

การหาเส้นทางที่เหมาะสม ในสภาพแวดล้อมที่มีอันตรายโดยใช้แผนภาพไวโรนอย

เทียนสิริ เหลืองวิไล^{1*} วีระพล วิลามาต¹ สมภูมิ มีขาวนา¹ และ สุภาวดี ลีลายุทธ¹

วันที่รับ 1 เมษายน 2563 วันที่แก้ไข 18 เมษายน 2563 วันที่ตอบรับ 20 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือการวิเคราะห์การนำไปประยุกต์ใช้ของแผนภาพไวโรนอย ในกระบวนการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอากาศยานทางทหารในพื้นที่เสี่ยงภัย ในอดีตการเลือกเส้นทางของกองกำลังทหารนั้นจะอาศัยประสบการณ์และความสามารถเฉพาะตัวของผู้นำทางทหาร แต่ด้วยสมภูมิในยุคปัจจุบันมีความซับซ้อนมากขึ้น กองกำลังใหญ่ขึ้น มีการรวมกำลังทั้งทางบก ทางน้ำ ทางอากาศ มีการใช้เรดาร์ตรวจจับแบบเคลื่อนที่ มีการใช้อากาศยานและยานยนต์ไร้คนขับมากยิ่งขึ้น ทำให้การตัดสินใจในการเลือกเส้นทางสำหรับปฏิบัติการมีความซับซ้อนและยากยิ่งขึ้น ดังนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้อัลกอริทึมมาช่วยในการวิเคราะห์และคาดเดาเส้นทางที่ดีที่สุดในการปฏิบัติการในแต่ละครั้ง ในงานวิจัยนี้พื้นที่สนใจในสมภูมิจะถูกแบ่งออกเป็นส่วน ๆ ด้วยแผนภาพไวโรนอย จากนั้นพื้นที่ที่ถูกครอบคลุมด้วยระบบเรดาร์ของข้าศึกจะถูกคำนวณแล้วตัดออกจากเส้นทางที่สามารถใช้เดินทางได้ เส้นทางที่เหลืออยู่ทั้งหมดจะนำมาวิเคราะห์หาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยอัลกอริทึมของไดจ์สตรา ในกระบวนการสุดท้ายจะดำเนินการปรับเส้นทางบินของอากาศยานให้ราบเรียบขึ้นด้วยกระบวนการประมาณค่าด้วยสมการพหุนาม

คำสำคัญ : ระบบเรดาร์, แผนภาพไวโรนอย, อัลกอริทึมของไดจ์สตรา, เส้นทางที่เหมาะสม

¹ กองวิชาคอมพิวเตอร์และคณิตศาสตร์ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช กรุงเทพฯ

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: thiansiri.l@gmail.com

Optimal path in a hostile environment using Voronoi diagram

Thiansiri Luangwilai ^{1*} Weerapol Welamas ¹ Sompoom Meechown ¹ and Supavadee Leelayuth ¹

Received 1 April 2020 Revised 18 April 2020 Accepted 20 April 2020

Abstract

The objective of this study is to investigate the use of Voronoi diagram to find optimal paths for military aircrafts in hostile environment. In the past, choosing the best paths for military forces depended on commanders' experience and expertise. For modern warfare, battlefields become more sophisticated with bigger forces, combined forces, mobile radars, autonomous systems etc. As a result, making decision and choosing the best possible options are complicated and difficult. It is essential to have an algorithm which is able to aid and predict the best available choice. In this study, the area of interest was divided by Voronoi diagram. Then areas which covered by radar systems were calculated and removed from Voronoi diagram. The Dijkstra's algorithm was used to search throughout the remaining paths for the optimal path. Then polynomial interpolation was used to smoothen the path and make it possible for air mission.

Keyword : Radar, Voronoi diagram, Dijkstra's algorithm, optimal path.

¹ Mathematics and Computer science Division, Navarminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy.

