مروری بر الگوریتم‌ها و تکنیک‌های برنامه‌ریزی مسیر درفضای سه‌بعدی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

حکیمه مظاهری[۱]، سلمان گلی[۲] ، علی نوراله[۳]
۱- دانشجوی دکتری دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه کاشان
۲- استادیار دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه کاشان، Salmangoli@grad.kashanu.ac.ir
۳- استادیار دانشکده کامپیوتر دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

چکیده

برنامه‌ریزی مسیر پوششی در این شبکه ها شامل یافتن مسیری است که بتواند کلیه نقاط مشخص از یک منطقه را پوشش دهد. مسئله برنامه‌ریزی مسیر پوششی یکی از زیرمجموعه-های کاربردی برنامه‌ریزی حرکتی ربات‌ها است که ضمن جلوگیری از تصادم، پوشش کامل یک منطقه را نیز تضمین می‌کند. این پژوهش، مروری ساختاریافته از الگوریتم‌های کاربردی و راه‌حل‌های برنامه‌ریزی مسیر پوششی در فضای سه‌بعدی است و آخرین وضعیت پژوهش‌ها را در رابطه با رویکردهای تجزیه غیردقیق پهپاد و چالش‌های پیش‌رو ارائه می‌دهد. هم‌چنین دو طبقه‌بندی جامع و جدید از رویکردهای عملی و روش‌های نمایش برنامه‌ریزی مسیر مبتنی بر ساختار داده الگوریتم‌ها، خصوصیات محیط و پارامترهای بهینه در دنیای واقعی معرفی می‌کند. این مقاله یک تحلیل انتقادی از مهم‌ترین رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر موجود برای پهپادها ارائه کرده و با ذکر چالش‌ها و شکاف‌های تحقیقاتی محیط سه‌بعدی، به ارائه راه‌حل‌های کارامد و بهینه جهت پیاده‌سازی الگوریتم‌های مذکور در فضای سه‌بعدی می-پردازد. برهمین اساس پیشنهاداتی از جمله تاثیر طراحی ساختار داده مناسب و مدلسازی محیط در راستای برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی و رفع چالش‌ها بیان شده است که چشم اندازی از ایده‌های بعدی نویسندگان ارائه می‌دهد. در عین‌حال مهم‌ترین پیشنهادات آینده را برای محققین فراهم آورده است.

واژه‌های کلیدی: *:برنامه‌ریزی مسیر پوششی، جلوگیری از تصادم، فضای سه‌بعدی*

A review of 3D space path planning methods and algorithms

Hakimeh Mazaheri [1], Salman Goli-Bidgoli [*], Ali Nourallah [2]

1,2-Computer Department, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
3- Department of Computer Engineering Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

Abstract

Planning a coverage path in UAV networks entails identifying a path that encompasses all specified points within an area. This guarantees complete area coverage while avoiding collisions. This study provides a structured review of applicable algorithms and coverage path planning solutions in three-dimensional space, presenting state-of-the-art technologies related to heuristic decomposition approaches for UAVs and the forefront challenges. Additionally, it introduces a comprehensive and novel classification of practical methods and representational techniques for path-planning algorithms. This depends on environmental characteristics and optimal parameters in the real world. To conduct a comprehensive review of three-dimensional UAV path planning, this article critically analyzes the essential existing path planning approaches for UAVs and offers efficient and optimal solutions for implementing these algorithms in three-dimensional space by addressing the challenges and research gaps in the 3D area. Based on these foundations, suggestions such as the impact of appropriate data structure design and environment modeling on three-dimensional representation have been proposed.

Keywords: *Path-Planning, Collision Avoidance, Three-Dimension Space*

۱- مقدمه

مفهوم وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین نخستین بار توسط دانیل و ویتفلد معرفی شد [۱] و به دلیل ویژگی‌هایی مانند استقرار سریع، هزینه پایین، و قابلیت مانور بالا، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های صنعتی، امنیتی، تجاری، آموزشی و خدماتی پیدا کرده است[۲] [۳]. پهپادها در سال‌های اخیر نقش مهمی در عملیات‌هایی مانند نظارت بلادرنگ، بازرسی از زیرساخت‌ها، کشاورزی دقیق، جستجو و نجات، و حمل بار ایفا کرده‌اند[۴]. بنا به گزارش‌ها، ارزش بازار پهپادها در جهان بیش از ۱۲۷ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود و تنها در بخش زیرساخت‌ها سهمی نزدیک به ۴۵ میلیارد دلار دارد[۵].

یکی از کاربردهای حیاتی پهپادها، اجرای ماموریت‌های نظارتی در پروژه‌های ساختمانی، خطوط انتقال انرژی و ارتباطات است[۶] [۷]. در این ماموریت‌ها، برنامه‌ریزی دقیق مسیر برای تضمین پوشش کامل و جلوگیری از برخورد با موانع و سایر پهپادها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بسته به نوع ماموریت، تحرک پهپادها می‌تواند از حالت‌های سریع و پراکنده در عملیات نظامی تا حالت‌های آرام و متمرکز در نظارت پیوسته تغییر کند.

در این پژوهش، با تمرکز بر برنامه‌ریزی مسیر پوششی در شبکه‌های پهپادی، چالش‌های موجود شامل توپولوژی پویا، مصرف انرژی، اجتناب از برخورد، و محدودیت‌های محیطی بررسی می‌شوند. همچنین راهکارهایی برای بهبود عملکرد این سیستم‌ها در شرایط واقعی ارائه خواهد شد.

۱-۱- چالش‌های برنامه‌ریزی مسیر پوششی

استفاده از پهپادها علی‌رغم مزایای بسیار، با چالش‌هایی نیز همراه است. در این بخش، مهم‌ترین چالش‌ها که مستقیماً بر کیفیت، ایمنی، و اثربخشی برنامه‌ریزی مسیر تأثیر دارند، معرفی می‌شوند. در بخش‌های بعد، راه‌حل‌های پیشنهادی برای مقابله با این چالش‌ها در قالب رویکردهای طبقه‌بندی‌شده (شکل ۲) بررسی خواهند شد.

جدول ۱. دسته‌بندی شبکه های پهپادی براساس ویژگی‌ها و نوع کاربرد

ویژگی‌ها	کاربردهای حسی	تحویل از راه‌دور	کاربردهای نظامی
نمونه کاربردها	جستجو ، شناسایی آتش سوزی جنگل ها ، ردیابی حیوانات وحشی	ارتباطات پرخطر، استخراج نفت، سلامت از راه دور	رزمایش: همکاری چند پهپاد
میزان تحرک	تغییر آهسته ، حرکت هماهنگ	موقعیت ثابت	تغییرات مکرر
سرعت تحرک	<10 miles/hour	~0 miles/hour	>10 miles/hour
زیر ساخت شبکه	مبتنی بر زیرساخت	زیرساخت، ایستگاه مرکزی	مبتنی بر زیرساخت/ adhoc
توپولوژی	مش	ستاره‌ای / مش	مش
کنترل (ارتباطات)	متمرکز (مبتنی بر کنترل وظیفه)	متمرکز (مبتنی بر کنترل موقعیت)	توزیع شده (مبتنی بر کنترل وظیفه)

معماری	سرور / سرویس گیرنده	سرور (ارتباط و کنترل مسیرها)	سرور / سرویس گیرنده
مسیریابی	مرکزی یا مش	از طریق سرور	شبکه مش
تأخیر / اختلال (به دلیل خرابی گره و پیوند)	احتمال متوسط	احتمال کم	احتمال زیاد
نوع ارتباطات C=Client I=Infrastructur	U2U (if buffer node), U2I, U2C	U2U, U2I, C2U	U2I (commands), U2U
کنترل مسیر و موقعیت	کنترل از راه دور - کنترل موقعیت ، کنترل مسیر	کنترل موقعیت از راه دور	از راه دور (احتمال کمتر) اقدام خودکار (مشاهده ، تصمیم‌گیری کنترل مسیر - هماهنگی بلادرنگ چند پهپاد ، عدم تصادم

از نماد c_i برای نمایش چالش‌ها و از نماد s_i برای نمایش راه‌حل‌ها استفاده می‌شود. جدول ۲ ویژگی‌های شبکه‌های پهپادی را به تفکیک تعداد پهپاد و توپولوژی شبکه نشان می‌دهد.

c_1. توپولوژی: در شبکه‌های پهپادی، گره‌ها یعنی پهپادها موقعیت و سرعت ثابتی ندارند و دائما در حال حرکت، جدا شدن از شبکه یا اتصال به آن هستند. این رفتار منجر به تغییرات پیوسته در ساختار شبکه می‌شود و ارتباطات بین گره‌ها به‌طور متناوب قطع و وصل می‌گردد. چنین شرایطی، ایجاد یک ساختار ارتباطی پایدار را دشوار می‌سازد و برنامه‌ریزی مسیر را با پیچیدگی مضاعف مواجه می‌کند. این مشکل در مأموریت‌های چندپهپاده با نیاز به هماهنگی مستمر میان پهپادها پررنگ‌تر است.

c_2. مسأله اصلی در برنامه‌ریزی مسیر پهپاد، عبور از مناطق شلوغ و محیط‌های پیچیده، بدون برخورد با موانع یا دیگر پهپادهاست. تحرک بالا، توپولوژی پویا و توزیع نامنظم پهپادها، مسیریابی را به یک مسئله چالش‌برانگیز تبدیل می‌کند. فناوری‌های متداول مانند بیگ‌دیتا یا محاسبات ابری در این حوزه ناکارآمد هستند چرا که پهپادها باید به صورت خودمختار مسیر بهینه را پیدا کنند [۸]. معیارهای بهینه‌سازی شامل هزینه، زمان، و طول مسیر در هر کاربرد متفاوت است.

c_3. خودمختاری: خودمختاری به معنای تصمیم‌گیری مستقل پهپادها بر اساس اطلاعاتی است که از طریق حسگرها، دوربین‌ها یا سیستم‌های موقعیت‌یابی جمع‌آوری می‌شود. این ویژگی موجب افزایش کارآیی، کاهش وابستگی به کنترل مرکزی و افزایش انعطاف‌پذیری در شرایط مأموریتی می‌شود[۹]. خودمختاری در زمینه‌های مختلفی نظیر برنامه‌ریزی مسیر، تخصیص وظایف و ارتباطات کاربرد دارد.

c_4. مصرف انرژی: محدودیت ذخیره انرژی یکی از معضلات اساسی پهپادهاست. برخلاف شبکه‌های زمینی که منابع تغذیه پایداری دارند، پهپادها معمولاً فقط توان پرواز سی دقیقه‌ای دارند. علاوه بر این، توپولوژی پویا و نیاز به الگوریتم‌های مسیریابی منحصر به فرد، مصرف

انرژی را افزایش می‌دهد. در شبکه‌های مستقر به صورت تصادفی، راه‌حل‌های سنتی برای حفظ اتصال، ناکارآمد هستند. این امر نیازمند طراحی الگوریتم‌هایی است که با مصرف بهینه انرژی، پایداری شبکه را حفظ کنند.

