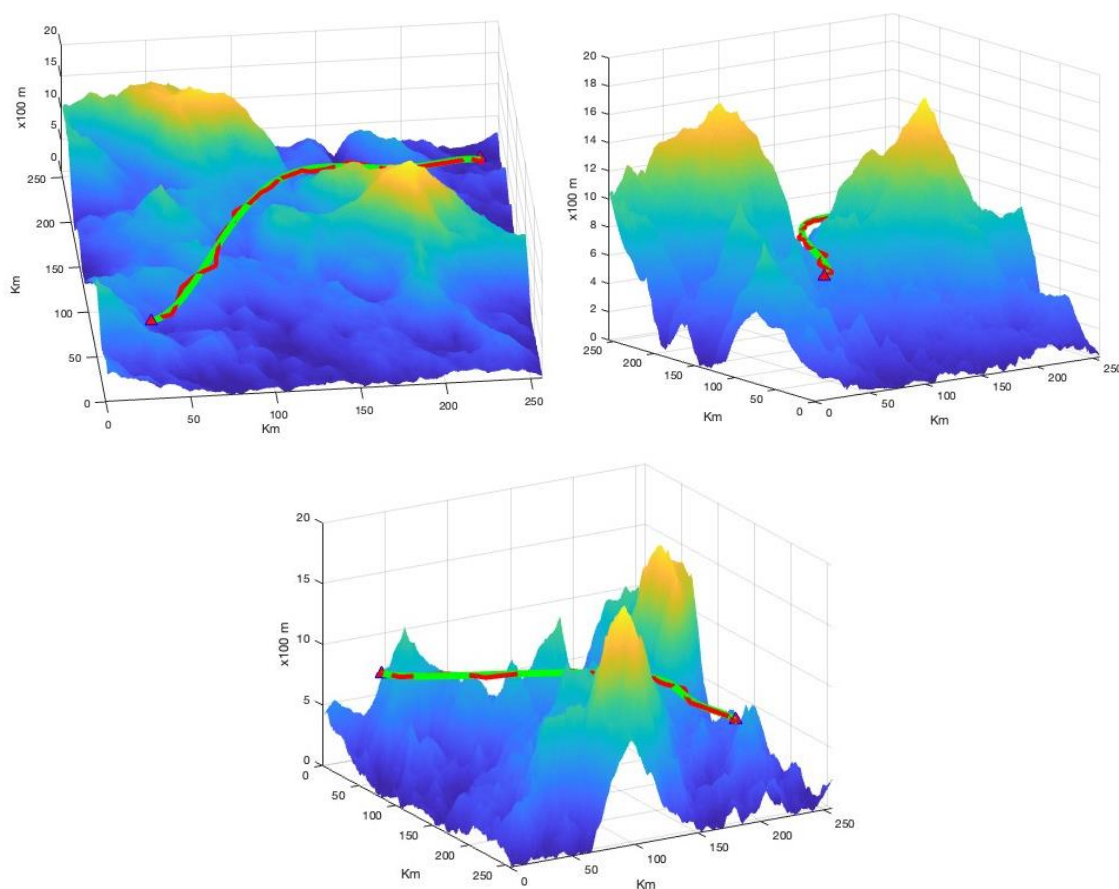
ในขั้นตอนสุดท้ายนั้น จะดำเนินการปรับเส้นทางที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่สี่ ในรูปที่ 7(ก) ที่มีการหักเลี้ยวที่เป็นมุมแคบอยู่หลายจุดและเป็นเรื่องที่น่าลำบากของการบินจริงของอากาศยาน ดังนั้นตำแหน่งพิกัดเหล่านี้จะถูกนำไปปรับให้เรียบขึ้นด้วยการประมาณค่าด้วยสมการพหุนามกำลัง 6 ในรูปแบบสมการ $y = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx + g$ โดยค่าสัมประสิทธิ์ $a - g$ สามารถหาได้จากกระบวนการ Least Square Linear Regression โดยผลลัพธ์ที่ได้นั้นแสดงด้วยเส้นสีเขียวในรูปที่ 7(ข) ในกรณีที่กำลังของพหุนามที่เลือกมานั้น ไม่เหมาะสมกับเส้นทางการบินที่วิเคราะห์ได้ในขั้นตอนที่สี่นั้น สามารถเพิ่มหรือลดกำลังของสมการพหุนามให้เหมาะสมกับเส้นทางได้



รูปที่ 7 เส้นทางการบินในการปฏิบัติการกิจที่จำลองขึ้น (ก) คำนวณด้วยอัลกอริทึมของไดจ์สตรา (ข) ปรับความเรียบด้วยการประมาณสมการพหุนามกำลัง 6