* Corresponding author, E-mail: thiansiri.l@gmail.com

1. บทนำ

ในสมรภูมิรบและการปฏิบัติการกิจส่วนใหญ่ในอดีต จะดำเนินการเลือกเส้นทางในการปฏิบัติการกิจโดยขึ้นอยู่กับความคิดเห็นของผู้บังคับบัญชา ซึ่งการเลือกเส้นทางเหล่านี้ จะถูกเฝ้าระวังจากประสบการณ์และการฝึกของผู้บังคับบัญชาเหล่านั้น โดยการรบในอดีตมิติของสมรภูมิยังไม่ซับซ้อนมากนัก แต่สมรภูมิในยุคปัจจุบันมีการพัฒนาไปจากเดิมมาก ทำให้มีความซับซ้อนมากขึ้น กองกำลังใหญ่ขึ้น มีการรวมกำลังทั้งทางบก ทางน้ำ ทางอากาศ มีการใช้เรดาร์ตรวจจับแบบเคลื่อนที่ มีการใช้อากาศยานและยานยนต์ไร้คนขับมากยิ่งขึ้น ทำให้การตัดสินใจในการเลือกเส้นทางสำหรับปฏิบัติการกิจมีความยากยิ่งขึ้น อีกทั้งท่วงท่าของการรบมีความเร็วมากขึ้น ทำให้ผู้บังคับบัญชาเหลือเวลาในการตัดสินใจน้อยลง ความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยในสมรภูมิยุคปัจจุบันอาจจะนำมาซึ่งหายนะของทั้งประเทศได้ ดังนั้นในกระบวนการตัดสินใจนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมัลกอริทึมมาช่วยในการวิเคราะห์และคาดการณ์เส้นทางที่ดีที่สุดในการปฏิบัติการกิจแต่ละครั้ง [4] [19] [28]

งานวิจัยในการหาเส้นทางที่เหมาะสมในแต่ละภารกิจนั้นได้มีการดำเนินการวิจัยในหลายรูปแบบ โดยมีการพัฒนาอัลกอริทึมขึ้นมามากชนิด [14] เพื่อให้มีความเหมาะสมกับโจทย์ของแต่ละปัญหา โดยแต่ละรูปแบบจะมีความยากง่ายและความต้องการข้อมูลขั้นต้นที่แตกต่างกันไป

Garrido & Moreno (2015) ได้ให้ความเห็นไว้กับการประยุกต์ใช้แผนภาพไวโรนอยมาใช้ในการวิเคราะห์หาเส้นทางว่ามีข้อดีหลายประการ เช่น กระบวนการนี้มีความง่ายและตรงประเด็น การนำไปใช้ไม่ซับซ้อน มีความเร็วในการคำนวณ ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ สามารถใช้ในการแก้ปัญหาได้หลายรูปแบบ รองรับสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอด ซึ่งจากคุณสมบัติที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นมีความเหมาะสมกับปัญหาของการวิเคราะห์เส้นทางของอากาศยานในพื้นที่อันตราย ที่ต้องการความเร็วในการ

วิเคราะห์และต้องการความยืดหยุ่นต่อความเปลี่ยนแปลงที่อาจจะเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา

โดยการประยุกต์ใช้แผนภาพไวโรนอยนั้นมีมากกว่าร้อยปี ในแต่ละงานวิจัยจะมีแนวทางการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกันไปและมีการประยุกต์ร่วมกับอัลกอริทึมที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัญหาที่ต้องการดำเนินการแก้ไข

ตัวอย่างงานวิจัยที่ดำเนินการใช้แผนภาพไวโรนอยควบคู่กับอัลกอริทึมอย่างอื่น ๆ เพื่อหาเส้นทางเดินให้หุ่นยนต์หรือเครื่องจักรเช่น งานวิจัยของ Garrido & Moreno (2015), งานวิจัยของ Al-Dahhan & Schmidt (2019) และงานวิจัยของ Özcan and Yaman (2019)

งานวิจัยที่ดำเนินการใช้แผนภาพไวโรนอยเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง เช่น งานวิจัยของ Candeloro et al. (2017) ได้ดำเนินการประยุกต์ใช้แผนภาพไวโรนอยในการวิเคราะห์หาขอบของสิ่งกีดขวาง แล้วดำเนินการหาเส้นทางเดินเรือที่มีความปลอดภัยต่อสิ่งกีดขวางเหล่านั้น งานวิจัยของ Makarov et al. (2018) ได้ประยุกต์ใช้กระบวนการวางแผนหาเส้นทางให้หลบสิ่งกีดขวางในเกมชนิด First Person Shooting (FPS) และงานวิจัยของ Tang et al. (2020) ที่ประยุกต์ร่วมกับแผนภาพความน่าจะเป็นแบบทกเหลี่ยมมาใช้ในการหลบสิ่งกีดขวางทั่วไป นอกจากนี้แล้วยังมีงานวิจัยของ Shi et al. (2019) ได้นำแผนภาพไวโรนอยไปใช้ในการหาเส้นทางของจรวดต่อต้านเรือผิวน้ำ

จากตัวอย่างที่กล่าวมานั้น จะเห็นได้ว่าแผนภาพไวโรนอยสามารถนำไปใช้ได้อย่างหลากหลาย เพราะเป็นกระบวนการที่มีข้อดีหลายประการและประยุกต์ใช้ได้กับหลายรูปแบบของภารกิจ [5] [6] [12] [18]

