



การออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับอากาศยานไร้คนขับสำหรับภารกิจลอบเร้นสู่เป้าหมายในพื้นที่อันตราย

รัฐกรณ์ ประเสริฐลักษณ์* และ สมชาติ จิรวิภากร

สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 4798 2400 อีเมล: 64601236@kmitl.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.10.016

รับเมื่อ 7 มีนาคม 2567 แก้ไขเมื่อ 8 กรกฎาคม 2567 ตอรับเมื่อ 5 สิงหาคม 2567 เผยแพร่ออนไลน์ 17 ตุลาคม 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

อากาศยานไร้คนขับได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากสำหรับภารกิจทางทหารในปัจจุบัน การพัฒนาให้อากาศยานไร้คนขับสามารถปฏิบัติภารกิจที่มีความซับซ้อนและอันตรายได้โดยอัตโนมัติจึงมีความสำคัญมาก การทำให้อากาศยานไร้คนขับสามารถปฏิบัติภารกิจตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น คือ การออกแบบพัฒนาอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับอากาศยานไร้คนขับสำหรับภารกิจลอบเร้นสู่เป้าหมายในพื้นที่อันตรายโดยมุ่งเน้นประยุกต์ใช้ในพื้นที่ในร่ม การออกแบบอัลกอริทึมการวางแผนหาเส้นทางการเคลื่อนที่ในงานวิจัยนี้ใช้พื้นฐานจากอัลกอริทึมการวางแผนหาเส้นทางการเคลื่อนที่แบบ A* ของ Ren และทำการปรับปรุงให้สามารถหลบหลีกได้ทั้งสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามทั้งในรูปแบบหยุดนิ่งและรูปแบบพลวัต โดยประยุกต์ใช้อัลกอริทึม Lifelong Planning A* และ D*lite ของ Sven Koenig และ Maxim Likhachev จากนั้นทำการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบอัลกอริทึมการวางแผนหาเส้นทางการเคลื่อนที่ทั้ง 3 แบบ ด้วยการจำลองผ่านโปรแกรม Python ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่พัฒนาจาก D*lite จะให้ผลลัพธ์ระยะทางในการเคลื่อนที่ (Path Length) ที่สั้นกว่าอัลกอริทึมที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A* เฉลี่ย 4% แต่ให้ผลลัพธ์ระยะทางในการเคลื่อนที่เฉลี่ยยาวกว่าเมื่อเทียบกับอัลกอริทึม A* ของ Ren 1.5% เช่นเดียวกันเวลาที่ใช้ในการหาเส้นทางที่เหมาะสม (Execute Time) ที่เมื่อเทียบกับอัลกอริทึม Lifelong Planning A* จะใช้เวลาเฉลี่ยน้อยกว่า 530.8% แต่เมื่อเทียบกับอัลกอริทึม A* ของ Ren จะใช้เวลามากกว่า 14.7% อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสามารถในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของอัลกอริทึม A* ของ Ren ไม่สามารถหลบหลีกได้ แตกต่างจากอัลกอริทึมที่พัฒนาจาก D*lite และ Lifelong Planning A* ที่สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้เป็นอย่างดี ดังนั้นอัลกอริทึมที่ประยุกต์จาก D*lite จึงมีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำไปต่อยอดประยุกต์ใช้สำหรับภารกิจลอบเร้นสู่เป้าหมายในพื้นที่อันตรายที่อากาศยานไร้คนขับต้องสามารถเคลื่อนที่โดยอัตโนมัติและตอบสนองต่อสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ การวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ อัลกอริทึม A* อัลกอริทึม D*lite ระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

การอ้างอิงบทความ: รัฐกรณ์ ประเสริฐลักษณ์ และ สมชาติ จิรวิภากร, “การออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับอากาศยานไร้คนขับสำหรับภารกิจลอบเร้นสู่เป้าหมายในพื้นที่อันตราย,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 35, ฉบับที่ 3, หน้า 1–14, เลขที่บทความ 253-087557, ก.ค.-ก.ย. 2568.



Design and Development Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles for Stealth Missions in Dangerous Environments

Ruttagorn Prasertlux* and Somchat Jiriwibhakorn

Defence Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 4798 2400, E-mail: 64601236@kmitl.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.10.016

Received 7 March 2024 ; Revised 8 July 2024 ; Accepted 5 August 2024; Published online: 17 October 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Today, unmanned aerial vehicles (UAVs) play an important role in military applications. The development of UAVs to perform complex and dangerous missions is critical. Effective design and path planning are essential for enabling UAVs to undertake such missions. This research proposes a path-planning algorithm for UAVs to automatically perform stealth missions in hazardous environments. The proposed algorithm is intended for indoor applications. The design of the path-planning algorithm in this research is based on the A* algorithm developed by Ren Tianzhu. This algorithm was modified using elements from the Lifelong Planning A* and D* Lite algorithms, developed by Prof. Sven Koenig and Prof. Maxim Likhachev, to address both static and dynamic obstacles and threats. All three path-planning algorithms were evaluated through simulations using a Python program. The results show that the D* Lite-based algorithm typically results in a path length that is 4% shorter on average compared to the Lifelong Planning A* algorithm, but 1.5% longer on average compared to the A* algorithm developed by Ren. Additionally, the execution time for the D* Lite-based algorithm is on average 530.8% less than that of the Lifelong Planning A* algorithm, but 14.7% more compared to the A* algorithm developed by Ren. Despite this, the A* algorithm developed by Ren cannot find paths that avoid dynamic obstacles or threats. In contrast, both the D* Lite and Lifelong Planning A* algorithms can effectively navigate around such dynamic obstacles and threats. Overall, the D* Lite-based path planning demonstrates superior performance compared to both the A* and Lifelong Planning A* algorithms. It is well-suited for stealth missions in hazardous environments that require autonomous operation and the ability to avoid both static and dynamic threats.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, Path Planning, A* Algorithm, D*lite Algorithm, Avoidance System

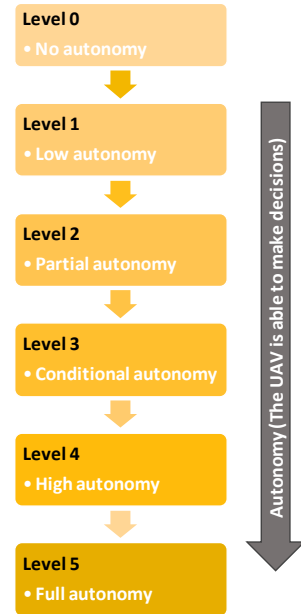
Please cite this article as: R. Prasertlux and S. Jiriwibhakorn, "Design and development path planning of unmanned aerial vehicles for stealth missions in dangerous environments," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 3, pp. 1-14, ID. 253-087557, Jul.-Sep. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

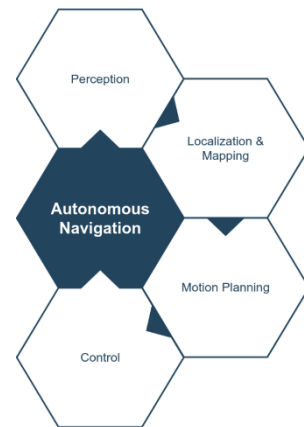
อากาศยานไร้คนขับหรือ UAV (Unmanned Aerial Vehicle) เข้ามามีบทบาทอย่างมากสำหรับการใช้ชีวิตในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นด้านเกษตร การสร้างและซ่อมบำรุงอาคารและระบบสาธารณูปโภค เป็นต้น นอกจากนี้กิจกรรมของพลเรือน อากาศยานไร้คนขับได้ถูกนำมาใช้ในภารกิจทางทหาร เช่น การสำรวจพื้นที่ข้าศึก การเฝ้าระวังและการติดตามข้าศึก หรือการโจมตีข้าศึก ปัจจัยสำคัญที่ทำให้อากาศยานไร้คนขับถูกนำมาใช้ในภารกิจทางทหารซึ่งมีความซับซ้อนและเสี่ยงอันตรายสูง คือ การปฏิบัติงานโดยอัตโนมัติ [1]