. c_5 تحرک. پهپادها برخلاف ربات‌های زمینی، در سه بعد حرکت می‌کنند. بسته به نوع کاربرد، ممکن است تحرک آهسته و هماهنگ باشد (مثل کاربردهای نظارتی)، یا سریع و پراکنده (مانند کاربردهای نظامی). این تحرک پیچیده، پیوند بین گره‌ها را دائماً تحت تأثیر قرار داده و برنامه‌ریزی مسیر را دشوار می‌سازد.

. c_6 پوشش قطعی: در برخی کاربردها، شکل شبکه و مکان گره‌های حسگر از پیش تعیین شده است. در این موارد، الگوریتم‌ها باید تضمین کنند که تمام سلول‌ها فقط یک‌بار پوشش داده شوند و از بازدیدهای تکراری جلوگیری گردد. این موضوع برای افزایش دقت، کاهش انرژی مصرفی و بهینه‌سازی عملیات حیاتی است.

. c_7 نیاز به برنامه‌ریزی آنلاین: در این پژوهش، برنامه‌ریزی آنلاین به معنای دریافت داده‌های محیطی در زمان پرواز و به‌روزرسانی مسیر بر اساس آن‌هاست. پهپاد نباید از مناطق ممنوعه عبور کند و اطلاعات دریافتی باید در همان لحظه پردازش و ذخیره شوند. اهمیت داده‌ها با گذشت زمان کاهش می‌یابد و نیاز به تصمیم‌گیری سریع و تطبیق مسیر پرواز با شرایط محیطی وجود دارد.

. c_8 نوع معماری راه‌حل (متمرکز، توزیع‌شده یا غیرمتمرکز) : راه‌حل‌های مسیریابی می‌توانند متمرکز باشند (با یک گره کنترل مرکزی)، یا به‌صورت توزیع‌شده (هر گره مستقلاً عملیات را انجام می‌دهد). در حالت غیرمتمرکز، وظایف بین دو نوع قبل تقسیم می‌شود. انتخاب نوع معماری تأثیر مستقیم بر کارایی، پیچیدگی پردازش و پایداری شبکه دارد. در این مقاله این سه نوع معماری از منظر کارایی در پوشش مسیر بررسی خواهند شد.

جدول ۲. ویژگی‌های شبکه‌های پهپادی به تفکیک تعداد پهپاد و توپولوژی شبکه

کاربردها	ویژگی ها	چند پهپاد	تک پهپاد	ویژگی‌های توپولوژی شبکه‌های پهپادی
High-risk communications [۱۰]	تاثیر خرابی	پایین، پیکربندی مجدد	بالا، شکست ماموریت	مش: چند نقطه‌ای به چند نقطه‌ای ستاره‌ای: نقطه به نقطه
Remote healthcare, Remote sensing [۱۱]	مقیاس پذیری	بالا	محدود شده	مش: زیرساخت‌ها ممکن است دارای یک مرکز کنترل باشند ، Ad hoc هیچ کنترل مرکزی ندارد ستاره ای: نقطه کنترل مرکزی موجود است
Surveillance [۱۲]	زنده ماندن	قوی	ضعیف	مش: مبتنی بر زیرساخت یا Ad hoc ستاره‌ای : مبتنی بر زیرساخت
Forest fire detection, Precision agriculture[۳]	سرعت	سریع	آهسته	مش: خود پیکره‌بندی شده ستاره‌ای : خود پیکربندی نشده است
Oil extraction, wildlife tracking , mining [۱۳]	پهنای باند	متوسط	بالا	مش: ارتباطات چند هاپی ستاره‌ای : تک هاپ از گره به نقطه مرکزی
Multi-Drone Collaboration, Providing wireless coverage[۱۴]	آنتن-دهی	مستقیم	همه جانبه	مش: در شبکه Ad hoc، دستگاه‌ها خود مختار و آزاد هستند. ستاره‌ای: دستگاه‌ها نمی توانند آزادانه حرکت کنند
Search and rescue, Real-Time monitoring[۱۵]	پیچیدگی کنترل	بالا	پایین	مش: پیوندهای گره بینابینی متناوب است ستاره‌ای: ارتباط از راه کنترل کننده مرکزی
Infrastructure inspection [۴]	عدم هماهنگی	آماده	پایین	مش: گره‌ها ترافیک را برای گره های دیگر رله می‌کنند ستاره‌ای: ارتباط از راه کنترل کننده مرکزی

۱-۲- پارامترهای برنامه‌ریزی مسیر پوششی

در طراحی مسیر پوششی برای پهپادها، انتخاب مسیر بهینه نیازمند در نظر گرفتن مجموعه‌ای از پارامترهای عملکردی است که از شرایط محیط، ویژگی‌های فنی پهپاد و اهداف مأموریت ناشی می‌شوند. الگوریتم‌های کارآمد در این حوزه باید عواملی چون پیچیدگی محیط، وجود مناطق پرواز ممنوع و امکان تجزیه سلولی محیط را در تحلیل خود لحاظ کنند. به‌عنوان مثال، در کاربردهایی مانند سنجش فتوگرامتری، کیفیت تصاویر به فاصله نمونه‌برداری زمینی (GSD) وابسته است[۱۱]. هر چه ارتفاع پرواز کاهش یابد، مقدار GSD کمتر و در نتیجه، وضوح تصویر بالاتر خواهد بود. بنابراین الگوریتم‌های مسیریابی باید مسیرهایی ارائه دهند که ضمن برآورده ساختن الزامات مأموریت، بهینه نیز باشند.

یکی دیگر از عوامل مهم، نوع پوشش مورد نیاز در مأموریت است. در پوشش ساده، منطقه تنها یک‌بار بازدید می‌شود، در حالی که در پوشش مداوم، منطقه چندین نوبت جارو می‌شود. در هر دو حالت، مأموریت می‌تواند توسط یک یا چند پهپاد انجام گیرد. در پوشش مداوم، شاخص‌هایی نظیر تعداد اشیای شناسایی‌شده، رخدادهای ثبت‌شده، تعداد دفعات بازدید از هر سلول، میانگین مربعات فاصله‌ها و انحراف معیار فراوانی پوشش‌ها از معیارهای ارزیابی مهم هستند[۱۲].

استفاده از چند پهپاد، مدت زمان اجرای مأموریت را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. با این حال، در ارزیابی عملکرد، مساحت پوشش داده‌شده به ازای هر واحد طول مسیر طی‌شده توسط هر پهپاد نیز حائز اهمیت است. به حداقل رساندن این نسبت، منجر به بهینه‌سازی مأموریت از نظر زمان و انرژی می‌شود[۱۳]. در مأموریت‌های چندپهپاده، تقسیم و تخصیص منطقه‌ی هدف میان پهپادها، نیازمند هماهنگی دقیق است. این تقسیم می‌تواند به روش‌های توزیع‌شده، از طریق پروتکل‌های مذاکره‌ای یا مبتنی بر قابلیت‌های نسبی پهپادها انجام گیرد[۱۴]. لازم به ذکر است که این مسئله، ماهیتی NP-Hard دارد و با تغییر وضعیت مأموریت یا خروج یکی از پهپادها از عملیات، نیاز به تنظیم مجدد تقسیم‌بندی و تخصیص منطقه وجود دارد.

از دیگر پارامترهای تأثیرگذار در پوشش، تعداد مانورهای چرخشی است. هربار که پهپاد مجبور به چرخش می‌شود، نیاز دارد تا سرعت خود را کاهش داده، جهت پرواز را تغییر دهد و مجدداً شتاب بگیرد. این فرآیند منجر به افزایش مصرف انرژی و زمان می‌شود. بنابراین کاهش تعداد چرخش‌ها یکی از اهداف کلیدی در بهینه‌سازی مسیرهای پوششی است. افزون بر آن، عوامل دیگری چون طول مسیر، مدت زمان مأموریت، محدودیت‌های حرکتی پهپاد، تعداد تغییر مسیرها، زوایای چرخش و سرعت بهینه نیز بر میزان مصرف انرژی تأثیرگذارند[۱۵].

مصرف انرژی، به عنوان یکی از محدودیت‌های اصلی فناوری پهپاد، نقش محوری در طراحی مسیر دارد. پهپادها به دلیل محدودیت در ظرفیت باتری، استقامت محدودی دارند و بهینه‌سازی مصرف انرژی برای افزایش ماندگاری در مأموریت ضروری است[۱۶]. سایر پارامترهای کلیدی در برنامه‌ریزی مسیر پوششی عبارت‌اند از:

طول مسیر: مسافت کل طی‌شده توسط هر پهپاد از نقطه شروع تا انتهای مأموریت، معمولاً بر حسب متر بیان می‌شود.

بهینگی: مسیرهای بهینه از نظر مصرف انرژی و زمان، به سه دسته بهینه، زیر بهینه و غیربهینه تقسیم می‌شوند.

کامل بودن[1] : تضمین می‌کند که در صورت وجود مسیر قابل پیمایش، الگوریتم بتواند آن را بیابد.