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะทดสอบการประยุกต์รวมกระบวนการสร้างแผนภาพไวโรนอย [3] [12] ร่วมกับการหาพื้นที่ครอบคลุมของระบบเรดาร์ [15] [16] [25] [26] [29] จากนั้นจะดำเนินการใช้อัลกอริทึมของไดคัสตรา [9] [11] และการประมาณค่าด้วยสมการพหุนาม [23] เพื่อสร้างเส้นทางที่เหมาะสมในการปฏิบัติการกิจทางอากาศต่อไป

2. กระบวนการวิจัย

ในกระบวนการวิเคราะห์หาเส้นทางที่ดีที่สุดใน การปฏิบัติการกิจของอากาศยานโดยการประยุกต์ใช้ แผนภาพไวโรนอยนั้น มีขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน คือ 1) การวิเคราะห์หาพื้นที่ที่ถูกครอบคลุมด้วย ระบบเรดาร์ตรวจจับของข้าศึก 2) สร้างแผนภาพ ตาข่ายไวโรนอยในพื้นที่สนใจของการปฏิบัติการกิจ 3) หาเส้นทางที่สั้นที่สุดที่ไม่เข้าไปในพื้นที่การ ตรวจจับของระบบเรดาร์ข้าศึก 4) ดำเนินการปรับ เส้นทางให้ราบเรียบเหมาะสมกับการเดินทางของ อากาศยาน

2.1 การวิเคราะห์หาพื้นที่ครอบคลุมของระบบเรดาร์

ในกระบวนการหาพื้นที่ครอบคลุมของระบบเรดาร์นั้น จำเป็นที่จะต้องดำเนินการหาระยะตรวจจับไกลสุดของ ระบบเรดาร์นั้น ๆ ก่อน โดยระยะตรวจจับที่ไกลที่สุด หมายถึง ระยะที่ค่าพลังงานน้อยสุดที่สะท้อนกลับมา จากวัตถุแล้วยังสามารถนำมาวิเคราะห์ตรวจจับ วัตถุเป้าหมายได้โดยสมการที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรม เหล่านี้ [15] [16] [22] [25] [26] [29] คือ

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

ในสมการนี้มีตัวแปรที่สำคัญในระบบเรดาร์หลายตัว โดยมี R_{max} เป็นระยะตรวจจับไกลสุดของระบบเรดาร์, P_t (Peak Power) เป็นค่าพลังงานสูงสุดของระบบเรดาร์ ที่สามารถปล่อยออกไปได้, G (Gain) คือค่ากำลังขยาย ของระบบเรดาร์, λ คือ ความยาวคลื่นของระบบเรดาร์, σ (Radar Cross Section: RCS) คือค่าเฉพาะที่สะท้อน จากเป้าหมายแต่ละชนิดหรือเรียกว่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์, k (Boltzman Constant) คือค่าคงที่ของบ็อลทซ์มัน, B (Bandwidth) คือ ความกว้างของช่วงคลื่นที่ถูกส่งออก แล้วในแต่ละครั้ง, T_e (Effective Temperature) คืออุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การทำงานของระบบเรดาร์, F (Number of Noise Figure) คืออัตราส่วนค่าสัญญาณ

ต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) ของ สัญญาณฝั่งเข้ากับค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ของสัญญาณฝั่งออกและตัวแปรตัวสุดท้ายคือ $(SNR)_{min}$ เป็นค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนน้อยที่สุดที่ยังสามารถ ตรวจจับเป้าหมายได้

ในกระบวนการคำนวณหาค่า $(SNR)_{min}$ จำเป็นที่จะต้องดำเนินการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็น ในการตรวจจับ (Probability of Detection: P_d) กับ ความน่าจะเป็นในการแจ้งเตือนภัยผิดพลาดของ ระบบเรดาร์ (Probability of False Alarm: P_{FA}) โดย ได้มีงานวิจัยหลายชิ้นเพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรนี้และจาก หลายงานวิจัยที่เกิดขึ้นมา ได้สรุปกระบวนการวิเคราะห์ หาค่าของ $(SNR)_{min}$ ในรูปสมการอย่างง่าย โดยใช้สมการ ของอัลเบิร์ตซิม [22] [25] [26]

$$SNR = -5 \log_{10} N + \left(6.2 + \frac{4.54}{\sqrt{N+0.44}} \right) C \quad (2)$$