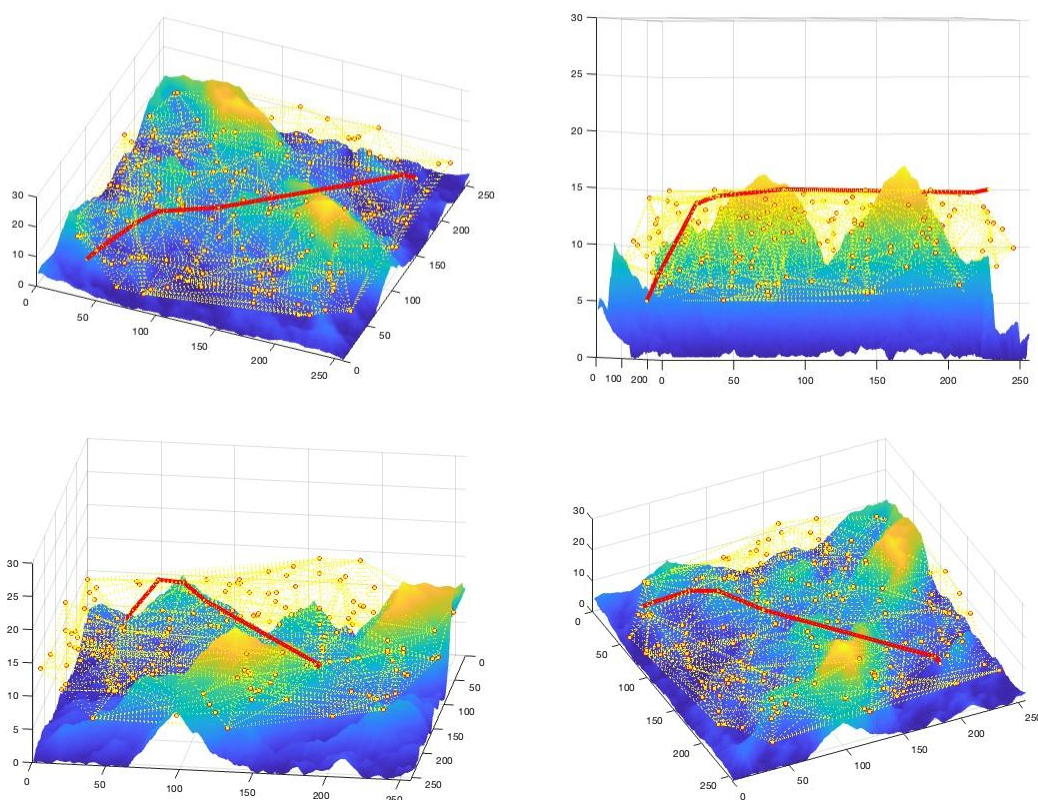
5. ผลการศึกษา

จากกรณีตัวอย่างและขั้นตอนในการประยุกต์ใช้แผนภาพโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay ที่ทีมผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมา ในการวิเคราะห์หาเส้นทางที่เหมาะสมในการบินไปปฏิบัติภารกิจทางอากาศของอากาศยานที่อธิบายมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ ทำให้เห็นได้ว่าขั้นตอนและอัลกอริทึมที่ผู้วิจัยนำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาเส้นทางการบินที่เหมาะสมได้จริง ในการปฏิบัติการกิจของอากาศยานบนภูมิประเทศที่มีลักษณะเป็นสามมิติ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนในหัวข้อที่แล้วนั้นสามารถแสดงลงบนแผนที่สามมิติ ดังตัวอย่างในรูปที่ 8 โดยในตัวอย่างนี้เส้นทางการบิน พิกัดเริ่มต้นอยู่ที่พิกัด (30,30) และพิกัดเป้าหมายอยู่ที่พิกัด (240,190) โดยอากาศยานนั้นจำมีเส้นทางการบินอยู่ที่ความสูงคงที่ที่ 800 เมตรตลอดเวลา



รูปที่ 8 ตัวอย่างเส้นทางการบินในการปฏิบัติการกิจจากพิกัด (30,30) ไปโจมตีเป้าหมายที่พิกัด (240,190) บนแผนที่สามมิติขนาด 256x256 ตารางกิโลเมตร