هزینه کارآمد[2]: شامل هزینه‌های عملیاتی نظیر مصرف سوخت، شارژ باتری، ارتباطات، فضای ذخیره‌سازی، سخت‌افزار و نرم‌افزار پهپاد است. الگوریتم‌های مناسب باید تعادل میان عملکرد و هزینه را حفظ کنند.

کارایی زمانی[3] : توانایی الگوریتم در ارائه مسیر در کوتاه‌ترین زمان ممکن، بدون نقض محدودیت‌ها یا ایجاد برخورد.

نیرومندی[4]: توان سیستم در تحمل خطا به معنی ادامه‌ی عملکرد در شرایط بحرانی است؛ مانند جایگزینی وظایف پهپاد خراب توسط پهپادهای مجاور با تنظیم مسیر یا ارتفاع، و کنترل افزایش زمان مأموریت از طریق تعیین آستانه‌های عملکردی مناسب.

اجتناب از برخورد[5]: طراحی مسیر به‌گونه‌ای که از برخورد با موانع ثابت و متحرک و سایر پهپادها جلوگیری شود و ایمنی عملیات تضمین گردد.

در مرور پژوهش‌های پیشین، مشخص می‌شود که بسیاری از الگوریتم‌های موجود صرفاً برای محیط‌های ایستا و از پیش شناخته‌شده طراحی شده‌اند و در محیط‌های عملیاتی واقعی، یا کاربرد ندارند یا نیازمند تغییرات عمده در ساختار هستند. همچنین در بسیاری از مطالعات، به جنبه‌های اجرایی الگوریتم‌ها، نظیر برنامه‌ریزی آنلاین در فضای سه‌بعدی، توجه اندکی شده است.

این پژوهش با هدف ارائه مروری ساختاریافته، به تحلیل الگوریتم‌های سه‌بعدی برنامه‌ریزی مسیر می‌پردازد. تمرکز اصلی بر پارامترهای بهینه، ساختار داده‌ها و قابلیت اجرای عملی الگوریتم‌ها است. مطالعه شامل طبقه‌بندی جامع رویکردها در دو فاز مدل‌سازی و جستجو، تحلیل بر اساس سناریوهای واقعی، و شناسایی شکاف‌های پژوهشی و مسیرهای آینده است. در ادامه، الگوریتم‌های منتخب از نظر ساختار داده، فاز اجرایی و کاربرد عملی بررسی می‌شوند. بخش دوم به بررسی استراتژی‌های مدل‌سازی و الگوریتم‌های مسیریابی در محیط‌های عملیاتی می‌پردازد. بخش سوم طبقه‌بندی جدیدی از رویکردها را ارائه می‌کند و بخش چهارم ساختار داده‌های مورد استفاده در این حوزه را بررسی می‌کند. نهایتاً، در بخش پنجم، شکاف‌های تحقیقاتی و جمع‌بندی نهایی ارائه شده است.

۲- رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر

رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر به‌طور کلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: رویکردهای غیرپوششی و رویکردهای پوششی .در رویکردهای غیرپوششی، تنها بخشی از محیط مورد هدف قرار می‌گیرد و مسیر برای رسیدن به نقاط خاص یا اجرای وظایف محدود طراحی می‌شود. در مقابل، رویکردهای پوششی با هدف کاوش کامل یا گسترده‌ی محیط، مسیرهایی طراحی می‌کنند که به‌طور جامع تمام یا بخش عمده‌ای از ناحیه مورد

[1] Completeness
[2] Cost Efficiency
[3] Time Efficiency
[4] Robustness
[5] Collision Avoidance

نظر را پوشش دهند.مسئله‌ی برنامه‌ریزی مسیر پوششی را می‌توان یکی از زیرشاخه‌های حرکت ربات‌ها دانست که نه‌تنها باید از برخورد با موانع جلوگیری کند، بلکه پوشش کامل و کارآمد محیط را نیز تضمین نماید. این مسئله در حوزه‌های گوناگون رباتیک از جمله ربات‌های نظافت کف، نقاش، مین‌روب، چمن‌زن، شیشه‌پاک‌کن و سیستم‌های بازرسی سازه‌های پیچیده مورد استفاده قرار گرفته است [۹].

در فضای شبکه‌های بین‌پهپادی، برنامه‌ریزی مسیر پوششی شباهت زیادی با مسئله پوشش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم دارد و همانند آن‌ها می‌تواند به دو رویکرد ایستا و پویا تقسیم شود [۱۰]. در رویکرد ایستا، اگر پهپادها در طول مأموریت در موقعیت ثابتی باقی بمانند، می‌توان آن‌ها را همانند گره‌های ثابت در شبکه‌های حسگر در نظر گرفت[۱۷]. در چنین شرایطی، الگوریتم‌های پوشش موجود در شبکه‌های حسگر بی‌سیم می‌توانند با اندکی تغییر برای این نوع مسئله به‌کار گرفته شوند [۱۸].

در مقابل، در رویکرد پویا، پهپادها به‌طور مستمر در حال پرواز و حرکت هستند [۱۹]. در یک محیط مشخص، روش‌های پوشش پویا به پهپادهای کمتری نیاز دارند، اما دقت پوشش و وضوح تصاویر در روش ایستا معمولاً بالاتر است.

فرآیند برنامه‌ریزی مسیر پوششی پویا معمولاً شامل دو فاز اصلی است: در فاز نخست، محیط عملیاتی و موانع آن به‌صورت هندسی مدل‌سازی شده و در قالب یک ساختار داده‌ای مانند گراف ذخیره می‌شوند؛ به‌طوری‌که گره‌ها نمایانگر نقاط و یال‌ها نمایانگر ارتباط میان آن‌ها باشند [۲۰]. در فاز دوم، عملیات جستجوی مسیر از مبدأ تا مقصد آغاز شده و با استفاده از الگوریتم‌هایی همچون الگوریتم‌های دوگان گراف، جستجوی گراف و تکنیک‌های تکاملی، مسیر بهینه‌ای متناسب با وجود موانع و شرایط محیطی استخراج می‌شود [۲۱]. در کنار این فازها، مفاهیم کلیدی زیر در طراحی و تحلیل رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر نقش مهمی دارند:

چند نقطه‌ای بودن مسیر، رویکردی برای کاهش چرخش‌های ناگهانی است؛ مسیرهایی که از چند نقطه میانی عبور می‌کنند نرم‌تر و انرژی‌کارآمدتر هستند.

عدم برخورد با موانع، معیاری کلیدی در ارزیابی کیفیت مسیرها است و به عواملی مانند نوع و تعداد موانع، پیچیدگی منطقه هدف و پویایی محیط بستگی دارد.

هزینه برنامه‌ریزی مسیر، ترکیبی از میزان حافظه مورد نیاز، زمان اجرای مأموریت و شدت برخوردهای احتمالی با موانع است. مسیرها معمولاً بر اساس تعداد و شدت این برخوردها جریمه می‌شوند.

طول مسیر تابعی از مسافت طی‌شده است که عواملی چون اجتناب از مناطق ممنوعه یا موقعیت‌های نظامی می‌توانند آن را افزایش دهند.

مصرف انرژی، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های عملیاتی است که با ویژگی‌هایی چون ظرفیت باتری، محدودیت‌های مانوری، توان حمل بار و استقامت کلی پرنده ارتباط دارد. در بسیاری از مدل‌های سبک، استقامت پروازی حدود ۲۰ تا ۲۵ دقیقه است [۲۲]. که با انجام مانورهای چرخشی [۲۳] یا پرواز در میدان‌های بادی [۲۴]. ، مصرف انرژی نیز به‌شدت افزایش می‌یابد. در این مقاله، با تمرکز بر همین رویکرد پوشش پویا، الگوریتم‌های کاربردی در محیط‌های

واقعی بررسی و طبقه‌بندی شده‌اند تا چارچوبی دقیق برای انتخاب راهکارهای مناسب در برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی ارائه شود.

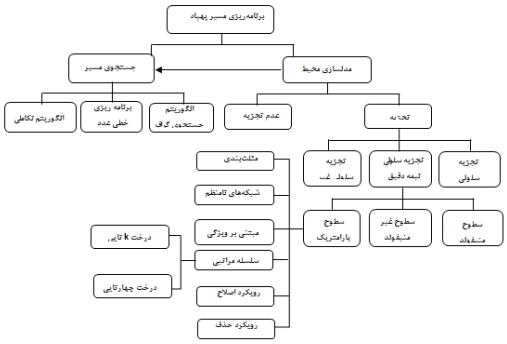
در ادامه مفاهیم اولیه در برنامه‌ریزی مسیر معرفی شده و عوامل تاثیرگذار در بهبود آن‌ها توضیح داده می‌شود. در بخش بعدی یک طبقه‌بندی جامع و جدید برای رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر ارائه خواهد شد که بخش‌های مرتبط با رویکرد مبتنی بر نمونه‌برداری و هوش مصنوعی را پوشش خواهد داد و به سایر رویکردها به دلیل کاربرد کمتر در مسئله اشاره کوتاهی خواهد شد.