โดยมีค่าของตัวแปรคือ

$$A = \ln \left(\frac{0.62}{P_{FA}} \right)$$

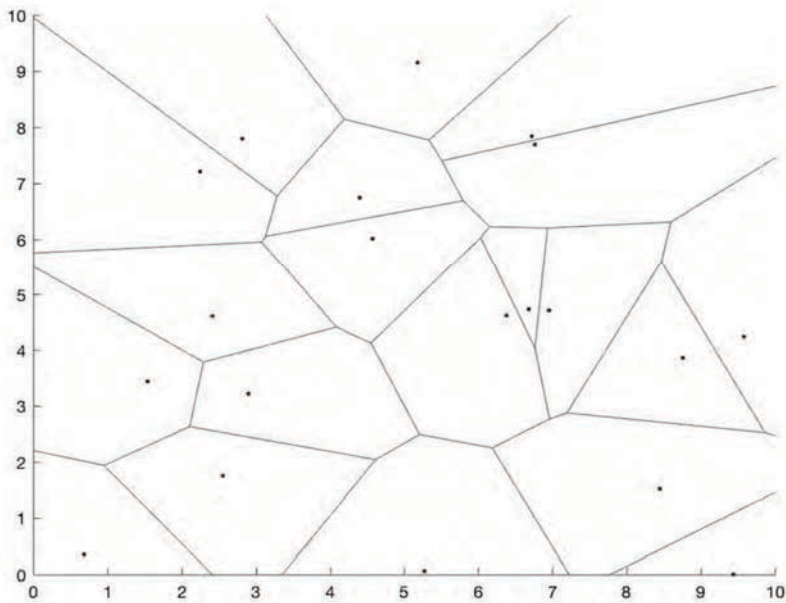
$$B = \ln \left(\frac{P_d}{1 - P_d} \right)$$

$$C = \log_{10} (A + 0.12AB + 1.7B)$$

เมื่อนำมาคำนวณหาค่าของ $(SNR)_{min}$ ในระบบเรดาร์ของ ข้าศึกแล้ว ค่าเหล่านี้จะถูกนำกลับไปแทนค่าในสมการหา ระยะการตรวจจับไกลสุดของระบบเรดาร์ในสมการที่ (1) เพื่อหาการครอบคลุมพื้นที่ของระบบเรดาร์ข้าศึกต่อไป

2.2 สร้างแผนภาพตาข่ายไวโรนอยในพื้นที่สนใจของการปฏิบัติการกิจ

แผนภาพไวโรนอย เป็นอัลกอริทึมชนิดหนึ่งในการ สร้างแผนภาพตาข่ายขึ้นมา โดยในกระบวนการสร้าง แผนภาพตาข่ายจะดำเนินการให้จุดแต่ละจุดบนเส้นเชื่อม (Path) (เส้นสีแดงในรูปที่ 1) ของแผนภาพไวโรนอยจะมี



รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของแผนภาพไวโรนอย จุดที่กำหนด (Site) เป็นจุดน้ำเงิน เส้นเชื่อม (Path) เป็นเส้นสีแดง

ระยะห่างระหว่างไซด์ (Site) หรือจุดที่ถูกกำหนดขึ้นมาก่อน (จุดสีน้ำเงินในรูปที่ 1) สองไซด์ที่อยู่ติดกันเป็นระยะทางที่เท่ากัน [3] [13]

2.3 การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดที่ไม่เข้าไปในพื้นที่การตรวจจับของระบบเรดาร์ข้าศึก

ในกระบวนการต่อไปคือการดำเนินการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากจุดเริ่มต้นไปยังเป้าหมายโดยที่จะต้องดำเนินการหลบหลีกระบบเรดาร์ตรวจจับของข้าศึก ในงานวิจัยชิ้นนี้จะดำเนินการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมของไดจ์สตรา (Dijkstra's Algorithm) [9] [11] โดยอัลกอริทึมนี้ถูกคิดค้น

ขึ้นมาโดยการใช้ทฤษฎีกราฟเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ เป็นอัลกอริทึมสำหรับการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุด โดยจะดำเนินการค้นหาโดยการไล่หาจุดแต่ละจุดและบวกค่าระยะทางหรือค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างจุด เพื่อให้ได้เส้นทางที่มีระยะทางที่สั้นที่สุด ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ง่ายและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ได้ เช่น การค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับการเดินทาง การวางแผนโครงข่าย การส่งสินค้า การจัดเส้นทางขนส่ง อัลกอริทึมของไดจ์สตรายังมีความนิยมอย่างมากในหลายงานวิจัย เช่น ในงานวิจัยของ Broumi et al. (2016) และ Qing et al. (2017)