นอกจากนี้แล้วแผนภาพโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay และขั้นตอนอัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้ ยังสามารถประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์หาเส้นทางการบิน ในสภาวะที่สามารถเปลี่ยนแปลงความสูงได้ดังในตัวอย่างในรูปที่ 9 โดยในตัวอย่างนี้กำหนดให้อากาศยานนั้นมีพิกัดเริ่มต้นอยู่ที่ (30,30) และมีความสูงอยู่ที่ 500 เมตร มีภารกิจที่จำเป็นต้องบินไปพิกัด (240,190) ที่ระดับความสูง 1,500 เมตร โดยระยะความสูงที่สามารถใช้นั้นอยู่ระหว่างความสูง 500 - 1,500 เมตร ซึ่งสามารถทำได้โดยการสุ่มกำหนดจุดยอดให้อยู่บนพื้นที่สมมุติขนาด 256x256 ตารางกิโลเมตร และมีความสูงกระจายไปในช่วงความสูง 500 - 1,500 เมตร กล่าวคือ มีการสุ่มทั้งพิกัด x , y และ z ในขอบเขตที่ต้องการ จากนั้นดำเนินการสร้างแผนภาพโครงข่ายสามเหลี่ยม Delaunay ในรูปแบบสามมิติ และดำเนินการตัดพื้นที่ที่เสี่ยงจากระบบเรดาร์และการชนเข้ากับภูมิประเทศออกเหมือนดังตัวอย่างก่อนหน้านี้ โดยพบว่าเส้นทางที่สั้นที่สุด หลังจากตัดระบบเรดาร์และภูมิประเทศออกไปแล้วนั้น คือการที่อากาศยานได้ความสูงไปที่ 1,500 เมตร จากจุดเริ่มต้นเลย จากนั้นบินที่ความสูงนี้ตรงข้ามภูเขาไปยังเป้าหมายได้เลย โดยระยะรวมทั้งหมดอยู่ที่ 270 กิโลเมตร



รูปที่ 9 ตัวอย่างเส้นทางการบินในการปฏิบัติการกิจจากพิกัด (30,30) ที่ความสูง 500 เมตร ไปโจมตีเป้าหมายที่พิกัด (240,190) ที่ความสูง 1,500 เมตร บนแผนที่สามมิติขนาด 256x256 ตารางกิโลเมตร

6. สรุปและอภิปรายผล/ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากสมรรถนะการรบทางอากาศในยุคใหม่นั้น มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ทำให้การตัดสินใจหาเส้นทางการบินที่เหมาะสมที่สุดนั้นเป็นเรื่องยากมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นการนำเสนอแนวทางการใช้แผนภาพสามเหลี่ยม Delaunay มาสร้างโครงข่ายเส้นทางการบินที่สามารถใช้ได้ในพื้นที่ที่สนใจ จากนั้นใช้สมการเรดาร์คำนวณหาระยะเสี่ยงภัยต่อการถูกโจมตีและการถูกตรวจจับจากข้าศึก และความสูงของภูมิประเทศมาตัดพื้นที่การบินที่ไม่สามารถใช้ได้ออกจากโครงข่ายเส้นทางการบิน จากนั้นใช้อัลกอริทึมของไดคัสตรามาคำนวณหาเส้นทางการบินที่สั้นที่สุด บนโครงข่ายที่เหลืออยู่จากพิกัดเริ่มต้นไปยังพิกัดเป้าหมาย และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการทำให้เส้นทางการบินราบเรียบขึ้นด้วยการประมาณค่าเส้นทางการบินโดยใช้สมการพหุนาม

แนวคิดในการใช้คอมพิวเตอร์และอัลกอริทึมมาประเมินเส้นทางการบินนี้ จะช่วยสร้างข้อมูลพิจารณาให้กับนักบินในการตัดสินใจเลือกเส้นทางการบิน ในสถานะที่ซับซ้อนและในสมรรถนะที่มีความซับซ้อน ประกอบไปด้วยอากาศยานของฝ่ายข้าศึก สถานีเรดาร์ เรดาร์เคลื่อนที่ จรวดต่อสู้อากาศยาน และภูมิประเทศที่ซับซ้อนนั้น จะเป็นการลดภาระงานและสร้างโอกาสให้นักบินตัดสินใจได้ดีมากยิ่งขึ้น โดยขั้นตอนอัลกอริทึมนี้จะเห็นเส้นทางการบินทั้งหมดตั้งแต่ต้น ทำให้ได้เปรียบอัลกอริทึมชนิดเรียลไทม์ ที่พิจารณาเลือกเส้นทางเป็นระยะๆ