۲-۱- طبقه‌بندی رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر

در فاز نخست برنامه‌ریزی مسیر، دو رویکرد اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد: رویکرد تجزیه و رویکرد عدم تجزیه. در رویکرد تجزیه، محیط عملیاتی به بخش‌هایی با ساختار هندسی مشخص تقسیم می شود، در حالی که در رویکرد عدم تجزیه، محیط به صورت کلی و بدون تقسیم بندی کاوش می شود. در عمل، رویکرد تجزیه به دلیل استفاده از سلول های محدب، که باعث کاهش تعداد و شدت مانورهای چرخشی و در نتیجه کاهش مصرف انرژی پهپاد می‌شود، کارایی بیشتری نسبت به رویکرد عدم تجزیه دارد. رویکرد تجزیه خود به سه دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شود: تجزیه سلولی دقیق، غیردقیق و نیمه‌دقیق [۲۵] در شرایطی که اطلاعات محیط به صورت کامل و دقیق در دسترس باشد، از تجزیه سلولی دقیق استفاده می‌شود. در مواقعی که اطلاعات ناقص یا تخمینی باشد، رویکردهای غیردقیق و نیمه‌دقیق گزینه‌های مناسب‌تری هستند. با توجه به اینکه در سناریوهای واقعی معمولاً اطلاعات محیط کامل نیست، رویکرد نیمه‌دقیق بیشترین کاربرد را در کاربردهای عملی دارد.یکی از اهداف این پژوهش، ارائه‌ی یک طبقه‌بندی جدید از الگوریتم‌های مؤثر در چارچوب رویکرد تجزیه نیمه‌دقیق در محیط‌های واقعی است. این دسته از رویکردها معمولاً بر پایه‌ی نمایش شبکه‌ای محیط طراحی می‌شوند. نمایش شبکه‌ای از بازدید تکراری سلول‌ها جلوگیری می‌کند. در نتیجه می‌تواند پاسخ مناسبی برای بسیاری از چالش‌های رایج در مسیریابی پهپادی باشد. چالش‌های c_1 تا c_5، به‌سبب مشخص‌سازی موقعیت موانع و اهداف، در طبقه‌بندی تجزیه نیمه‌دقیق قرار می‌گیرد. این نمایش از سادگی پیاده‌سازی و کارایی بالایی برخوردار است، در عین حال رشد نمایی ساختار شبکه موجب افزایش قابل توجه در مصرف حافظه و سربار محاسباتی می‌شود[۲۶]. در نمایش شبکه‌ای، دو نوع اصلی از ساختار سلولی مورد استفاده قرار می‌گیرد: سلول‌های مربعی و سلول‌های مثلثی. استفاده از سلول‌های مثلثی نسبت به مربعی دارای مزایایی مانند انعطاف‌پذیری بیشتر، طول مسیر کمتر و وضوح تصویر بالاتر است [۲۷]. برای مثال، در پژوهش [۲۸] یک الگوریتم پوششی برای ربات‌ها با استفاده از سلول‌های مثلثی ارائه شد، اما به دلیل محدودیت ربات‌ها در تنظیم دقیق حرکات، نتایج مطلوبی حاصل نشد.

با وجود افزایش پیچیدگی محاسباتی و مصرف حافظه، این روش دقت مسیریابی را افزایش داده و انرژی مصرفی را کاهش می‌دهد. بنابراین، توسعه‌ی روش‌های کارآمد مبتنی بر آن، همچنان موضوعی فعال در این حوزه است. ساختار سلول‌های مثلثی نیز به دلیل توانایی بالا در

تطبیق با موانع و وضوح تصویربرداری، در رفع چالش‌های خاصی مانند c_2، c_4 و c_5 مؤثر است.

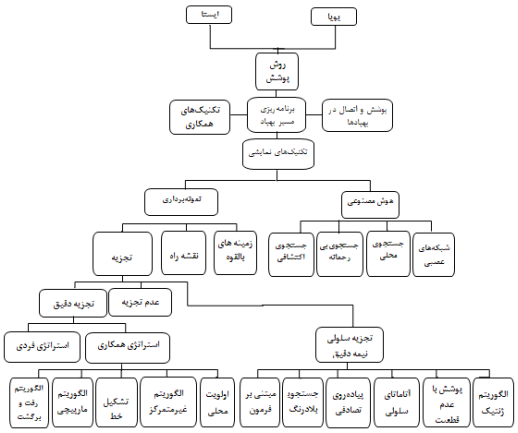


شکل۱. معرفی رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر در فازهای مدلسازی محیط و جستجوی مسیر به همراه ساختارهای داده‌ای

شکل ۱ یک طبقه‌بندی جدید از رویکردهای نیمه‌دقیق برنامه‌ریزی مسیر پهپاد را به‌همراه ساختار داده‌ها نشان می‌دهد. در فاز جستجوی مسیر، بسیاری از الگوریتم‌ها با بسط روش‌های دوبعدی توسعه یافته‌اند، اما هنوز ابعاد خاص شبکه‌های هوایی به‌طور کامل در آن‌ها لحاظ نشده است[۸]. در کاربردهایی مانند بازرسی سازه‌های عمرانی، نیاز به پایش در سطوح مختلف ارتفاعی وجود دارد که مدل‌های دوبعدی قادر به پوشش کامل آن نیستند. برای مواجهه با این پیچیدگی، الگوریتم‌هایی نظیر مدل‌های احتمالاتی، الگوریتم‌های الهام‌گرفته از طبیعت، و مدل‌های تکاملی پیشنهاد شده‌اند[۲۹]. همچنین، استفاده از تجزیه سلولی و نقشه راه، بستر مناسبی برای توسعه الگوریتم‌های سه‌بعدی فراهم می‌کند[۳۰]. در این میان، الگوریتم‌های فراابتکاری به‌دلیل توانایی بالا در حل مسائل ترکیبی و جستجوی مسیرهای نزدیک به بهینه در زمان محدود، گزینه‌ای مطلوب برای کاربردهای عملی شبکه‌های پهپادی هستند[۲۹].

۲-۲- طبقه‌بندی مبتنی بر تکنیک‌های نمایشی

در این بخش، الگوریتم‌ها با محوریت چالش‌های کلیدی و در پاسخ به مسائل مطرح‌شده در بخش ۱-۱، بر اساس تکنیک‌های نمایشی شکل ۲ دسته‌بندی و تحلیل می‌شوند.



شکل۲. دسته‌بندی الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر مبتنی بر رویکردهای برنامه‌ریزی مسیرپهپادها

یکی از اهداف این پژوهش، تحلیل چالش‌محور الگوریتم‌های کاربردی در هر رویکرد و ارائه‌ی یک نگاه انتقادی به راه‌حل‌های ارائه‌شده است. برای این منظور ابتدا الگوریتم‌هایی انتخاب شده‌اند که در بیشترین آثار پژوهشی به‌کار رفته‌اند و سپس مزایا، محدودیت‌ها و توانمندی آن‌ها در مواجهه با چالش‌ها بررسی می‌شود. این تحلیل جامع، امکان مقایسه و انتخاب دقیق‌تری برای محققان فراهم می‌سازد.

نخستین مرحله از فرایند برنامه‌ریزی مسیر، نحوه‌ی نمایش محیط سه‌بعدی است. دو تکنیک اصلی در این زمینه عبارت‌اند از :نمایش مبتنی بر نمونه‌برداری و نمایش مبتنی بر هوش مصنوعی.

تکنیک‌های نمونه‌برداری برای مدل‌سازی محیط به داده‌هایی از پیش تعریف‌شده نیاز دارند تا

فضـای کـاری شـامل منـاطق آزاد و موانـع را پیکربندی و تفسیر کنند. با توجه بـه تمرکـز ایـن پژوهش بر تجزیـه نیمـه‌دقیـق، کـه بـه داده‌هـای زیادی نیـاز نـدارد، ایـن تکنیـک‌هـا همچنـان در محیط‌های پویای پهپادی قابل استفاده هستند.در برنامه‌ریزی مبتنی بـر نمونـه‌بـرداری، دو رویکـرد اصلی وجود دارد:

فعال: الگوریتم‌ها به‌طور مستقل و با تکیه بـر توان پردازشی خود مسیر مناسب را می‌سازند.

غیرفعال: الگوریتم‌ها بـه داده‌هـای از پـیش تعریف‌شده وابسته‌اند و به تنهایی توانـایی تولیـد مسیر را ندارند.

کاربرد اصلی این تکنیک‌ها در فـاز اول، یعنـی پیش‌پردازش و مدل‌سازی محیط است، جـایی‌کـه گره‌هایی در فضای کاری تعریف شده و سـپس در فاز دوم (جستجو)، این گـره‌هـا بـا الگـوریتم‌هـای مسیریابی به یکدیگر متصل می‌شوند. این مسـئله پـیش‌تـر در حـوزه شـبکه‌هـای حسـگر بـی‌سـیم به‌عنـوان مسـئله‌ی کلاسـیک پوشـش منطقـه‌ای مطرح بوده اسـت؛ سـاختارهای هندسـی در ایـن زمینـه از رایـج‌تـرین راه‌حـل‌هـا محسـوب می‌شوند[۳۱].

شـکل ۳ سـه تکنیـک اصـلی پوشـش در شبکه‌های حسگر بی‌سیم را نشـان مـی‌دهـد. بـه دلیل ویژگی‌هایی نظیر وزن سبک و مصرف انرژی پایین، بسیاری از این تکنیک‌ها بـرای شـبکه‌هـای پهپادی نیز قابـل اقتبـاس هسـتند [۳۲]. بـا ایـن حال، الزامـات خـاص شـبکه‌هـای پهپـادی ماننـد تحـرک سـه‌بعـدی، تعامـل بلادرنـگ و اسـتقلال تصمیم‌گیری ایجاب می‌کند کـه ایـن تکنیـک‌هـا اصلاح یا توسعه یابند.

پارامترهایی چون اجتنـاب از برخـورد، هزینـه مسیر، طول مسیر و مصرف انرژی، از عوامل مـؤثر در کیفیت پوشـش محـیط در پروازهـای گروهـی پهپادها به‌شمار می‌روند. روش‌های ارائه‌شـده بایـد متناسـب بـا نـوع کـاربرد و ویژگـی‌هـای محـیط، براساس این معیارها ارزیابی شوند. برای نمونه، در کاربردهای نظـامی، ایمنـی پـرواز، در کاربردهـای نظارتی، کیفیت و کمیت داده‌هـای محیطـی، و در پایش محیط، پوشش کامل به‌عنوان شاخص‌هـای اصلی مطرح هستند.

در میـان تکنیـک‌هـای موجـود، اسـتفاده از رویکردهای هندسی بـه‌عنـوان یکـی از مـؤثرترین گزینه‌ها در مواجهه با چالش‌هـای c_1، c_2، c_4، c_6 شناخته می‌شود، چرا که این تکنیک‌هـا بـه‌خـوبی می‌توانند بین ساختار مسیر و ویژگی‌هـای محـیط تعادل برقرار کنند.