เราสามารถแบ่งระดับการปฏิบัติงานโดยอัตโนมัติของอากาศยานไร้คนขับเป็น 6 ระดับจากระดับที่ 0 ถึงระดับที่ 5 [2] ตามรูปที่ 1 โดยระดับที่ 0 เป็นอากาศยานไร้คนขับที่ต้องใช้นักบินบังคับตลอดรอบการบิน ระดับที่ 1 เป็นอากาศยานไร้คนขับที่บางฟังก์ชันการทำงานโดยอัตโนมัติ เช่น ฟังก์ชันควบคุมเสถียรภาพการบินแต่ในการบินยังใช้นักบินบังคับเป็นส่วนใหญ่ ระดับที่ 2 เป็นอากาศยานไร้คนขับที่มีหลายฟังก์ชันการทำงานโดยอัตโนมัติแต่นักบินยังต้องควบคุมบังคับในบางส่วน ระดับที่ 3 เป็นอากาศยานไร้คนขับที่ฟังก์ชันการทำงานโดยส่วนใหญ่ทำงานอัตโนมัติแต่ยังต้องใช้นักบินในการกำหนดและตัดสินใจในภารกิจ ระดับที่ 4 เป็นอากาศยานไร้คนขับที่สามารถปฏิบัติการได้โดยอัตโนมัติโดยนักบินสามารถเข้าควบคุมบางฟังก์ชันถ้าจำเป็น และระดับ 5 เป็นอากาศยานไร้คนขับที่สามารถปฏิบัติการโดยปราศจากการควบคุมของนักบิน อากาศยานไร้คนขับประเภทนี้สามารถตัดสินใจอย่างอิสระรวมทั้งเรียนรู้จากสิ่งที่ตรวจจับได้ในการปรับปรุงเพิ่มความสามารถในการปฏิบัติงานโดยอัตโนมัติการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก [3]

การวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นวิธีการในการกำหนดตำแหน่งและท่าทางการเคลื่อนที่ให้กับอากาศยานไร้คนขับในการเคลื่อนที่โดยอัตโนมัติ ส่วนประกอบของฟังก์ชันการเคลื่อนที่โดยอัตโนมัติประกอบด้วย การรับรู้ข้อมูลแวดล้อม การระบุตำแหน่งและการสร้างแผนที่ การวางแผนการเคลื่อนที่และการควบคุมการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 2 [4]

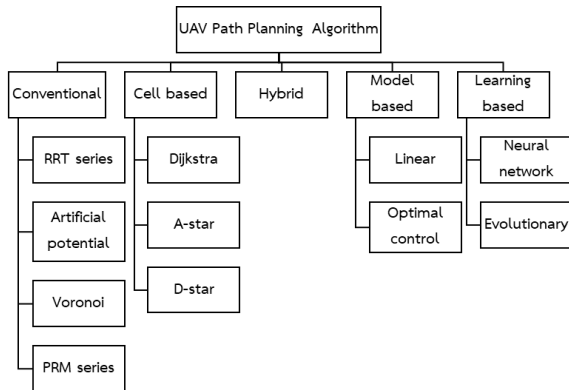


รูปที่ 1 ระดับความเป็นอัตโนมัติของอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของฟังก์ชันการเคลื่อนที่โดยอัตโนมัติ

การวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ที่สามารถแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม คือ แบบดั้งเดิม แบบอิงตามการแบ่งพื้นที่ค้นหาเป็นช่องแบบผสมผสาน แบบอิงวิธีโมเดลและแบบอิงวิธีอัลกอริทึมการเรียนรู้ดังในรูปที่ 3 [5] โดยอัลกอริทึม Mixed Integer Linear Programming (MILP) และ Optimization ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่แบบอิงวิธีโมเดลได้ถูกพัฒนาในการหาเส้นทางลาดตระเวนโดยสามารถ



รูปที่ 3 ประเภทของอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่

หลบหลีกสิ่งกีดขวางใน [6], [7] ตามลำดับ ซึ่งอัลกอริทึมประเภทนี้ได้ให้ผลลัพธ์ระยะทางที่สั้นที่สุด แต่ยากในการประยุกต์ใช้ในงานที่มีความซับซ้อนเนื่องจากต้องสร้างโมเดลที่ซับซ้อน รวมทั้งเวลาในการประมวลผลที่นาน อัลกอริทึมแบบการเรียนรู้ เช่น Meta-heuristic, Bat และ Parallel Evolutionary ดังใน [8]–[10] ได้ถูกพัฒนาเพื่อหาเส้นทางที่เหมาะสมในการเข้าสู่เป้าหมายโดยสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามของอากาศยานไร้คนขับ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมประเภทนี้ให้เส้นทางที่สั้นที่สุดแม้ในสถานการณ์ที่ซับซ้อน แต่มีจุดอ่อนเรื่องเวลาในการประมวลผลที่นานและต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถในการประมวลผลสูง อัลกอริทึมตระกูล RRT (Rapidly Exploring Random Tree) ที่เป็นอัลกอริทึมแบบดั้งเดิมถูกนำมาพัฒนาประยุกต์ใช้เพื่อหาเส้นทางการเคลื่อนที่อย่างหลากหลายตามงานวิจัย [13]–[17] ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมกลุ่มนี้จะมีจุดเด่นในด้านความรวดเร็วในการประมวลผล แต่มีข้อด้อยเรื่องเส้นทางที่หาได้อาจไม่ใช่ผลลัพธ์โดยรวมที่ดีที่สุด ทำให้ผลลัพธ์ระยะทางยาวกว่าอัลกอริทึมอื่นอย่างมาก สำหรับอัลกอริทึมตระกูล A-star ที่เป็นอัลกอริทึมแบบอิงตามการแบ่งพื้นที่ค้นหาเป็นช่อง เป็นอัลกอริทึมที่ถูกนำมาพัฒนาประยุกต์ใช้เพื่อหาเส้นทางการเคลื่อนที่ให้อากาศยานไร้คนขับในภารกิจทางทหารมากที่สุด [11], [12] เนื่องจากความง่ายในการปรับแต่งเพื่อประยุกต์ใช้และความรวดเร็วในการประมวลผล

ผลลัพธ์ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานแบบทันเวลา แต่มีข้อด้อยในด้านคุณภาพของเส้นทางที่ประมวลได้เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมกลุ่มแบบการเรียนรู้และแบบอิงวิธีโมเดล อัลกอริทึมตระกูล A-star ยังเป็นรากฐานในการพัฒนาอัลกอริทึมตระกูล D-star เพื่อใช้ในงานที่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตามเวลา [5] นอกจากนี้เพื่อกำจัดข้อด้อยในเรื่องคุณภาพของเส้นทางและเวลาในการประมวลผลของอัลกอริทึม อัลกอริทึมแบบผสมผสานได้ถูกพัฒนาขึ้น เช่น พัฒนาอัลกอริทึม Meta-heuristic ผสานกับอัลกอริทึม A-star ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ทำให้คุณภาพของเส้นทางและเวลาในการประมวลผลของอัลกอริทึมที่พัฒนาอยู่ระหว่างอัลกอริทึมที่นำมาผสาน [18] เห็นได้ว่าในปัจจุบันยังไม่มีอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ใดที่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีในทุกสถานการณ์ การพัฒนาอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่เพื่อให้อากาศยานไร้คนขับปฏิบัติการกิจในสภาพแวดล้อมที่กำหนดจริงเป็นหัวข้อที่สำคัญและท้าทายเป็นอย่างยิ่ง

ในงานวิจัยนี้เพื่อให้อากาศยานไร้คนขับสามารถเคลื่อนที่ในเส้นทางที่สั้นที่สุดในสิ่งแวดล้อมแบบ 3 มิติ ใช้เวลาประมวลผลน้อยที่สุด รวมทั้งหลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา อัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่จึงได้ถูกออกแบบพัฒนาโดยประยุกต์ใช้อัลกอริทึม Lifelong Planning A* และ D*lite แล้วทำการปรับปรุงฟังก์ชัน Heuristic ให้อัลกอริทึมสำหรับการเข้าสู่เป้าหมายโดยหลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามทั้งในแบบหยุดนิ่งและแบบพลวัต อัลกอริทึมที่พัฒนานี้จะทำให้อากาศยานไร้คนขับมีความสามารถในการปฏิบัติงานโดยอัตโนมัติ สามารถตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ทันเวลา