นอกจากนี้ อัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้ ยังสามารถนำไปประยุกต์ในงานวิจัยอื่นๆ ได้หลากหลาย เช่น การวางแผนเส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับ การวางแผนเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ การวางแผนเส้นทางเดินเรือรบ และการวางแผนเส้นทางเดินเรือสินค้า เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Murphy R, Uryasev S, Zabaranin M. Trajectory optimization in a threat environment. Research Report 9 [Internet]. Florida: University of Florida, Department of Industrial and Systems Engineering; 2003 Jan. Available from https://www.researchgate.net/publication/251451092_Trajectory_optimization_in_a_threat_environment_Research_report
- [2] Turnbull O, Lawry J, Lowenberg M, Richards A. A cloned linguistic decision tree controller for real-time path planning in hostile environments. Fuzzy Sets Syst. 2016 Jun 15;(293):1-29.
- [3] Banfi J, Campbell M. High-Level Path Planning in Hostile Dynamic Environments. In Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems [Internet]; 2019 Jan; Montreal, Canada. Montreal; Conference: AAMAS; 2019 [cited 2023 Jan 12]; p.1799-1801. Available from: https://www.researchgate.net/publication/335125982_High-Level_Path_Planning_in_Hostile_Dynamic_Environments
- [4] Yang L, Qi J, Xiao J, Yong X. A literature review of UAV 3D path planning. In Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation [Internet]; 2014 Jun 1; Shenyang, IEEE; 2014 [cited 2023 Feb 1]; p. 2376-81. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7053093> doi: 10.1109/WCICA.2014.7053093.

-
- [5] Bruce J, Veloso M. Real-time randomized path planning for robot navigation. In IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems [Internet]; 2002; Lausanne, Switzerland. [place unknown]; IEEE; 2002 [cited 2023 Feb 12]; p. 2383-88. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1041624> doi: 10.1109/IRDS.2002.1041624.
- [6] Aurenhammer F. Voronoi diagrams: A survey of a fundamental geometric data structure. ACM Comput Surv. 1991 Sep 1;23(3): 345-405.
- [7] Garrido S, Moreno LE, Blanco D. Voronoi diagram and Fast Marching applied to path planning. In Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation [Internet]; 2006 May 15-19; Orlando, Florida, USA. [place unknown]: DBLP; 2006 [cited 2023 Mar 3]; p.3049-54. Available from: https://www.researchgate.net/publication/221072916_Voronoi_Diagram_and_Fast_Marching_applied_to_Path_Planning doi:10.1109/ROBOT.2006.1642165
- [8] Garrido S, Moreno L. Mobile robot path planning using voronoi diagram and fast marching. In: Luo Z, editor. Robotics, Automation, and Control in Industrial and Service Settings. [place unknown]: IGI Global; 2015. p. 92-108.
- [9] Al-Dahhan M, Schmidt, K. Path Planning Based on Voronoi Diagram and PRM for Omnidirectional Mobile Robots. In: DTSS2019 international conference [Internet]; 2019 Oct; Ankara, Turkey.
- [10] Özcan M, Yaman U. A continuous path planning approach on Voronoi diagrams for robotics and manufacturing applications. Procedia Manuf. 2019;38:1-8.
- [11] Delaunay B. Sur la sphère vide. Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS, Bull Acad Serbe Sci Cl Sci Math Nat Sci Nat. 1934;6:793–800.
- [12] Skolnik M. Radar Handbook. 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, 1990.
- [13] Mahafza B. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. 3rd ed. New York: CRC Press, 2013.
- [14] Skolnik M. Introduction to Radar Systems. 3rd ed. New York: McGraw-Hill; 2001.
- [15] Mahafza BR, Elsherbeni A. MATLAB Simulations for Radar Systems Design. New York: Chapman & Hall/CRC; 2003.
- [16] Willis NJ. Bistatic Radar. Raleigh, NC: SciTech; 2005.
- [17] Dijkstra EW. A note on two problems in connexion with graphs. Numer Math. 1959;1: 269-71.
- [18] Cormen TH, Leiserson CE, Rivest RL, Stein C. Introduction to Algorithms. 2nd ed. New York: McGraw-Hill; 2001.

-
- [19] Broumi S, Bakal A, Talea M, Smarandache F, Vladareanu L. Applying Dijkstra algorithm for solving neutrosophic shortest path problem. In: 2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS) [Internet]; 2016 Nov 30 – 2016 Dec 3; Melbourne, VIC, Australia; 2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS); 2017 [cited 2023 Mar 20]; p.412-6. Available from: IEEE doi: 10.1109/ICAMechS.2016.7813483
- [20] Qing G, Zheng Z, Yue X. In: Path-planning of automated guided vehicle based on improved Dijkstra algorithm [Internet]; 2017 May 28-30; Chongqing, China; 2017 29th Chinese control and decision conference (CCDC); 2017 [cited 2023 Apr 12]; p.7138-43. Available from IEEE doi: 10.1109/CCDC.2017.7978471.
- [21] Schatzman M. Numerical Analysis: A Mathematical Introduction. Oxford: Clarendon; 2002.
- [22] Dai R, Cochran JE. Path planning and state estimation for unmanned aerial vehicles in hostile environments. J Guid Control Dyn. 2010 Apr;33:595-601.
- [23] Artuñedo A, Godoy J, Villagra J. A comparison of local path-planning interpolation methods for autonomous driving in urban environments. Industriales research meeting 17.