۳- تکنیک‌های نمونه‌برداری

در این فاز، محیط مورد نظر، نقطه شروع حرکـت، نقطـه پایـان حرکـت، موقعیـت موانـع و سـایر پارامترهای موثر در برنامه‌ریزی مسیر تعیین مـی-شود. یکی از رویکردهای کاربردی در تکنیک‌هـای نمونه‌برداری، رویکرد تجزیه سلولی است. در حـال حاضـر کارهـای تحقیقـاتی بسـیاری در مـورد رویکردهای تجزیه سلولی در فاز پـیش‌پـردازش و مدلسازی محـیط انجـام شـده اسـت کـه در ایـن رویکردها براساس تجزیه یا عـدم تجزیـه محـیط، دسته‌بندی‌های مختلفی ارائه شده است.

مسئله برنامه‌ریزی مسیر شـامل دو فـاز پـیش پردازش محیط و جستجوی مسیر اسـت. در ایـن پـژوهش تمرکـز بـر بررسـی رویکـرد پوششـی از جنبه‌های مقیاس‌پذیری، دقـت و وضـوح تصـویر، میزان مصـرف حافظـه و کـاهش تعـداد و شـدت

مانورهای چرخشی است. در این قسمت الگوریتم-های برنامه‌ریزی مسیر پوششی براساس تجزیه محیط بررسی می‌شوند که شامل دو رویکرد اصلی تجزیه و عدم تجزیه است.

۳-۱- فاز مدلسازی محیط: تجزیه سلولی

در رویکرد تجزیه سلولی، محیط هدف معمولاً با استفاده از تکنیک تجزیه به مناطق غیر متقاطع تقسیم می‌شود که سلول نامیده می‌شوند. اندازه و وضوح سلول‌ها ممکن است با توجه به نوع تجزیه تغییر کند. این رویکرد ضمانت می‌کند که از هر سلول یکبار بازدید می‌شود و محیط به طور کامل پوشش داده می‌شود. در سلول‌های بزرگتر، ممکن است چند حرکت لازم باشد تا فقط یک سلول به طور کامل پوشش داده شود، در حالی‌که در سلول‌های کوچکتر، تنها یک حرکت کافی است. این سلول‌ها معمولاً به اندازه یک ربات یا به اندازه دامنه حسگر و دوربین (برای پوشش هوایی) هستند.

مسئله برنامه‌ریزی مسیر پوششی شامل منطقه هدف، تکنیک‌های تجزیه سلول، معیارهای عملکرد و در دسترس بودن اطلاعات است. رویکرد تجزیه سلولی شامل سه‌دسته تجزیه دقیق، تجزیه نیمه دقیق و تجزیه غیردقیق دسته-بندی می‌شود و در ادامه الگوریتم‌های هریک معرفی می‌شوند.

۳-۱-۱- تجزیه سلولی دقیق

در تجزیه سلولی دقیق، فضای کاری به نواحی مجزایی به نام سلول تقسیم می‌شود که از ترکیب مجدد آن‌ها، محیط اولیه بازسازی می‌گردد. این سلول‌ها معمولاً با حرکات ساده رفت‌وبرگشت شکل می‌گیرند و برنامه‌ریزی مسیر پوششی به یک مسئله حرکتی بین سلول‌های مجاور با مرز مشترک تبدیل می‌شود[۱۳].

با توجه به نمایش گراف همسایگی، گره‌ها نشان‌دهنده سلول‌ها و لبه‌ها نمایانگر ارتباط با سلول‌های همسایه است. بنابراین، سلول‌های تجزیه شده با جابجایی یک خط از یک طرف به طرف دیگر در منطقه مورد نظر ایجاد می‌شوند. موانع موجود در محیط باعث ایجاد محدودیت حرکت در سلول می‌شوند. نتیجه تجزیه سلول به عنوان یک گراف همسایگی ذخیره می‌شود و با یک جستجو در یک مسیر هر گره فقط یک بار پیدا می‌شود. مسیر پوشش نهایی از حرکات ساده داخلی و بین سلولی تشکیل شده است. تجزیه سلولی دقیق دارای دو الگوریتم مهم تجزیه ذوزنقه‌ای و تجزیه سلول بوسترووفیدون[1] است[۳۳]. در تجزیه ذوزنقه‌ای منطقه مورد نظر به سلول‌های ذوزنقه‌ای محدب تقسیم می‌شود و در تجزیه بوسترووفون[2] سلول‌های بزرگتر غیر محدب با در نظر گرفتن رئوس مانع ایجاد می-شود. تجزیه بوسترووفیدون می‌تواند از تعداد سلول‌های ذوزنقه‌ای کم کرده و طول مسیر پوششی را در مقایسه با تجزیه ذوزنقه‌ای به حداقل برساند. در شکل ۳ تکنیک‌های پوشش در روش تجزیه سلولی دقیق نشان داده شده است. رویکرد تجزیه سلولی دقیق دارای دو استراتژی انفرادی و همکاری است.

a) استراتژی انفرادی[3]: یک رویکرد دقیق تجزیه سلولی با در نظر گرفتن مناطق چند ضلعی مقعر توسط جیائو و همکاران [۳۴]، لی و همکاران [۳۵] بررسی شده است. در این

[2] Decomposition of bostrophon
[3] Individual strategy

استراتژی ابتدا، فضای کاری را به روش بازگشتی حریصانه در زیرمجموعه‌های غیر مقعر کاوش می‌کنند[۳۶]. سپس، برای به حداقل رساندن مانورهای چرخشی، حرکات رفت و برگشت به صورت عمود بر جهت جارو که دارای حداقل فاصله بین لبه و راس است، انجام می‌شود[۳۷] [c_2، c_6، c_8].

b) استراتژی همکاری[1]: در استراتژی‌های همکاری چندین پهپاد را برای پوشش یک منطقه مورد نظر به کار می‌گیرند. این نوع استراتژی معمولاً هنگامی اعمال می‌شود که فضای کار بیش از حد وسیع باشد و با یک پهپاد پوشانده نشود. بسته به پیچیدگی مسئله، رویکرد پوششی ممکن است منطقه را به مناطق فرعی تقسیم کند و مسیرهای پوشش را به صورت جداگانه برای هر پهپاد برنامه‌ریزی کند. این استراتژی دارای چند الگوریتم است که به ترتیب معرفی می‌شوند[c_2 ، c_4].

الگوریتم رفت و برگشت[2]: یک ایستگاه کنترل زمینی محیط را تجزیه کرده و مناطق فرعی حاصل را به وسیله نقلیه اختصاص می‌دهد. هر وسیله نقلیه حرکات رفت و برگشت را با هدف به حداقل رساندن تعداد مانورهای چرخشی محاسبه می‌کند[۳۸][c_2، c_6] c_8.

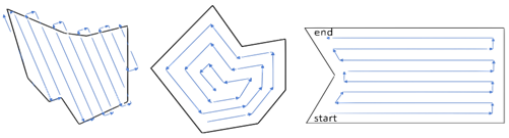
الگوریتم مارپیچی[3]: برای انجام مأموریت در مناطق ساحلی با چند پهپاد ناهمگن است. در سایر پژوهش‌ها فضای کار را با توجه به قابلیت سنجش وسایل نقلیه هوایی و به صورت یک مثلث تشخیص می‌دهند[۳۹]. نویسندگان اظهار داشتند که تجزیه شبکه کلاسیک سلول‌های مربعی منظمی ایجاد می‌کند که تا حدی در مناطق پرواز ممنوع یا خارج از فضای کار قرار دارند. بنابراین، CDT سلول‌های مثلثی را در منطقه مورد نظر مطابقت می‌دهد که تقریباً با شکل دقیق منطقه مطابقت دارد. برای تولید یکنواخت مثلث، آن‌ها بهینه‌سازی لوید را اعمال کردند. این روش زاویه سلول را به ۶۰ درجه نزدیک می‌کند و یکنواختی را افزایش می‌دهد. سپس، با الگوریتم مارپیچی که در قسمت قبل معرفی شد و با استفاده از یک پارامتر صاف سازی بهبود یافته، برای تولید مسیرهای پوشش در مناطق فرعی استفاده می‌شود[c_6 و c_8][۴۰].

تشکیل خط[4]: یک استراتژی پوششی و همکاری برای شناسایی اهداف هوشمند در حال حرکت در محیط‌های خطرناک است که اهداف سعی می کنند تا عمدا از جستجوی انجام شده توسط وسایل نقلیه در داخل یک منطقه مستطیل شکل فرار کنند[۴۱]. این مأموریت بر اساس پنج معیار استوار است: به حداکثر رساندن احتمال تشخیص هدف، به حداقل رساندن زمان ردیابی و تعداد وسایل نقلیه هوایی به کار رفته در مأموریت، ارائه قدرت با فرض خرابی یک یا چند پهپاد و به حداقل رساندن مقدار اطلاعات به اشتراک گذاشته شده در وسایل نقلیه [c_6 و c_8]

الگوریتم غیرمتمرکز[5]: برای تقسیم‌بندی مناطق مستطیل شکل در مأموریت‌های نظارتی توسط Acevedo و همکاران ارائه شده است. وسایل نقلیه همگن با استفاده از تکنیک هماهنگی و یک به یک، زیرمجموعه‌ها را توزیع کرده و مناطق مجاور را کاوش می‌کنند[c_6 و c_8][۴۲].

[1] Cooperation strategy
[2] Round-trip algorithm
[3] Spiral algorithm
[4] Line formation
[5] Decentralized algorithm

اولویت محلی[1]: رویکرد پوشش و تجزیه پیوسته برای مناطق چند ضلعی محدب با اولویت محلی توسط Araujo و همکاران ارائه شده است[۴۳]. فضای کار در مناطق جزئی با یک روش جابجایی جدا می‌شود، جایی‌که باید بخشی از منطقه با توجه به قابلیت نسبی آن، مانند مساحت تحت پوشش در هر واحد زمان، به هر وسیله نقلیه اختصاص یابد[c_2 ، c_6 و c_8].