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับอากาศยานไร้คนขับ โดยต่อยอดจากงานวิจัยของ Ren [19] ที่พัฒนาอัลกอริทึมให้สามารถหลบหลีกทั้งสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามโดยอาศัยพื้นฐานจากอัลกอริทึม A* ร่วมกับการปรับปรุงฟังก์ชัน Heuristic โดยงานวิจัยนี้

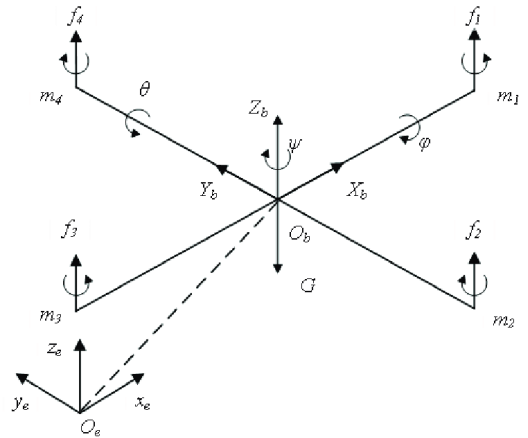
จะปรับปรุงข้อด้อยของอัลกอริทึม Ren [19] ที่ไม่สามารถตอบสนองต่อสถานการณ์พลวัตได้ โดยประยุกต์ใช้อัลกอริทึม Lifelong Planning A* และ D*lite แทนอัลกอริทึม A* เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสถานการณ์พลวัตได้ สำหรับแผนที่ในงานวิจัยนี้จะเป็นแผนที่ Metric ในรูปแบบ 3 มิติ แผนที่ดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ทดสอบอัลกอริทึมที่พัฒนาเพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพและสรุปผลการวิจัยในที่สุด

2.1 แผนที่สภาพแวดล้อม

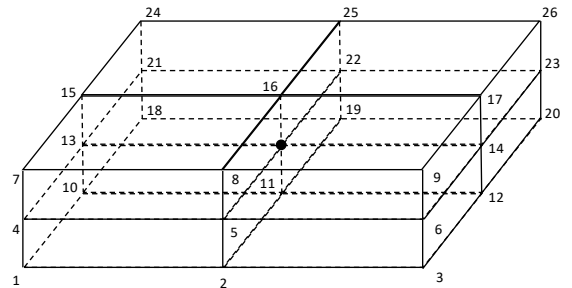
แผนที่สภาพแวดล้อมในงานวางแผนเส้นทางเคลื่อนที่ที่สามารถแบ่งได้เป็น 6 รูปแบบ [20] คือ แผนที่ Metric ซึ่งเป็นแผนที่ที่กำหนดตำแหน่งสิ่งแวดล้อมผ่านจุดพิกัดรวมทั้งกำหนดคุณลักษณะสิ่งแวดล้อมให้กับจุดพิกัดนั้น แผนที่ Topological ซึ่งเป็นแผนที่ที่กำหนดตำแหน่งและคุณลักษณะของสิ่งแวดล้อมผ่าน Node และ Arc แผนที่ Sparse, Semi-dense และ Dense โดยแผนที่ทั้ง 3 แผนที่สร้างข้อมูลทางภูมิศาสตร์ของสิ่งแวดล้อมที่ได้จากการตรวจจับเหมือนกัน ต่างกันที่ระดับความซับซ้อนของข้อมูลซึ่งมีผลต่อการใช้งานการวางแผนเส้นทางเคลื่อนที่ และแผนที่ Semantic ซึ่งกำหนดตำแหน่งและคุณลักษณะของสิ่งแวดล้อมผ่านชุดข้อมูลบริบทที่กำหนด โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แผนที่ Occupancy Grid ซึ่งเป็นแผนที่แบบ Metric ที่แบ่งแผนที่ออกเป็นช่องเท่ากัน โดยช่องที่แบ่งเป็นแบบช่องไม่ว่างซึ่งไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้และแบบช่องว่างซึ่งเคลื่อนที่ผ่านได้อิสระ โดยจะเป็นช่องแบบใดขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นที่กำหนดให้ แผนที่ Occupancy Grid ในงานวิจัยนี้ได้จากการสร้างโมเดลแผนที่จำลอง โดยกำหนดระยะช่องเท่ากับ 1 เมตร

2.2 จลนศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับ

สามารถอธิบายการเคลื่อนไหวของอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุนได้ตามรูปที่ 4 โดยแสดงการวางตัวของอากาศยานไร้คนขับได้ด้วยมุม φ ซึ่งหมุนรอบแกน X มุม θ ซึ่งหมุนรอบแกน Y และมุม ψ ซึ่งหมุนรอบแกน Z ส่วนตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับจะอธิบายตามค่า X, Y, Z ในแต่ละ



รูปที่ 4 แผนที่สภาพแวดล้อมอิสระของอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 5 แผนที่จุดที่สามารถเคลื่อนที่ได้ของอากาศยานไร้คนขับในการหาเส้นทางเคลื่อนที่

แนวแกน สำหรับในงานวิจัยการหาเส้นทางเคลื่อนที่นี้คำนึงถึงตำแหน่งโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงการวางตัวของอากาศยานไร้คนขับ จากคุณสมบัติของอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุนที่สามารถบินโอบทำให้ไม่มีข้อจำกัดในเรื่ององศาการเลี้ยวและการไต่ระดับ ทำให้งานวิจัยนี้สามารถกำหนดให้จุด หรือ เรียกว่า Vertex ที่สามารถค้นหาได้ในแต่ละขั้นตอนของการหาเส้นทางเคลื่อนที่มี 26 จุดและมีเส้นทางหรือเรียกว่า Edge 26 เส้นทางดังแสดงดังรูปที่ 5

2.3 สิ่งกีดขวาง ภัยคุกคามและข้อจำกัดในการวางแผนเส้นทางเคลื่อนที่

สิ่งกีดขวาง คือ บริเวณที่อากาศยานไร้คนขับไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้เช่น กำแพง อาคาร พื้นดิน หรือพื้นที่ห้าม

บิน เป็นต้น ภัยคุกคาม คือ บริเวณที่อากาศยานไร้คนขับสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้แต่มีโอกาสดังกล่าวได้รับความเสียหาย เช่น เรดาร์หรืออาวุธต่อต้านอากาศยานไร้คนขับ เป็นต้น ส่วนข้อจำกัดเส้นทางการเคลื่อนที่ของงานวิจัยนี้จะมีเฉพาะข้อจำกัดเส้นทางสูงสุดที่เคลื่อนที่ได้ ซึ่งจำกัดด้วยพลังงานที่เหลืออยู่ในอากาศยานไร้คนขับ

2.4 อัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่

อัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึม Lifelong Planning A* [21] และ D*lite [22] ของ Sven Koenig และ Maxim Likhachev ซึ่งแสดงขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมตามรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ โดยขั้นตอนของอัลกอริทึมทั้งสองเริ่มจากการนำเข้าข้อมูลแผนที่แบบ Occupancy Grid ที่ประกอบด้วยจุด (Vertex) และเส้นทาง (Edge) โดยมีการกำหนดค่าให้กับเส้นทางเพื่อบ่งบอกถึงความยากง่ายในการเดินทางจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งบนเส้นทางนั้น ต่อมาทำการนำเข้าข้อมูลภารกิจ เช่น จุดเริ่มต้นและจุดเป้าหมาย เป็นต้น จากนั้นอัลกอริทึมจะทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ k_m , $g(s)$, $rhs(s)$ และเมทริกซ์ U เมื่อ k_m คือ ค่าคงที่ในการปรับค่าคีย์ ($k(s)$) ในการจัดลำดับจุด $g(s)$ คือ ค่าเส้นทางรวมจากจุดเริ่มต้นมายังจุด s , $rhs(s)$ คือ ค่า $g(s)$ จากจุดเริ่มต้นมายังจุดก่อนหน้าจุด s (s') บวกกับค่าเส้นทางจากจุด s' มายังจุด s , และเมทริกซ์ U คือ เมทริกซ์ที่เก็บค่าจุดเพื่อใช้ในการจัดลำดับเพื่อหาเส้นทางการเคลื่อนที่ที่สั้นที่สุด จากขั้นตอนนี้การทำงานของอัลกอริทึมทั้งสองจะมีความแตกต่างกัน โดยอัลกอริทึม Lifelong Learning A* ทำการตรวจสอบว่ารอบคำนวณปัจจุบันมากกว่ารอบที่กำหนดหรือไม่ ถ้าไม่อัลกอริทึมจะทำการคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยเลือกจุดที่เคลื่อนที่ในแต่ละครั้งจากจุดที่มีค่าคีย์ $k(s)$ ที่น้อยที่สุดจากการเรียงลำดับค่าคีย์ของจุดที่สามารถเคลื่อนที่ถัดไปได้จากจุดนั้น ซึ่งสามารถหาค่าคีย์ได้ดังสมการที่ (1)