2.4 ดำเนินการปรับเส้นทางให้ราบเรียบเหมาะสมกับการเดินทางของอากาศยาน

เนื่องจากเส้นทางที่ได้จากประยุกต์ใช้อัลกอริทึมของโดว์สตราจะเป็นเส้นทางที่เชื่อมแผนภาพโครงข่ายของไวโรนอย ซึ่งจะมีการหักมุมและมีการเลี้ยวที่มุมแคบอยู่ โดยเส้นทางเหล่านี้ยังไม่เหมาะสมกับการวางแผนเดินทางของอากาศยาน ในกระบวนการต่อไปคือการนำจุดแต่ละจุดของเส้นทางเดินจากผลลัพธ์ของอัลกอริทึมของโดว์สตรามาดำเนินการทำให้เส้นทางราบเรียบขึ้น โดยในกระบวนการนี้จะใช้การประมาณค่าด้วยสมการพหุนาม (Polynomial Interpolation) [23] ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการพื้นฐานในการประมาณค่าของเส้นกราฟ อีกทั้งยังเป็นที่ยอมรับในหลายงานวิจัย เช่น ในงานวิจัย Dai & Cochran (2010) และ Artuñedo et al. (2017)

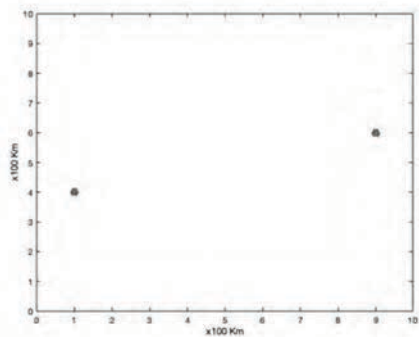
3. ผลการทดสอบ

ในการประยุกต์ใช้แผนภาพไวโรนอยมาดำเนินการหาเส้นทางที่ดีที่สุดในการปฏิบัติการกิจของอากาศยานนั้น เพื่อเป็นการทดสอบอัลกอริทึมและการประยุกต์ใช้ ในขั้นตอนแรก คือการทดสอบอัลกอริทึม โดยในกระบวนการนี้จะดำเนินการสมมุติค่าตัวแปรต่าง ๆ ขึ้นมา ซึ่งค่าตัวแปรเหล่านี้สามารถปรับเปลี่ยนให้ถูกต้องได้ในภายหลัง เมื่อดำเนินการนำอัลกอริทึมชนิดนี้ไปใช้จริง แต่อย่างไรก็ตาม ค่าตัวแปรเหล่านี้ก็ยิ่งใกล้เคียงกับค่าตัวแปรของระบบเรดาร์และอากาศยานที่มีใช้จริงในประเทศไทย

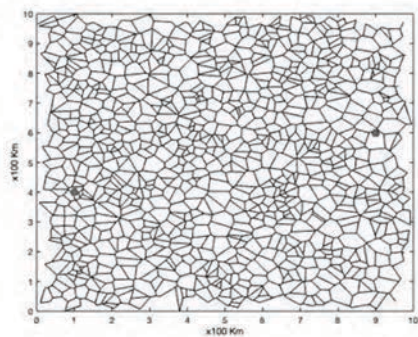
โดยค่าของตัวแปรต่าง ๆ มีค่าดังนี้คือ $P_d = 0.95$, $PFA = 0.0001$ ซึ่งสองค่านี้สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหา $(SNR)_{min} = 12.2387$ dB จากนั้นจะเป็นการนำค่า $(SNR)_{min}$ ไปใช้ในการกระบวนการคำนวณหาระยะตรวจจับไกลสุด (R_{max}) โดยค่าตัวแปรที่เหลือมีดังนี้ $P_t = 1$ MW, $f = 1$ GHz, $\lambda = 0.3$ m, $G = 20$ dB, $B = 0.1$ Mhz, $F = 0$ และ $L = 3$ dB จากค่าตัวแปรเหล่านี้ ทำให้สามารถคำนวณระยะการตรวจจับไกลสุด โดยได้เท่า $R_{max} = 100.4260$ กิโลเมตร ซึ่งระยะตรวจจับไกลสุดของระบบเรดาร์ข้าศึกจะถูกนำไปใช้ในประยุกต์ใช้อัลกอริทึมต่อไป

ในการทดสอบอัลกอริทึมครั้งนี้ ได้กำหนดพื้นที่สนใจ (Area of Interest) ของสมรภูมิไว้ $1,000 \times 1,000$ ตารางกิโลเมตร และกำหนดพิกัดจุดเริ่มต้นของอากาศยานอยู่ที่พิกัด (1, 4) และพิกัดของเป้าหมายในการปฏิบัติการกิจอยู่ที่พิกัด (9, 6) โดยพิกัดทั้งสองจุดอยู่ห่างกัน 824.6211 กิโลเมตร ในสถานการณ์นี้จะมีเรดาร์ตรวจจับของข้าศึกอยู่ที่พิกัด (3, 4), (5, 4) และ (7, 6) ซึ่งเรดาร์ทั้งสามมีระยะตรวจจับที่เท่ากันอยู่ที่ 100.4260 กิโลเมตร