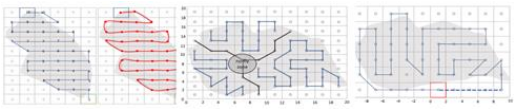


شکل ۳ -تکنیک‌های پوشش در روش تجزیه سلولی دقیق

۳-۱-۲- رویکرد تجزیه غیردقیق سلولی

در این رویکرد محیط به مجموعه‌ای از سلول‌های یکسان تقسیم می‌شود[۱۳]. این سلول‌ها معمولا به شکل مربع هستند. در این رویکرد قبل از اجرا، اطلاعات و آگاهی از محیط وجود دارد و برنامه‌ریزی مسیر در مرحله اول در یک محیط آفلاین انجام می‌شود. اما در مراحل بعدی پهپادها درحین برنامه‌ریزی و اجرا، اطلاعاتی را برای تکمیل نقشه داخلی، جمع‌آوری کنند.

منظور از محیط آفلاین آن است که اطلاعات طبق نقشه‌های از پیش‌تعریف شده‌ای جمع‌آوری می‌شود. روش‌های مبتنی بر شبکه را می‌توان در مناطق تقریبی برای ایجاد مسیرهای پوششی اعمال کرد[۱۳]. دو حالت در این رویکرد وجود دارد: ۱) اطلاعات کامل که در آن اطلاعات دقیق محیط در دسترس است. ۲) اطلاعات ناقص که مبتنی بر تجزیه غیردقیق شبکه است و اطلاعات کاملی از محیط در دسترس نیست. با توجه به اینکه در دنیای واقعی و در لحظه شروع اطلاعات کاملی از محیط در دسترس نیست این روش کاربردی‌تر است. در ادامه روش‌های تجزیه سلولی غیردقیق معرفی خواهند شد که می‌توانند راه‌حل‌های مناسبی جهت رفع چالش‌های[c_1، c_3، c_7] باشند. (شکل۴).



شکل ٤.-رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر پوششی مبتنی بر تجزیه سلولی غیردقیق

مبتنی برفرمون[2]: روش‌های مبتنی بر فرمون از عملکرد مورچه‌های واقعی الهام گرفته‌اند که از مسیرهای شیمیایی برای جهت‌یابی استفاده می‌کنند. این روش‌ها فضای کار را با شبکه نشان می‌دهند و از مقدار فرمون باقی‌مانده از هر سلول محیط استفاده می‌کنند[۴۴]. فرمون می‌تواند در طول زمان تبخیر شود. برخی از انواع فرمون‌ها می‌توانند وسایل نقلیه را جذب یا دفع کنند. میدان دید و میزان سنجش وسایل نقلیه معمولاً به سلول‌های مجاور محدود می‌شود. این روش‌ها هزینه محاسباتی پایینی دارند.

جستجوی بلادرنگ[3]: عملکرد الگوریتم‌های پوشش چند رباتی بلادرنگ مانند شمارش[۴۵]، Patrol PGRAPH * [۴۶] ، شمارش گره [۴۷] و A * بلادرنگ [۴۸] کاوش می‌کنند.

پیاده‌روی تصادفی[4]: روشی برای نقشه‌برداری از محیط است و شامل یک استراتژی اکتشاف می‌شود که با استفاده از یک پیاده‌روی تصادفی تقویت شده، وجود موانع را با استفاده از

[1] Local preference

[2] Pheromone-based
[3] Real-time search
[4] Random walk

تعدادی پهپاد شناسایی می‌کنـد. سـود حاصـل از تابع هدف هـر پهپـاد، براسـاس حرکـت و تفـاوت زاویه‌ای بین سلول فعلی و جهت اسـکن متفـاوت اسـت و هـر پهپـاد بـه صـورت انفـرادی، یکـی از دونیمـه را کـاوش مـی‌کنـد. در ایـن روش بـرای جلوگیری از بررسی مجدد سلول‌های کاوش شده، اطلاعات را در بین سلول‌ها مبادله می‌کنند [۴۹].

آتاماتـای سـلولی[1]: الگـوریتمی مبتنـی بـر اتوماتای سلولی که بـرای همـاهنگی ربـات‌هـا در تکنیک‌های پوشش [۵۰] و کنترل دو کوادکـوپتر در کارهـای اکتشـاف و نظـارت اسـتفاده شـده است[۱۲].

پوشش بـا عـدم قطعیـت[2]: در ایـن روش محیط به شکل یک شبکه شـش ضـلعی و شـامل نقـاط اطلاعـاتی[3] اسـت. هـر IP بـا یـک مقـدار اطمینان کار مـی‌کنـد. IP شـامل اطلاعـات قابـل اعتماد است و کـاوش در منـاطق اطـراف آن لازم نیسـت. الگـوریتم بـرای هـدایت وسـایل نقلیـه و انتخاب نقاط بعدی بـرای کـاوش از توابـع هزینـه مانند قطعیت، فاصله استفاده می‌کند.

الگـوریتم ژنتیـک[4]: ایـن الگـوریتم ترکیبـی از فرمون‌های دیجیتال و اسـتراتژی‌هـای تکـاملی در کاربردهـای همکـاری و کـاهش مصـرف انـرژی است[۵۱]. فضای کار در مناطق فرعی مسـتطیلی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک به هر وسیله نقلیـه اختصاص داده می‌شود. افراد، اطلاعات مربـوط بـه مختصات رئوس(عرض/ طول) مسـتطیل را دارنـد. موقعیـت پهپادهـا طـی مراحـل تکامـل طبیعـی الگوریتم، مراحل تولید، تولیدمثل و جهـش بـرای تولید نمونه‌های جدید طی می‌کنند. یـک تـابع را براساس فرمـون‌هـای دیجیتـال حـاوی اطلاعـات مربوط به منطقه ارزیـابی مـی‌کنـد. برنامـه‌ریـزی مسیر پهپادها معمولا در محـیط غیرقطعـی انجـام می‌شود که اطلاعات کاملی از محیط در دسـترس نیست.

جدول۳. رویکردهای برنامه ریزی مسیر پوششی مبتنی بر تجزیه سلولی غیردقیق

مراجع	الگوریتم	آفلاین/آنلاین	روش تجزیه محیط	معیارهای عملکرد	منفرد/چندتایی	مقابله با چالش‌ها
[۵۲]	رویکرد مبتنی بر شیب	آفلاین	شبکه نامنظم /منظم	زمان پوشش	منفرد	c_4 ،c_2
[۵۳]	الگوریتم Wavefront و درون یابی مکعبی	آفلاین	شبکه نامنظم /منظم	طول مسیر؛ تعداد مانورهای چرخشی	منفرد	c_5 ،c_2
[۵۴]	Multi-RTT* با گره ثابت و الگوریتم ژنتیک	آفلاین	شبکه منظم	طول مسیر	منفرد	c_4 ،c_2
[۵۵]	الگوریتم Wavefront	آفلاین	شبکه نامنظم /منظم	خطاهای موقعیت و ارتفاع ؛ اختلالات باد ؛ زمان پرواز و پیکربندی ؛ طول مسیر	چندتایی	c_5 ،c_4،c_3 ،c_1
[۵۶]	جستجوی هارمونی	آفلاین	شبکه نامنظم /منظم	تعداد مانورهای چرخشی	چندتایی	c_5 ،c_2
[۵۷]	استراتژی BFS، DFS و میانبر اکتشافی	آنلاین	مربع	فاصله کل پوشش	منفرد	c_6 ،c_2
[۵۸]	منحنی های پر کننده فضای هیلبرت	آنلاین	مربع	فاصله کل پوشش	منفرد	c_6،c_7 ،c_2

[1] cellular atamata
[2] Coverage with uncertainty
[3] Information points
[4] Genetic algorithm

[۵۹]	الگوریتم BOA	آنلاین	شبکه منظم	طول مسیر،جوگیر ی از تصادم،حداق ل سازی توان مصرفی پهپاد	منفرد	c_7 ،c_2،c_4
[۷]	الگوریتم خطوط مستقیم طولانی	آفلاین	نامنظم /شبکه حسگر	فاصله کل؛ تعداد دورها و جهش بین سلولی	چندتایی	c_6 ،c_5
[۱۴]	الگوریتم شمارش لبه و گشت گراف	آنلاین	شبکه گراف	طول مسیر؛ میانگین فاصله ربات ها	چندتایی	c_5 ،c_2
[۶۰]	پیاده روی تصادفی تقویت شده	آنلاین	مستط یل شکل	زمان پوشش ؛ کارآیی تشخیص سراسری	چندتایی	c_6 ،c_4،c_1
[۶۱]	آتاماتای سلولی	آنلاین	شبکه منظم	زمان کاوش با/بدون موانع	چندتایی	c_6 ،c_3
[۶۲]	برنامه ریزی نقطه راه با عدم قطعیت	آنلاین	مستط یل شکل	اطمینان از نکات اطلاعاتی	چندتایی	c_8 ،c_7
[۶۳]	ادغام اطلاعات برای جستجوی مشارکتی	آنلاین	مستط یل شکل	بومی سازی هدف	چندتایی	c_8 ،c_6
[۶۴]	افق ثابت با CMA-ES	آنلاین	مستط یل شکل	آنتروپی ؛ نرخ طبقه بندی	چندتایی	c_4 ،c_8،c_6
[۶۵]	الگوریتم نظارت ترجیحی مبتنی بریادگیری	آنلاین	شبکه منظم	توزیع و بومی‌سازی هدف ؛ اجتناب از تهدید	منفرد	c_8،c_2،
[۶۶]	الگوریتم Back-and-Forth	آنلاین	شبکه منظم	فاصله کل ؛ میزان پوشش ؛ نرخ افزونگی	چندتایی	c_6،c_4
[۶۷]	الگوریتم ژنتیک (GA)	آفلاین/آنلاین	شبکه چند ضلعی/ منظم	طول مسیر	منفرد	c_4،c_2
[۶۸]	الگوریتم flood fill با ژنتیک	آفلاین/آنلاین	شبکه چند ضلعی/ منظم	طول مسیر	چندتایی	c_5،c_4،c_2
[۶۹]	برنامه ریزی مسیر چند منظوره با GA	آفلاین/آنلاین	مستط یل شکل	زمان اتمام ماموریت	چندتایی	c_6،c_4،c_2
[۷۰]	بهینه سازی کلونی مورچه های آشفته برای پوشش	آفلاین/آنلاین	شبکه منظم	میزان پوشش ؛ نسبت پوشش اخیر ؛ انصاف (توزیع پوشش) ؛ قابلیت اتصال (توزیع پهپادها)	چندتایی	c_8،c_6،c_4
[۷۱]	ACO با توابع توزیع گوسی	آنلاین	شبکه منظم سه بعدی	طول مسیر و زاویه چرخش؛ میزان همپوشانی	چندتایی	c_7،c_5،c_2