$$k(s) = [\min(g(s), rhs(s)) + h(s_{start}, s); \min(g(s), rhs(s))] \quad (1)$$

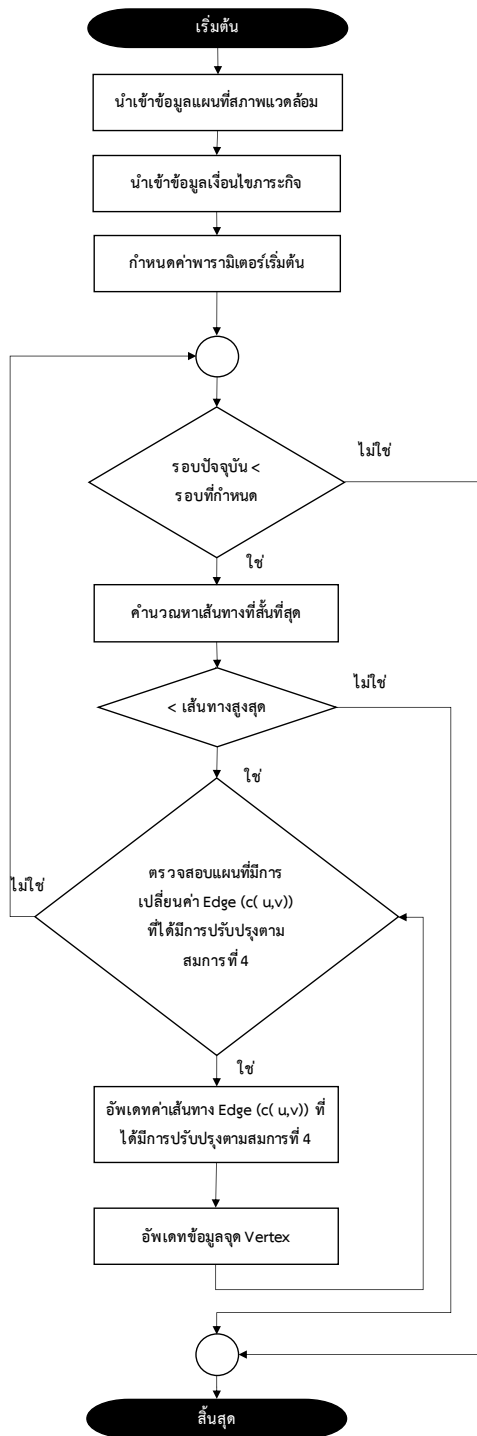
เมื่อ $h(s', s)$ คือ ค่าฮิวริสติกโดยคำนวณการกระจัดจากจุด s' ไปยังจุด s การหาเส้นทางจะเริ่มคำนวณจากจุดเป้าหมายไปยังจุดเริ่มต้น การหาเส้นทางจะขยายไปเฉพาะยังจุดที่ค่า $g(s)$ เท่ากับ $rhs(s)$ หรือ Locally Consistent ในขณะที่จุดที่ค่า $g(s)$ ไม่เท่ากับ $rhs(s)$ หรือ Locally Inconsistent อัลกอริทึมจะทำการปรับให้เป็น Locally Consistent ตามลำดับขั้นตอน ต่อมาเมื่อได้เส้นทางที่สั้นที่สุดแล้วจะทำการเปรียบเทียบต้องไม่เกินเส้นทางสูงสุดที่เคลื่อนที่ได้ซึ่งมาจากข้อจำกัดด้านพลังงานที่มีอยู่ ถ้าเกินทำการสิ้นสุดอัลกอริทึม ถ้าไม่เกินอัลกอริทึมทำการตรวจสอบแผนที่ว่ามีเปลี่ยนแปลงค่าเส้นทางหรือไม่ ถ้ามีอัลกอริทึมทำการอัปเดตค่าเส้นทางใหม่และข้อมูลจุด ($g(s)$ และ $rhs(s)$) ทั้งหมดจากนั้นทำการคำนวณเส้นทางที่สั้นที่สุดจนครบรอบคำนวณที่กำหนด ในขณะที่อัลกอริทึม D*lite คำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุดเช่นเดียวกับอัลกอริทึม Lifelong Planning A* แต่ค่าคีย์ $k(s)$ ที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นดังสมการที่ (2)

$$k(s) = [\min(g(s), rhs(s)) + h(s_{start}, s) + k_m; \min(g(s), rhs(s))] \quad (2)$$

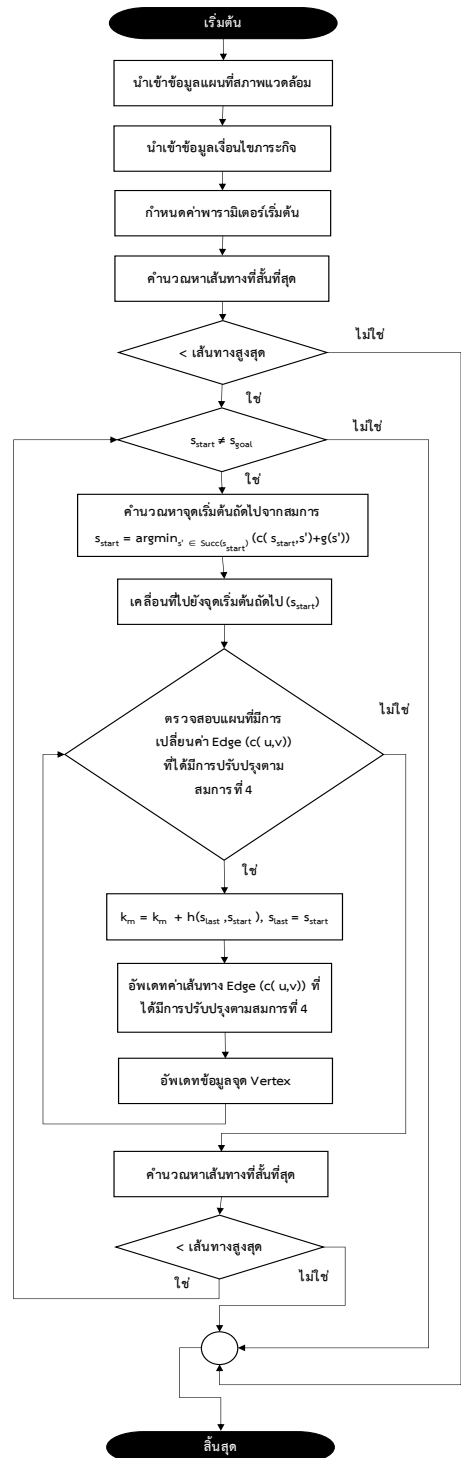
จากนั้นทำการตรวจสอบค่าเส้นทางสูงสุด ถ้าเกินทำการสิ้นสุดอัลกอริทึมและหยุดการเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับ ถ้าไม่เกินตรวจสอบว่าตำแหน่งเริ่มต้นไม่ใช่ตำแหน่งเดียวกับเป้าหมาย ถ้าเป็นตามเงื่อนไขอัลกอริทึมคำนวณตำแหน่งเริ่มต้นใหม่ตามสมการที่ (3)

$$s_{start} = \arg \min_{s' \in Succ(s_{start})} (c(s_{start}, s') + g(s')) \quad (3)$$