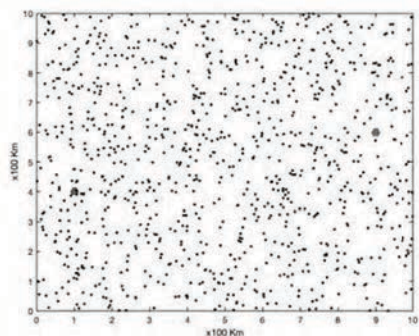
ในรูปที่ 2 (a) เป็นพื้นที่สนใจในการปฏิบัติการกิจ (Area of Interest) โดยมีพิกัดของจุดเริ่มต้นและพิกัดของเป้าหมายแสดงด้วยจุดสีแดง ในรูปที่ 2 (b) อัลกอริทึมจะดำเนินการสุ่มสร้างจุดขึ้นมา 1,000 จุด ซึ่งจุดนี้จะถูกใช้เป็นไซด์ (Site) ในอัลกอริทึมไวโรนอย ในกระบวนการนี้จำนวนจุดที่ยิ่งมากจะทำให้เส้นทางการเดินทางของอากาศยานมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น แต่เวลาที่ใช้ในกระบวนการคำนวณก็จะเสียมากขึ้นเช่นกัน รูปที่ 2 (c) จะดำเนินการใช้อัลกอริทึมสร้างแผนภาพไวโรนอยรอบ ๆ จุดที่ดำเนินการสุ่มขึ้นมาในกระบวนการที่แล้ว ซึ่งแผนภาพโครงข่ายเหล่านี้คือเส้นทางเดิน (Path) ในอัลกอริทึมของไวโรนอย รูปที่ 2 (d) ดำเนินการตัดจุดที่สุ่มขึ้นมาเพื่อให้คงเหลือไว้แต่เส้นทางเดินตาม เพื่อจะนำไปใช้ต่อไป รูปที่ 2 (e) ดำเนินการสร้างระบบเรดาร์ทั้งสามระบบลงในแผนภาพตามพิกัดที่ได้กล่าวไว้แล้ว ในรูปที่ 2 (f) อัลกอริทึมจะดำเนินการตัดเส้นทางที่ถูกครอบคลุมด้วยระบบเรดาร์ข้าศึกและไม่เหมาะสมต่อการเดินทางของอากาศยานออกไป รูปที่ 2 (g) ได้ดำเนินการใช้อัลกอริทึมของโดว์สตราหาเส้นทางที่สั้นที่สุด ที่อยู่นอกเหนือพื้นที่ตรวจจับ และในรูปสุดท้ายรูปที่ 2 (h) ดำเนินการใช้การประมาณค่าจุดตามเส้นทางเดินบนแผนภาพไวโรนอยมาทำให้ราบเรียบขึ้นด้วยการใช้การประมาณค่าด้วยสมการพหุนามดีกรี 7 โดยผลลัพธ์เป็นเส้นทางเดินที่มีความยาว 879.1108 กิโลเมตร จากพิกัดเริ่มต้น จากนั้นหลบหลีกระบบเรดาร์ทั้งสามไปยังเป้าหมายสุดท้าย ด้วยระยะทางที่มากกว่าเส้นตรงอยู่ 54.4897 กิโลเมตร



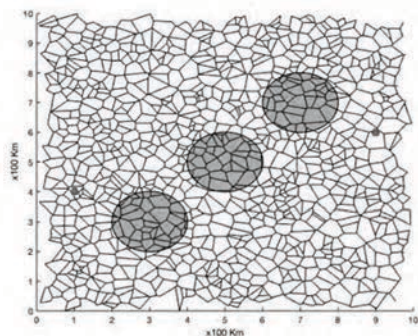
(a)



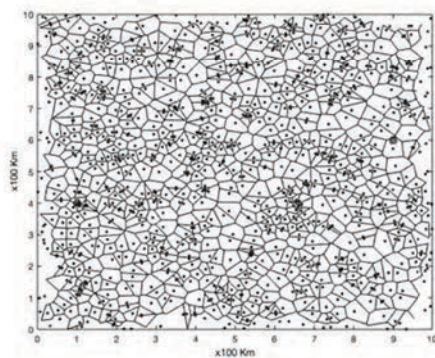
(d)



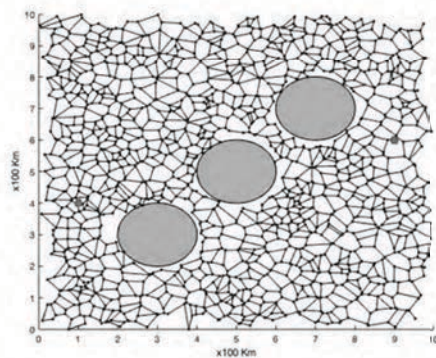
(b)