در جداول۳و۴، مجموعه ای از پژوهش‌های برجسته براساس سه یا چهار رویکرد تاثیرگذار در برنامه‌ریزی مسیر مبتنی بر تجزیه سلولی غیردقیق فهرست شده‌اند. در تجزیه غیردقیق شبکه، اندازه سلول‌ها متناسب با دید دوربین در پهپاد و به صورت گسسته است. هنگامی که پهپاد از مرکز هر سلول بازدید می‌کند، پوشش کامل می‌شود. براساس میزان اطلاعات قابل دسترس قبل از اجرا، توانایی پوشش محیط، نحوه اجتناب از تصادم و سادگی پیاده‌سازی الگوریتم، برنامه-ریزی مسیر پهپاد را می‌توان از طریق درختان پوشا، شبکه‌های عصبی، الگوریتم‌های ژنتیک و الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری عمومی تعیین کرد [۷۲]. در این روش محل کار به یک شکل هندسی مثلا مستطیل تقسیم می‌شود و در مرکز هر مستطیل یک نقطه قرار می‌گیرد [۷۳]. فرض بر این است که پهپاد وقتی به آن نقطه خاص رسید سلول را کاملاً پوشانده است. اندازه سلول‌ها

براساس FOV دوربین و میزان همپوشانی لازم در فرایند محاسبه می‌شود [۷۴]. الگوریتم‌های این رویکرد عبارتنداز :

- الگوریتم جبهه موج با صعود شیب‌دار: تعیین مسیر پوششی با حداقل تعداد چرخش وکوتاهترین مسیر برای بازگشت پهپاد قبل از قطع شدن برق.
- الگوریتم جیبی عابر پیاده[۱]
- مبتنی بر روش ردیابی رو به عقب[۲]: هدف در این روش یافتن نزدیکترین مسیر بهینه است.

الگوریتم Quad Tree : هدف این الگوریتم کاهش زمان محاسبه است.

جدول٤. مقایسه الگوریتم‌های نمایش شبکه‌ای

مراجع	الگوریتم	آفلاین/آنلاین	مقابله با چالش‌ها	توضیحات
[۷۱]	جبهه موج	آفلاین	c_4،c_2	الگوریتم ساده و آسان برای پیاده‌سازی
[۲۲]	الگوریتم مارپیچی	آنلاین	c_6،c_4	با یکبار بازدید از هر سلول، تکرار پوشش را به حداقل می‌رساند.
[۷۵]	شبکه عصبی	آنلاین	$c_7 c_3$،c_2	از برخورد با موانع پویا جلوگیری می‌کند

۳-۲- رویکرد عدم تجزیه

در محیط‌های منظم و ساده که ماموریت‌ها با یک پهپاد انجام می‌شود، نیاز به تجزیه محیط وجود ندارد و الگوهای هندسی ساده برای کاوش کافی است. متداول‌ترین الگوها، جاروب کردن[۳] و مارپیچ[۴] است. نمونه‌های اولیه توسط Mission Planner ، محبوب‌ترین نرم افزارکنترل پرواز، برای فعال کردن پوشش منطقه با یک استاندارد به تصویب رسید [۷۶].

در این الگو، حرکات به صورت خطوط مستقیمی هستند که در انتهای هر دور با زاویه بسته دور می‌زنند. حالت آخر حرکاتی را انجام می دهد که از رأس خارجی ناحیه عبور کرده و شعاع را به سمت نقطه مرکزی کاهش می دهد. شکل ۵ رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر پوششی مبتنی بر روش عدم تجزیه را نشان می‌دهد. این الگوریتم‌ها می‌توانند پیشنهاد مناسبی در حل چالش‌های[c_4 ، c_6،] c_8باشند.

شکل۵. رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر پوششی مبتنی بر روش عدم تجزیه

برخی روش‌ها فقط مناطق مستطیل شکل را بررسی می‌کنند، طبق ایده آندرسن [۷۷] که در آن انواع مختلف الگوهای پرواز مقایسه شده است، در شرایطی که اطلاعاتی از موقعیت هدف در دست نیست و منطقه جستجو گسترده است، از الگوهای جاروب مانند روش‌های خط موازی، مارپیچ و پرواز مربعی برای پوشش یکنواخت محیط استفاده می‌شود. این الگوها به دلیل سادگی و اثربخشی، گزینه‌ای مناسب در مأموریت‌های اکتشافی محسوب می‌شوند. در برنامه‌ریزی مسیر پهپاد، اهداف بهینه‌سازی عمدتاً شامل کاهش طول مسیر، هزینه و مصرف انرژی، و همچنین جلوگیری از برخورد هستند. به‌ویژه

بهینــه‌ســازی انــرژی نقــش مهمــی در افــزایش استقامت و برد عملیاتی پهپاد ایفـا مـی‌کنـد، کـه منجر به پوشش مـؤثرتر محـیط و افـزایش زمـان پرواز می‌شود.

این اهداف با الزامات پهپادها برای دستیابی به عملکرد بهینه، صرفه جـویی در مصـرف انـرژی و بهینه‌سازی پوشش ارتبـاط مسـتقیمی دارنـد. بـه حداقل رساندن ارتفاع پهپـاد بـه کـاهش مصـرف انرژی کمک می کند و ثبات پرواز را افـزایش مـی دهد در حالی که به حداقل رساندن مسافت امکان پیونـدهای ارتبـاطی کوتـاهتر و انتقـال سـریعتر داده‌ها را فراهم می کند(جدول۵).

جدول ۵- پارامترهای موثر در رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر پوششی

مراجع	مصرف انرژی	رویکرد حل مسئله			بُعد		تحرک پهپاد		نوع پهپاد		توزیع پهپاد	
		توزیع شده	متمرکز	غیر متمرکز	سه بعدی	دو بعدی	ایستا	پویا	ناهمگن	همگن	قطعی	تصادفی
[۷۸]			✓		✓	✓	✓			✓		✓
[۹]		✓				✓	✓			✓		✓
[۷۹]	✓	✓				✓	✓		✓	✓		✓
[۲۵]		✓				✓	✓			✓		✓
[۲۶]		✓				✓	✓	✓		✓		✓
[۸۰]			✓			✓	✓			✓		✓
[۸۱]		✓				✓	✓			✓		✓
[۲۷]		✓				✓		✓		✓		✓
[۵۹]	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
[۸۲]					✓	✓	✓			✓	✓	✓
[۸۳]		✓				✓	✓			✓		✓
[۸۴]		✓				✓		✓	✓	✓		✓
[۸۵]		✓				✓		✓				✓
[۸۶]			✓			✓	✓	✓		✓		✓
[۸۷]		✓			✓	✓	✓			✓		✓
[۸۸]			✓			✓		✓		✓		✓
[۸۹]		✓				✓		✓		✓		✓
[۹۰]		✓				✓	✓	✓		✓		✓
[۹۱]	✓	✓				✓			✓	✓		✓
[۹۲]								✓		✓		✓
[۹۳]						✓				✓		✓
[۹۴]		✓				✓			✓	✓		✓
[۹۵]				✓		✓			✓	✓		✓
[۹۶]								✓		✓		✓
[۹۷]								✓		✓	✓	✓

جدول ۶. مقایسه نسبی پیشنهادهای موجود در تکنیک های مبتنی بر نمونه گیری

مراجع	جلوگیری از تصادم	خودمختاری	انرژی مصرفی	زمان مصرفی	هزینه مصرفی	راه‌حل متمرکز	بهینه‌سازی	طول مسیر
[۹۸]	✓	x	x	✓	✓	-	بهینه	-
[۱۰۷]	x	✓	x	x	x	-	بهینه	-
[۱۲۳]	x	x	x	✓	✓	-	بهینه	-
[۱۲۴]	✓	✓	✓	✓	x	-	بهینه	-
[۹۹]	x	x	x	✓	✓	-	بهینه	-
[۱۲۵]	✓	✓	x	x	x	-	بهینه	-
[۱۲۶]	✓	x	x	✓	x	کامل احتمالی	-	-
[۱۲۴]	x	x	x	✓	✓	کامل احتمالی	بهینه	-
[۱۰۰]	✓	✓	x	x	✓	کامل احتمالی	غیر بهینه	-
[۱۰۱]	✓	✓	x	x	x	کامل احتمالی	-	-
[۱۲۷]	✓	x	✓	✓	✓	-	بهینه	✓
[۱۲۸]	x	x	x	✓	x	-	غیر بهینه	-
[۱۲۹]	✓	x	x	✓	✓	-	بهینه	-
[۱۳۰]	x	✓	x	✓	✓	-	بهینه	-
[۱۳۱]	x	x	x	✓	✓	کامل احتمالی	بهینه	-
[۱۳۲]	✓	x	x	✓	✓	-	-	-
[۱۰۲]	✓	x	x	x	✓	-	بهینه	-
[۱۳۴]	✓	x	x	x	✓	-	بهینه احتمالی	✓
[۱۳۵]		x	✓	✓	✓	-	بهینه	✓
[۱۳۶]	✓	x	x	✓	x	-	بهینه	-
[۱۰۲]	✓	✓	✓	✓	✓	-	بهینه	-
[۱۳۷]	x	x	x	x	✓	-	بهینه	-
[۱۳۸]	✓	x	x	✓	✓	✓	نزدیک بهینه	✓
[۱۳۹]	x	x	x	✓	✓	-	بهینه	✓
[۱۴۰]	x	x	x	x	✓	-	بهینه	-
[۱۴۱]	x	x	x	✓	✓	-	بهینه	✓
[۱۴۲]	x	x	x	✓	x	✓	بهینه	✓
[۱۴۳]	x	x	x	x	x	-	بهینه	-
[۱۴۴]	x	x	x	✓	✓	-	بهینه	-
[۱۴۵]	x	x	x	✓	✓	-	بهینه	-
[۱۴۶]	x	✓	✓	✓	✓	-	بهینه	-
[۱۴۷]	x	x	x	x	✓	-	بهینه	✓
[۱۴۸]	✓	✓	x	✓	✓	-	-	✓
[۱۴۹]	✓	x	x	✓	✓	-	نزدیک بهینه	✓
[۱۵۰]	✓	✓	✓	✓	✓	کامل احتمالی	بهینه	-
[۱۵۱]	x	x	x	x	x	-	غیر بهینه	-
[۱۵۲]		✓	x	x	✓	-	بهینه	-
[۱۵۳]	✓	x	x	x	x	-	بهینه	✓
[۱۵۴]	✓	x	x	x	x	-	بهینه	✓
[۱۵۵]	x	x	x	x	x	-	غیر	✓