เมื่อ $Succ(s)$ คือ กลุ่มของจุดที่จะพบเป็นจุดถัดไปจากจุด s , $c(s', s)$ คือ ค่าเส้นทางจากจุด s' ไปจุด s จากนั้นเคลื่อนอากาศยานไร้คนขับไปยังจุดเริ่มต้นใหม่และทำการตรวจสอบแผนที่ว่ามีค่าเส้นทางหรือไม่ ถ้ามีอัลกอริทึมจะทำการอัปเดตค่า k_m ค่าเส้นทางใหม่และข้อมูลจุด ($g(s)$ และ $rhs(s)$) ทั้งหมด จากนั้นจึงทำการคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุดใหม่



รูปที่ 6 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมวางแผนเส้นทาง การเคลื่อนที่ที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A*



รูปที่ 7 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมวางแผนเส้นทาง การเคลื่อนที่ที่พัฒนาจาก D*lite

อีกครั้ง รวมทั้งเปรียบเทียบค่าเส้นทางที่ได้ต้องไม่มากกว่าเส้นทางสูงสุดที่เคลื่อนที่ได้ ทำซ้ำวนรอบจนอากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่ไปยังจุดเป้าหมายจึงจบขั้นตอนของอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงค่าเส้นทาง $c(u, v)$ โดยเพิ่มส่วนของค่าภัยคุกคามเข้าไปดังสมการที่ (4)

$$c(u, v) = (w_d \times d_{uv}) + (w_t \times t_{uv} \times d_{uv}) \quad (4)$$

เมื่อ w_d, w_t คือ ค่าน้ำหนักพารามิเตอร์ระยะทางและภัยคุกคามตามลำดับ d_{uv} คือ ระยะทางจากจุด v ไปจุด u และ t_{uv} คือ ค่าภัยคุกคามจากจุด v ไปจุด u ซึ่งการปรับปรุงนี้ทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ที่สามารถหลบหลีกได้ทั้งสิ่งกีดขวางและภัยคุกคาม

2.5 การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่

การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ในงานวิจัยนี้มุ่งประยุกต์ใช้กับพื้นที่ในร่ม ทำการทดสอบโดยจำลองผ่านโปรแกรม Python ทำการสร้างแผนที่จำลองพื้นที่ห้องโถงขนาด กว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 25×25×5 เมตร กำหนดตำแหน่งและขนาดของสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามแสดงดังตารางที่ 1 โดยสิ่งกีดขวางสี่เหลี่ยมแทนโครงสร้างอาคาร เฟอร์นิเจอร์และเครื่องจักร ในขณะที่ภัยคุกคามทรงกลมแทนคนและระบบตรวจจับโดรน กำหนดจุดเริ่มต้น $(x, y, z) = (1, 1, 1)$ และจุดเป้าหมาย $(x, y, z) = (23, 13, 2)$ นอกจากนั้นแบ่งสถานการณ์จำลองเป็น 3 แบบ คือ กำหนดให้สิ่งกีดขวางและภัยคุกคามไม่มีการเคลื่อนที่ กำหนดให้สิ่งกีดขวางหมายเลข 4 มีการเคลื่อนที่ 1 วัตถุ และกำหนดให้สิ่งกีดขวางเลขที่ 4 และภัยคุกคามเลขที่ 2 มีการเคลื่อนที่อย่างละ 1 วัตถุ ทำการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมสถานการณ์ละ 30 ครั้ง โดยทดสอบเทียบกับอัลกอริทึม A* ของงานวิจัย Ren [19] และ Lifelong Planning A*

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมเปรียบเทียบใน 3 ด้าน คือ ความสามารถในการหาเส้นทาง

การเคลื่อนที่ที่สั้นที่สุด ความสามารถในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามและเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาเส้นทางการเคลื่อนที่ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม A* ของ Ren [19] และ Lifelong Planning A* ที่มีมีการปรับปรุงค่าเส้นทางให้สามารถหลบภัยคุกคาม

ตารางที่ 1 รายละเอียดรูปร่างและตำแหน่งของสิ่งกีดขวางและภัยคุกคาม

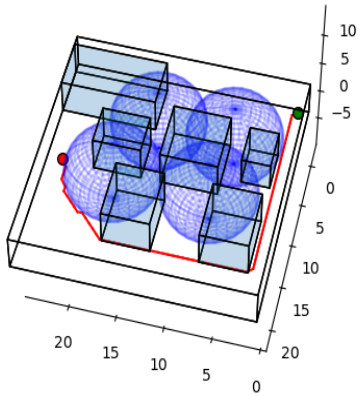
รายละเอียด	รูปร่าง	ขนาด (เมตร)	ตำแหน่ง
สิ่งกีดขวาง 1	สี่เหลี่ยม	กว้าง×ยาว×สูง : 3×4×4	(3.5, 8, 2)
สิ่งกีดขวาง 2	สี่เหลี่ยม	กว้าง×ยาว×สูง : 10×5×5	(20, 3.5, 2.5)
สิ่งกีดขวาง 3	สี่เหลี่ยม	กว้าง×ยาว×สูง : 5×6×5	(4.5, 17, 2.5)
สิ่งกีดขวาง 4	สี่เหลี่ยม	กว้าง×ยาว×สูง : 5×4×5	(17.5, 10, 2.5)
สิ่งกีดขวาง 5	สี่เหลี่ยม	กว้าง×ยาว×สูง : 5×6×5	(14.5, 17, 2.5)
สิ่งกีดขวาง 6	สี่เหลี่ยม	กว้าง×ยาว×สูง : 6×6×5	(10, 9, 2.5)
ภัยคุกคาม 1	ทรงกลม	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง : 10	(6.5, 6.5, 2.5)
ภัยคุกคาม 2	ทรงกลม	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง : 10	(7.5, 13.5, 2.5)
ภัยคุกคาม 3	ทรงกลม	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง : 10	(14.5, 6.5, 2.5)
ภัยคุกคาม 4	ทรงกลม	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง : 10	(17.5, 13.5, 2.5)

3. ผลการทดลอง

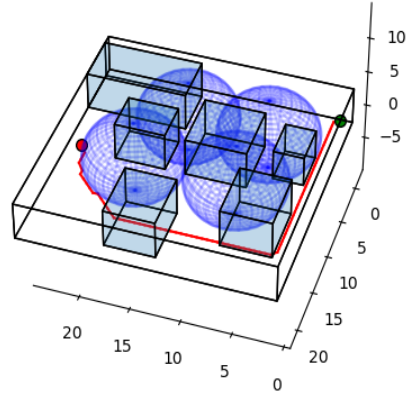
ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ที่จะทำการเปรียบเทียบอัลกอริทึม A* ของ Ren [19] และอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นทั้งที่ใช้พื้นฐานจาก Lifelong Planning A* (LPA*) และ D*lite สามารถแสดงผลการคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่