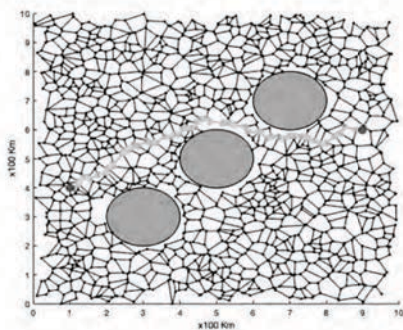
(e)



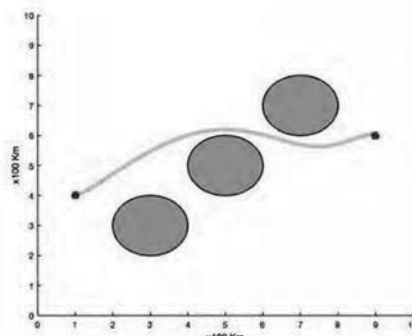
(c)



(f)



(g)



(h)

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างขั้นตอนการนำไปใช้ของแผนภาพโวโรนอย ในการหาเส้นทางที่เหมาะสมในการปฏิบัติการกิจของอากาศยาน

4. สรุปผล

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้แสดงแนวทางการประยุกต์ใช้แผนภาพโวโรนอยมาช่วยในการหาเส้นทางของอากาศยานในการปฏิบัติการกิจ ในสมรภูมิที่มีความซับซ้อนมากโดยทดสอบในสถานการณ์ที่จำลองขึ้นมา โดยในสมรภูมิมีพื้นที่สนใจอยู่ที่ 1,000x1,000 ตารางกิโลเมตร และระบบเรดาร์ตรวจจับของข้าศึกจำนวน 3 ระบบ ซึ่งทั้งสามระบบมีคุณสมบัติเหมือนกัน โดยสามารถตรวจจับได้ระยะไกลสุดอยู่ที่ 100.4260 กิโลเมตร และเส้นทางที่สั้นที่สุดที่สามารถเดินทางหลบระยะตรวจจับของระบบเรดาร์ทั้งสามมีระยะอยู่ที่ 896.11 กิโลเมตร จากพิกัดเริ่มต้น

ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าแผนภาพโวโรนอยสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับอัลกอริทึมอื่นจนสามารถดำเนินการหาเส้นทางที่เหมาะสมในการเดินทางของอากาศยานในการปฏิบัติการกิจได้ดี โดยอัลกอริทึมไม่ซับซ้อนรองรับกับสถานการณ์ได้หลายรูปแบบ โดยสามารถดำเนินการประยุกต์เพิ่มเติมได้ง่าย ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มจำนวนระบบเรดาร์ รูปแบบเรดาร์ การเคลื่อนที่ของระบบเรดาร์

นอกจากนี้แล้วอัลกอริทึมนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการช่วยคำนวณข้อมูลพื้นฐานให้นักบินในสถานการณ์ที่สมรภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทั้งจำนวนเรดาร์

ตำแหน่งเรดาร์เคลื่อนที่ อากาศยานข้าศึก ตำแหน่งปืนต่อสู้ อากาศยานเคลื่อนที่ ที่มี ความซับซ้อนมากจนการตัดสินใจด้วยตัวนักบินเองอาจมีโอกาสดผิดพลาดได้ และในการพัฒนาต่อยอดของอัลกอริทึมนี้ยังทำได้ง่ายและหลากหลาย เช่น เพิ่มความถูกต้องของพื้นที่ครอบคลุมของระบบเรดาร์โดยวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุมของระบบเรดาร์จากผลกระทบของสิ่งแวดล้อม ความสูงต่ำของภูมิประเทศ การเลี้ยวเบนของคลื่น การรบกวนสัญญาณของระบบอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งยังสามารถกำหนดพื้นที่ห้ามบินเข้าและตัวแปรอื่น ๆ ให้ละเอียดมากยิ่งขึ้นได้อีกด้วย