สำหรับสถานการณ์ที่ 1 ที่กำหนดให้สิ่งกีดขวางและภัยคุกคาม ไม่มีการเคลื่อนที่สำหรับอัลกอริทึม A* ของ Ren [19] และ อัลกอริทึมที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A* และ D*lite ตามแสดงในรูปที่ 8 (ก)-(ค) ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบ 30 ครั้ง พบว่า ค่าภัยคุกคามของอัลกอริทึมทั้งสาม เป็นศูนย์ซึ่งแสดงว่าอัลกอริทึมทั้งสาม สามารถหลบหลีกสิ่ง กีดขวางและภัยคุกคามได้ทั้งหมดตามแสดงในตารางที่ 2 สำหรับระยะทางของเส้นทางการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้และ เวลาที่ใช้ในการคำนวณเส้นทางตามแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ พบว่า อัลกอริทึมที่พัฒนาจาก D*lite จะให้ ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด รองลงมาเป็นอัลกอริทึม A* ของงานวิจัย Ren [19] และ Lifelong Planning A* ตามลำดับ ในส่วนของ สถานการณ์ที่ 2 กำหนดให้สิ่งกีดขวางหมายเลข 5 มีการ เคลื่อนที่ 1 วัตถุได้ผลการคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับ การเคลื่อนที่ของอัลกอริทึม A* ของ Ren [19] และอัลกอริทึม ที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A* และ D*lite ตามแสดง ในรูปที่ 9 (ก)-(ค) ตามลำดับ โดยจากผลการทดสอบ 30 ครั้ง พบว่า ค่าภัยคุกคามของอัลกอริทึมของ A* ของ Ren [19] เป็นอนันต์ คือ ไม่สามารถหลบสิ่งกีดขวางที่มีการเคลื่อนที่ ได้ ในขณะที่อัลกอริทึมที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A* (LPA*) และ D*lite ยังสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่มีการ เคลื่อนที่ได้ทั้งหมดตามแสดงในตารางที่ 2 สำหรับระยะทาง ของเส้นทางการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้ตามแสดงในรูปที่ 12 และเวลาที่ใช้ในการคำนวณเส้นทางตามรูปที่ 13 เมื่อ พิจารณาเฉพาะในส่วนของอัลกอริทึมที่สามารถหาเส้นทาง เคลื่อนที่ที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามได้พบว่า อัลกอริทึมที่พัฒนาจาก D*lite ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าอัลกอริทึม ที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A* ในทั้งสองด้าน ในส่วน สถานการณ์ที่ 3 ที่เป็นการกำหนดให้ภัยคุกคามเลขที่ 4 มี การเคลื่อนที่ 1 วัตถุซึ่งผลการคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่ สำหรับอัลกอริทึม A* ของ Ren [19] และอัลกอริทึมที่พัฒนา จาก Lifelong Planning A* (LPA*) และ D*lite แสดง ตามรูปที่ 10 (ก)-(ค) จากผลการทดสอบ 30 ครั้ง พบว่า ค่าภัยคุกคามของอัลกอริทึมของ A* ของ Ren [19] เป็น 9,730 คือ ไม่สามารถหลบภัยคุกคามที่มีการเคลื่อนที่ได้

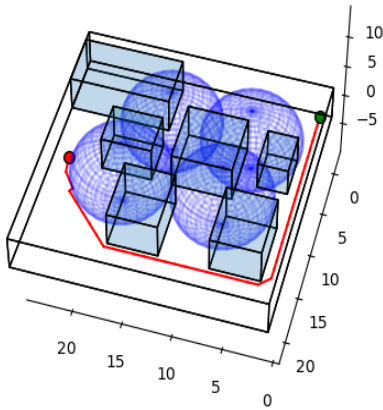
ในขณะที่อัลกอริทึมที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A* (LPA*) และ D*lite ยังสามารถหลบหลีกภัยคุกคามที่มีการ เคลื่อนที่ได้ทั้งหมดตามแสดงในตารางที่ 2 สำหรับระยะทาง ของเส้นทางการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้ตามแสดงในรูปที่ 12 และเวลาที่ใช้ในการคำนวณเส้นทางตามรูปที่ 13 เมื่อ พิจารณาเฉพาะในส่วนของอัลกอริทึมที่สามารถหาเส้นทาง เคลื่อนที่ที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามได้พบว่า อัลกอริทึมที่พัฒนาจาก D*lite ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าอัลกอริทึม ที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A* ในทั้งสองด้าน ใน ส่วนสถานการณ์ที่ 4 ที่เป็นการกำหนดให้สิ่งกีดขวางเลขที่ 5 และภัยคุกคามเลขที่ 3 มีการเคลื่อนที่อย่างละ 1 วัตถุซึ่ง ผลการคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับอัลกอริทึม A* ของ Ren [19] และอัลกอริทึมที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A* และ D*lite แสดงตามรูปที่ 11 (ก)-(ค) ตามลำดับ จากผลการทดสอบทั้ง 30 ครั้ง ค่าภัยคุกคามของ อัลกอริทึมของ A* ของ Ren [19] เป็นอนันต์ คือ ไม่สามารถ หลบทั้งสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามที่มี การเคลื่อนที่ได้ ใน ขณะที่อัลกอริทึมที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A* (LPA*) และ D*lite สามารถหลบหลีกทั้งสิ่งกีดขวางและภัย คุกคามที่มีการเคลื่อนที่ได้ทั้งหมดตามแสดงในตารางที่ 2 สำหรับระยะทางของเส้นทางการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้ตาม แสดงในรูปที่ 12 พบว่า อัลกอริทึมจาก Lifelong Planning A* ได้เส้นทางที่มีระยะทางน้อยกว่าอัลกอริทึมจาก D*lite ซึ่งเกิดจากในการทำงานของอัลกอริทึม D*lite จะเป็นในรูปแบบ เปลี่ยนจุดเริ่มต้นพร้อมคำนวณเส้นทาง แต่อัลกอริทึม Lifelong Planning A* จะไม่มีการเปลี่ยนจุดเริ่มต้นใน ขณะคำนวณเส้นทาง ทำให้ในกรณีที่สิ่งกีดขวางหรือภัยคุกคาม มีการเคลื่อนที่จนทำให้เส้นทางที่คำนวณได้เป็นลักษณะ อ้อมกลับ จะทำให้เส้นทางของอัลกอริทึม Lifelong Planning A* สั้นกว่า D*lite ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการคำนวณเส้นทางตาม รูปที่ 13 พบว่า อัลกอริทึมที่พัฒนาจาก D*lite ให้ผลลัพธ์ที่ ดีกว่าอัลกอริทึมที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A* ซึ่ง แสดงสรุปผลการทดสอบได้ตามตารางที่ 2 เมื่อวิเคราะห์ ผลการทดสอบทั้งหมดพบว่า อัลกอริทึมที่พัฒนาจาก D*lite ให้ผลการทดสอบดีกว่าอัลกอริทึม A* ของ Ren



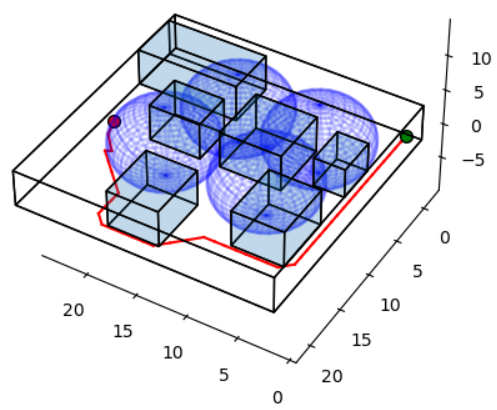
รูปที่ 8 (ก) เส้นทางการเคลื่อนที่จากอัลกอริทึม A* ของ Ren [19] ในสถานการณ์ที่ 1



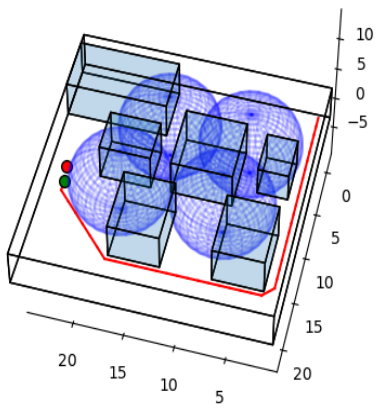
รูปที่ 9 (ก) เส้นทางการเคลื่อนที่จากอัลกอริทึม A* ของ Ren [19] ในสถานการณ์ที่ 2



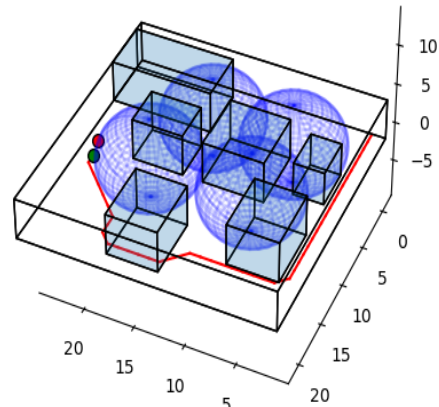
รูปที่ 8 (ข) เส้นทางการเคลื่อนที่จากอัลกอริทึมที่พัฒนาโดย Lifelong Planning A* ในสถานการณ์ที่ 1



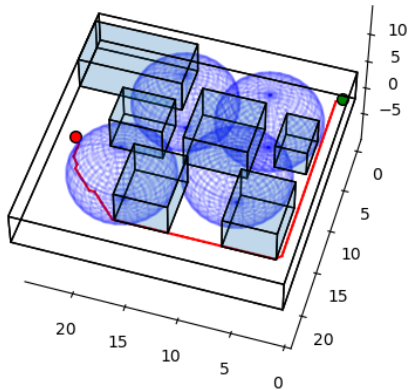
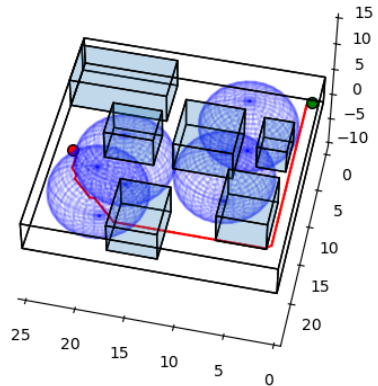
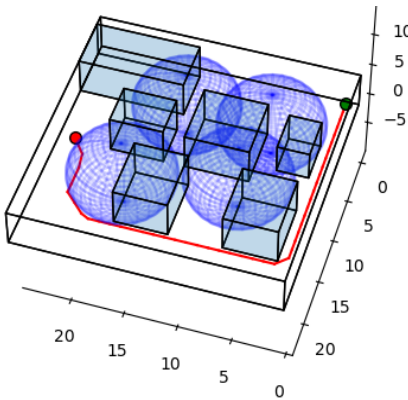
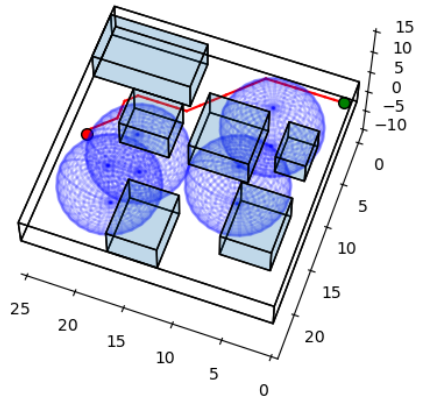
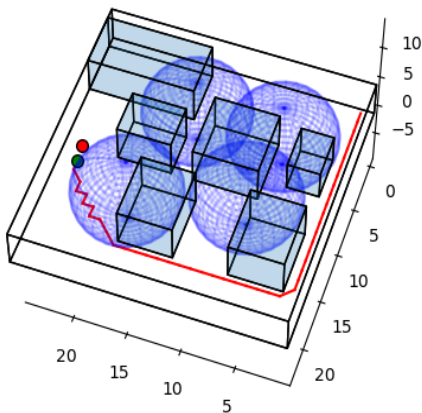
รูปที่ 9 (ข) เส้นทางการเคลื่อนที่จากอัลกอริทึมที่พัฒนาโดย Lifelong Planning A* ในสถานการณ์ที่ 2



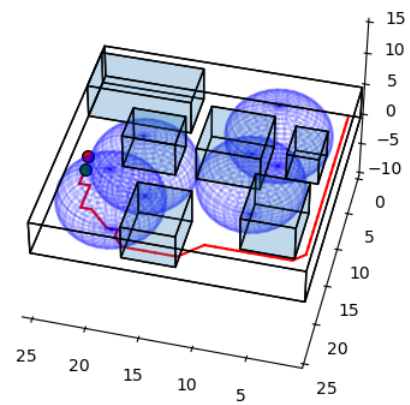
รูปที่ 8 (ค) เส้นทางการเคลื่อนที่จากอัลกอริทึมที่พัฒนาโดย D*lite ในสถานการณ์ที่ 1



รูปที่ 9 (ค) เส้นทางการเคลื่อนที่จากอัลกอริทึมที่พัฒนาโดย D*lite ในสถานการณ์ที่ 2

รูปที่ 10 (ก) เส้นทางการเคลื่อนที่จากอัลกอริทึม A^* ของ Ren [19] ในสถานการณ์ที่ 3รูปที่ 11 (ก) เส้นทางการเคลื่อนที่จากอัลกอริทึม A^* ของ Ren [19] ในสถานการณ์ที่ 4รูปที่ 10 (ข) เส้นทางการเคลื่อนที่จากอัลกอริทึมที่พัฒนาโดย Lifelong Planning A^* ในสถานการณ์ที่ 3รูปที่ 11 (ข) เส้นทางการเคลื่อนที่จากอัลกอริทึมที่พัฒนาโดย Lifelong Planning A^* ในสถานการณ์ที่ 4

รูปที่ 10 (ค) เส้นทางการเคลื่อนที่จากอัลกอริทึมที่พัฒนาโดย D*lite ในสถานการณ์ที่ 3

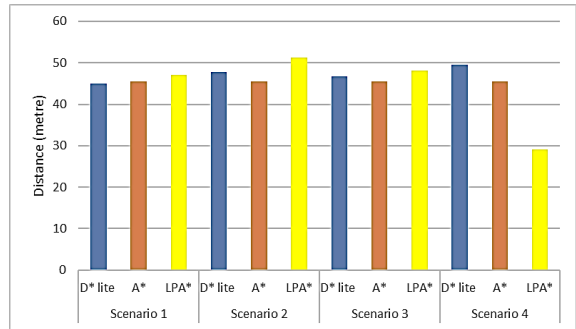


รูปที่ 11 (ค) เส้นทางการเคลื่อนที่จากอัลกอริทึมที่พัฒนาโดย D*lite ในสถานการณ์ที่ 4

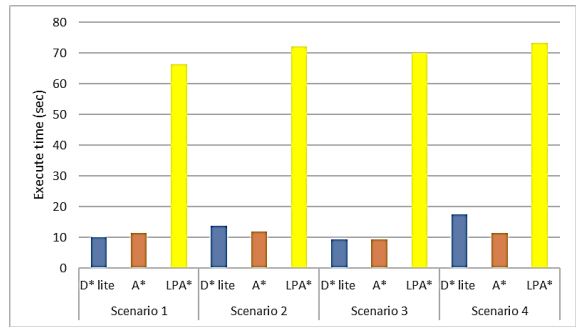
[19] และอัลกอริทึมที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A* ในทุกด้านและในเกือบทุกสถานการณ์ ไม่ว่าจะในกรณีที่สิ่งกีดขวางและภัยคุกคามเป็นแบบหยุดนิ่ง หรือแบบพลวัต ยกเว้นในกรณีที่สิ่งกีดขวางหรือภัยคุกคามมีการเคลื่อนที่จนทำให้เส้นทางที่คำนวณได้เป็นลักษณะอ้อมกลับ ในขณะที่อัลกอริทึมที่พัฒนาจาก Lifelong Planning A* แม้สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามทั้งแบบหยุดนิ่งและแบบพลวัต แต่ยังมีข้อด้อยทั้งในเรื่องเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาเส้นทางที่ยาวนานมากกว่าอัลกอริทึมอื่น 7 เท่า และเรื่องที่อัลกอริทึมไม่มีการเปลี่ยนจุดเริ่มต้นในขณะที่คำนวณเส้นทางหรือไม่สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามที่มีการเปลี่ยนแปลงหลังอากาศยานไร้คนขับมีการขึ้นบิน ซึ่งทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้อัลกอริทึมนี้ในงานแบบทันที (Real-time) ส่วนอัลกอริทึม A* ของ Ren [19] นั้นมีจุดอ่อนสำคัญคือไม่สามารถตอบสนองต่อสถานการณ์พลวัตได้

ตารางที่ 2 สรุปผลการทดสอบของอัลกอริทึมทั้ง 3 แบบโดยเปรียบเทียบในด้านระยะทางของเส้นทาง ค่าภัยคุกคามและเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาเส้นทาง