อีกแนวทางของการพัฒนาต่อยอดอัลกอริทึมนี้ คือใช้ในการวิเคราะห์การวางระบบเรดาร์ในการตรวจจับข้าศึกของฝ่ายเรา โดยอัลกอริทึมนี้จะช่วยวิเคราะห์หาเส้นทางที่เป็นจุดอ่อนของระบบป้องกันข้าศึกว่าอยู่แนวใด ระยะทางเท่าใด ข้าศึกสามารถโจมตีพื้นที่ใดบ้าง ทำให้ทราบความเป็นไปได้ของเส้นทางที่ศัตรูจะใช้ในภาวะสงคราม ทำให้สามารถมีการวางแผนป้องกัน หรือมีการ เพิ่มเติมระบบเรดาร์แบบเคลื่อนที่ได้ เพื่อให้มีระบบเรดาร์ที่มีความสามารถในการครอบคลุมพื้นที่เสี่ยงภัยได้อย่างครอบคลุมในภาวะสงครามอีกด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Al-Dahhan, M. R. H., & Schmidt, K. W. Path Planning Based on Voronoi Diagram and PRM for Omnidirectional Mobile Robots. 2019.
- [2] Artuñedo, A., Godoy, J., & Villagra, J. A comparison of local path-planning interpolation methods for autonomous driving in urban environments. In Industriales research meeting, p. 147, 2017.
- [3] Aurenhammer, F., Voronoi diagrams: A survey of a fundamental geometric data structure, ACM Computing Surveys, 23, 345-405, 1991.
- [4] 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, 1799-1801, 2019.
- [5] Beard, R. W., McLain, T. W., Goodrich, M. and Anderson, E. P., Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 18, 911-922, 2002.
- [6] Bortoff, S. A., Path planning for UAVs, In Proceedings of the American Control Conference, 6, 364 – 368, 2000.
- [7] 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), 412-416, IEEE, 2016.
- [8] Candeloro, M., Lekkas, A. M., & Sørensen, A. J., A Voronoi-diagram-based dynamic path-planning system for underactuated marine vessels, Control Engineering Practice, 61, 41-54, 2017.
- [9] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., Stein, C., Dijkstra's algorithm, Introduction to Algorithms (Second ed.), MIT Press and McGraw-Hill, 595-601, 2001.
- [10] Dai, R., & Cochran Jr, J., Path planning and state estimation for unmanned aerial vehicles in hostile environments, Journal of guidance, control, and dynamics, 33(2), 595-601. 2010.
- [11] Dijkstra, E., A note on two problems in connexion with graphs, Numerische Mathematik, 1, 269-271, 1959.
- [12] Garrido, S., Moreno, L., and Blanco, D., Voronoi diagram and Fast Marching applied to path planning, In Proceedings of ICRA, 3049-3054, 2006.
- [13] Garrido, S., & Moreno, L., Mobile robot path planning using voronoi diagram and fast marching, In Robotics, Automation, and Control in Industrial and Service Settings, 92-108, IGI Global, 2015.
- [14] Liang, Y., Juntong, Q., Jizhong, X. and Xia, Y., A literature review of UAV 3D path planning, IEEE Xplore, 2015.
- [15] Mahafza, B., Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, Chapman & Hall/CRC, 2000.
- [16] Mahafza, B and Elsherbeni, A., MATLAB Simulations for Radar Systems Design, Chapman & Hall/CRC, 2004.
- [17] Makarov, I., Polyakov, P., & Karpichev, R., Voronoi-based Path Planning based on Visibility and Kill/Death Ratio Tactical Component, In AIST (Supplement), 129-140, 2018.

- [17] McLain T. W. and Beard, R. W., Trajectory planning for coordinated rendezvous of unmanned air vehicles, In Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 1247–1254, 2000.
- [18] Murphy, R., Uryasev, S. and Zabaranin, M., Trajectory optimization in a threat environment, Research report 9, Department of Industrial and Systems Engineering, University of Florida, 2003.
- [19] Özcan, M., & Yaman, U., A continuous path planning approach on Voronoi diagrams for robotics and manufacturing applications, *Procedia Manufacturing*, 38, 1-8. 2019.
- [20] Qing, G., Zheng, Z., & Yue, X., Path-planning of automated guided vehicle based on improved Dijkstra algorithm, In 2017 29th Chinese control and decision conference (CCDC), 7138-7143, IEEE, 2017.
- [21] Richards, 2005 Richards, M. A., *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York: McGraw-Hill, 2005.
- [22] Schatzman, M., *Numerical Analysis: A Mathematical Introduction*, Oxford, Clarendon Press, 2002.
- [23] Shi, Y., Zhang, L., & Dong, S., Path Planning of Anti-ship Missile based on Voronoi Diagram and Binary Tree Algorithm, *Defence Science Journal*, 69(4), 369-377. 2019.
- [24] Skolnik, M., *Radar Handbook*, McGraw-Hill, 1990.
- [25] Skolnik, M. *Introduction to Radar Systems*, 3rd Ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [26] Tang, F., You, X., Zhang, X., & Li, K., Hexagon-Based Generalized Voronoi Diagrams Generation for Path Planning of Intelligent Agents, *Mathematical Problems in Engineering*, 2020.
- [27] Turnbull, O., Lawry, J., Lowenberg, M., & Richards, A., A cloned linguistic decision tree controller for real-time path planning in hostile environments, *Fuzzy Sets and Systems*, 293, 1-29, 2016.
- [28] Willis, N. J. *Bistatic Radar*, Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2005.
- [29] Yang, L., Qi, J., Xiao, J., & Ycng, X., A literature review of UAV 3D path planning, In *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2376-2381, IEEE, 2014.