สถานการณ์	อัลกอริทึม	ระยะทาง (เมตร)	ค่าภัยคุกคาม	เวลาประมวลผล (วินาที)
สถานการณ์ 1	D* lite [21]	44.8995	0	10.1481
	A* [12]	45.5102	0	11.4422
	LPA* [22]	47.0458	0	66.4264
สถานการณ์ 2	D* lite [21]	47.7279	0	13.8439
	A* [12]	45.5102	Infinity	11.89
	LPA* [22]	51.2884	0	72.2494
สถานการณ์ 3	D* lite [21]	46.6569	0	9.4348
	A* [12]	45.5102	9730	9.2573
	LPA* [22]	48.121	0	70.1072
สถานการณ์ 4	D* lite [21]	49.4853	0	17.4589
	A* [12]	45.5102	Infinity	11.5082
	LPA* [22]	29.1421	0	73.2285



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบระยะเส้นทางเคลื่อนที่ที่คำนวณได้ของอัลกอริทึมทั้งสามแบบในแต่ละสถานการณ์



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบเวลาในการหาเส้นทางเคลื่อนที่ของอัลกอริทึมทั้งสามแบบในแต่ละสถานการณ์

4. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการพัฒนาอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางเคลื่อนที่สำหรับอากาศยานไร้คนขับโดยอาศัยพื้นฐานจากอัลกอริทึม A* ของ Ren [19] เพื่อใช้ในการหาเส้นทางเคลื่อนที่ที่สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคของอัลกอริทึม Lifelong Planning A* [21] และ D*lite [22] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการหาเส้นทางเคลื่อนที่ ทั้งในด้านความสามารถในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามในรูปแบบพลวัต การหาเส้นทางเคลื่อนที่ที่สั้นลงและการใช้เวลาในการหาเส้นทางเคลื่อนที่ที่น้อยลง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 3 แบบ โดยอัลกอริทึม A* ของ Ren [19] แม้ผลลัพธ์ทั้งระยะทางเคลื่อนที่ที่สั้นสุดและเวลาในการประมวลผลน้อยสุด แต่ไม่สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นจากเทคนิค อัลกอริทึม Lifelong Planning A* และ D*lite สามารถกำจัดจุดอ่อนที่อัลกอริทึม A* ของ Ren [19] ไม่สามารถทำได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบพบว่าอัลกอริทึม D*lite ให้ผลลัพธ์ที่เหนือกว่าอัลกอริทึม Lifelong Planning A* ทั้งในด้านความสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หาเส้นทางเคลื่อนที่ที่สั้นสุดและใช้เวลาในการหาเส้นทางเคลื่อนที่น้อยสุด ดังนั้นอัลกอริทึม D*lite ที่พัฒนานี้เหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับอากาศยานไร้คนขับในภารกิจทางทหารที่สามารถในการปฏิบัติงานโดยอัตโนมัติ สามารถตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ทันเวลา โดยต้องมีการทดสอบกับอากาศยานไร้คนขับจริงเพื่อปรับข้อบกพร่องแล้วจึงนำไปใช้งาน

ในอนาคตผู้วิจัยนำเสนอที่จะปรับปรุงรูปร่างของสิ่งกีดขวางและภัยคุกคามให้มีความใกล้เคียงกับรูปร่างจริงเพื่อเพิ่มความแม่นยำของอัลกอริทึมการวางแผนเส้นทางเคลื่อนที่

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) ในการสนับสนุนทุนในการวิจัยและบุคลากรในการให้คำปรึกษาสำหรับการทำงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] I. Oz, H. R. Topcuoglu, and M. Ermis, "A meta-heuristic based three-dimensional path planning environment for unmanned aerial vehicles," *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, vol. 89, no. 8, pp. 903–920, 2012.
- [2] B. Alsadik and F. Nex. (2021, Jun. 24). *The rise in UAV inspections for civil infrastructure*. [Online]. Available: <https://www.gim-international.com/content/article/the-rise-in-uav-inspections-for-civil-infrastructure>
- [3] S. B. Amarat and P. Zong, "3D path planning, routing algorithms and routing protocols for unmanned air vehicles: A review," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 91, no. 9, pp. 1245–1255, 2019.
- [4] A. K. Guruji, H. Agarwal, and D. K. Parsediya, "Time-efficient A* algorithm for robot path planning," *Procedia Technology*, vol. 23, pp. 144–149, 2016.
- [5] K. Karur, N. Sharma, C. Dharmatti, and J. E. Siegel, "A survey of path planning algorithms for mobile robots," *Vehicles*, vol. 3, no. 3, pp. 448–468, 2021.
- [6] J. Chen, C. Du, Y. Zhang, P. Han, and W. Wei, "A clustering-based coverage path planning method for autonomous heterogeneous UAVs," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, vol. 23, no.12, pp. 25546–25556, 2022.
- [7] J. N. Yasin, S. A. S. Mohamed, M. H. Haghbayan, J. Heikkonen, H. Tenhunen, and J. Plosila, "Unmanned aerial vehicles (UAVs): Collision avoidance systems and approaches," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 105139–105155, 2020.
- [8] G. F. Caballero, A. R. Molina, M. A. Perez, and M. G. V. Cervantes, "Optimized path-planning in continuous spaces for unmanned aerial vehicles using meta-heuristics" *IEEE Access*, vol. 8, pp. 176774–176788, 2020.
- [9] X. Zhou, F. Gao, X. Fang, and Z. Lan, "Improved



- bat algorithm for UAV path planning in three-dimensional space,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 20100–20116, 2021.
- [10] N. Ozalp and O. K. Sahingoz, “Optimal UAV path planning in a 3D threat environment by using parallel evolutionary algorithms,” in *Proceedings of 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, GA, USA, 2013, pp. 308–317.
- [11] F. Duchon, A. Babinec, M. Kajan, P. Beno, M. Florek, T. Fico, and L. Jurisica, “Path planning with modified A star algorithm for a mobile robot,” *Procedia Engineering*, vol. 96, pp. 59–69, 2014.
- [12] L. D. Filippis, G. Guglieri, and F. Quagliotti, “Path planning strategies for UAVS in 3D environments,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 65, no. 1–4, pp. 247–264, 2012.
- [13] Z. Zhang, J. Wu, J. Dai, and C. He, “A novel real-time penetration path planning algorithm for stealth UAV in 3D complex dynamic environment,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 122757–122771, 2020.
- [14] H. Wang, X. Qi, S. Lou, J. Jing, H. He, and W. Liu, “An efficient and robust improved A* algorithm for path planning,” *Symmetry*, vol. 13, no. 11, Article ID 2213, 2021.
- [15] S. Karaman, M. R. Walter, A. Perez, E. Frazzoli, and S. Teller, “Anytime motion planning using the RRT*,” in *Proceedings of 2011 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, 2011, pp. 1478–1483.
- [16] K. Danancier, D. Ruvio, I. Sung, and P. Nielsen, “Comparison of path planning algorithms for an unmanned aerial vehicle,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 1978–1983, 2019.
- [17] Y. Guo, X. Liu, X. Liu, Y. Yang, and W. Zhang, “FC-RRT*: An improved path planning algorithm for UAV in 3D complex environment,” *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 11, no. 2, Article ID 112, 2022.
- [18] Z. Zhang, J. Wu, J. Dai, and C. He, “Rapid penetration path planning method for stealth UAV in complex environment with BB treats,” *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2020, pp. 15, Article ID 8896357, 2020.
- [19] R. Tianzhu, Z. Rui, X. Jie, and D. Zhuoning, “Three-dimensional path planning of UAV based on an improved A* algorithm*,” in *Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*, Nanjing, China, 2016, pp. 140–145.
- [20] Md. A. K. Niloy, A. Shama, R. K. Chakraborty, M. J. Ryan, F. R. Badal, Z. Tasneem, Md. H. Ahamed, S. I. Moyeen, S. K. Das, Md. F. Ali, Md. R. Islam, and D. K. Saha, “Critical design and control issues of indoor autonomous mobile robots: A review,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 35338–35370, 2021.
- [21] S. Koenig, M. Likhachev, and D. Furcy, “Lifelong Planning A*,” *Artificial Intelligence*, vol. 155, no. 1–2, pp. 93–146, 2004.
- [22] S. Koenig and M. Likhachev, “D*lite,” *AAAI/IAAI*, pp. 476–483, 2002.