[۱۵۶]		✓	x	✓	x	-	-	بهینه
[۱۵۷]	✓	x	x	x	✓	-	-	-
[۱۵۸]	✓	x	x	x	✓	-	بهینه	-
[۱۵۹]		x	x	x	✓	-	بهینه	✓
[۱۶۰]	✓	x	x	x	x	-	بهینه	-
[۱۶۱]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	نزدیک بهینه	✓

۳-۳-تکنیک‌های هوش مصنوعی

تکنیک‌های برنامه‌ریزی مسیر پهپادها به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول تکنیک‌های مبتنی بر نمونه‌برداری هستند [۹۸] که دارای سه رویکرد تجزیه سلول[۱] [۹۳]، رویکرد نقشه راه[۲] شامل روش‌های احتمالی[۳] [۹۹]، پیمایش سریع درختان تصادفی[۴] [۱۰۰] دیاگرام ورونوی [۱۰۱] و الگوریتم *A و رویکرد زمینه‌های بالقوه[۵] [۱۰۲] است. الگوریتم‌های معرفی شده در این دسته در فاز پیش‌پردازش و مدلسازی محیط و پیش پردازش استفاده می‌شدند. به منظور غلبه بر مشکلات رویکردهای مبتنی بر نمونه‌برداری، رویکردهای هوش مصنوعی توسعه داده شده است. اگرچه روش‌های اکتشافی یافتن راه‌حل بهینه را تضمین نمی‌کنند، اما ممکن است سریع‌تر باشند و ممکن است کارایی بالاتری نسبت به روش‌های کلاسیک داشته باشند [۱۰۳].

دسته دوم رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی [۱۰۴] [۳۹] که در فاز جستجوی مسیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی دارای سه تکنیک جستجوی ابتکاری [۱۰۵] با الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم ژنتیک [۱۰۶] بهینه‌سازی ذرات[۱۰۷]، مدل‌های تکاملی، روش بازپرداخت شبیه‌سازی‌شده[۶] و بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها[۷][۱۰۸]، رویکرد جستجوی غیرهوشمندانه[۸] [۱۰۹] رویکرد جستجوی محلی [۱۱۰] و رویکرد شبکه عصبی مصنوعی است.

پژوهش‌های بسیاری در زمینه طراحی الگوریتم‌های اکتشافی و تقریبی با عملکرد مناسب انجام شده اس.ت که بر بهبود معیارهای پوششی و هزینه مسیر متمرکز شده‌اند. چنین الگوریتم‌هایی از نظر پوشش محیط یا هزینه مسیر (شامل: زمان پوشش یا مصرف انرژی) عملکردی کمتر از بهینه دارند. براساس مشاهدات در جدول ۶، معیار نیرومندی کمترین میزان توجه رو داشته و معیارهای زمان و هزینه مصرفی مانند الگوریتم‌های هوش مصنوعی بیشترین میزان کاربرد در الگوریتم‌ها را داشته‌اند. نوع راه-حل اتخاذ شده به میزان اطلاعات موجود از محیط بستگی دارد

براساس جدول ۷، زمان و هزینه مصرفی در اکثر کاربرهای هوش مصنوعی در نظر گرفته شده‌اند در حالی‌که معیار جلوگیری از تصادم کمتر مورد توجه بوده است. نوع راه‌حل اتخاذ شده به میزان اطلاعات موجود از محیط بستگی دارد. در یک محیط پویا پهپاد باید با استفاده از حسگرهای خود، اطلاعات مورد نیاز برای اجرا و برنامه‌ریزی مسیر پوششی را از محیط جمع کند. گاهی اوقات، به این نوع پوشش که به صورت آنلاین انجام می‌شود پوشش مبتنی بر حسگر نامیده گفته می‌شود زیرا از اطلاعات حسگر برای هدایت عملکرد پوشش استفاده می‌کند. از آنجایی

که برنامه‌ریزی مسیر سه بعدی باید با توجه به ماهیت پویای محیط انجام شود، به عنوان یک مسئله NP-Hard با ابعاد بالا تعریف می‌شود. بنابراین مسئله برنامه‌ریزی مسیر پوششی یک مسئله چالش برانگیز خواهد بود.

جدول ۷ . مقایسه نسبی پیشنهادهای موجود در تکنیک های هوش مصنوعی

مراجع	جلوگیری از تصادم	خودمختاری	انرژی مصرفی	زمان مصرفی	هزینه مصرفی	راه‌حل متمرکز	بهینه‌سازی	طول مسیر
[۱۱۱]	✓	x	x	✓	✓	-	بهینه	-
[۱۱۲]	x	x	x	x	x	-	بهینه	-
[۱۰۵]	x	x	x	✓	x	-	-	-
[۱۱۳]	x	x	x	x	x	-	بهینه	-
[۱۱۴]	x	✓	x	x	✓	-	-	-
[۱۱۵]	x	x	x	✓	x	-	بهینه	-
[۱۱۶]	x	x	✓	✓	✓	-	بهینه	-
[۱۱۷]	x	x	x	✓	✓	✓	بهینه	-
[۱۰۶]	x	x	✓	✓	✓	-	بهینه تقریبی	-
[۱۱۸]	x	✓	x	✓	x	-	بهینه	-
[۱۱۹]	x	✓	x	✓	x	-	-	✓
[۱۲۰]	x	x	✓	✓	x	-	بهینه تقریبی	-
[۱۱۰]	x	x	✓	✓	x	-	بهینه تقریبی	-
[۱۲۱]	✓	x	x	x	x	-	بهینه	-
[۱۲۲]	x	x	x	✓	x	-	-	-

۴- ساختارهای داده‌ای

هدف از برنامه‌ریزی مسیر یافتن یک استراتژی پرواز است که پهپاد را از یک نقطه به نقطه دیگر تحت محدودیت های خاصی حرکت دهد. برای ساختن یک استراتژی دقیق، در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های دنیای واقعی بسیار مهم است. بنابراین، فضای پیوسته باید گسسته شود. رویکردهای تجزیه سلولی نیمه‌دقیق از روش‌های پرکاربرد گسسته‌سازی فضا هستند.

همانطور که گفته شد، رویکردهای تجزیه سلولی نیمه‌دقیق برنامه‌ریزی مسیر پهپاد به دلیل اینکه در مرحله اول، اطلاعات کاملی از محیط ندارند و در حین ماموریت، اطلاعات خود را تکمیل می‌کنند برای پیاده‌سازی دنیای واقعی نسبت به سایر رویکردها مناسب‌تر هستند. از طرفی استفاده از مثلث‌بندی برای نمایش سلول-های شبکه به دلیل انعطاف‌پذیری، وضوح تصویر بالاتر و چندگانه در ارتفاعات مختلف و طول مسیر کوتاه‌تر انتخاب شد. هدف از این بخش معرفی ساختار داده‌های مناسب جهت ذخیره رویکردهای مثلث بندی محیط باتصویربرداری در ارتفاعات مختلف و ایجاد وضوح چندگانه است که ضمن کاهش پیچیدگی محیط بدون تأثیر منفی بر وضوح تصویر با ویژگی‌های سطح زمین و موقعیت موانع و اهداف سازگار باشد. به عبارتی، ساختار داده مثلث‌بندی باید قابلیت استخراج اطلاعات با دقت متغیر را فراهم کند، به طوری که بتوان از ارتفاعات مختلف، تصاویر با وضوح متفاوت را ذخیره کرد. به منظور شبیه‌سازی محیط، در مرحله اول به ساده‌سازی نیاز است. الگوریتم‌ها را در بالاترین سطح با توجه به کلاس سطوحی که روی آن‌ها کار می‌کنند به سه دسته زمینه‌های ارتفاع و سطوح پارامتریک، سطوح منیفولد و سطوح غیر منیفولد طبقه‌بندی می-کنند. در زیر کلاس‌ها، روش‌ها براساس پیچیدگی‌های محاسباتی و زمانی فهرست می-شوند.

۴-۱- سطوح دو بعدی پارامتریک

این طبقه، ساده‌ترین کلاس سطوح هستند. روش‌ها در این دسته، به شش کلاس تقسیم می‌شوند و در ادامه معرفی می شوند.

روش‌های مثلث‌بندی: روش‌های ساده‌سازی سطح چند ضلعی از مثلث‌ها به عنوان عناصر

تقریبی در ساخت یک سطح استفاده می‌کنند. محبوب‌ترین روش مثلث‌بندی که از ارتفاع استفاده نمی‌کند، مثلثبندی دلانی[1] است [۱۶۱].

روش‌های شبکه منظم: ساده‌ترین تکنیک‌ها هستند که از شبکه‌ای از سلول‌های منظم و مساوی تشکیل شده‌اند. شبکه‌های منظم به عنوان شبکه‌های یکنواخت نیز شناخته می‌شوند [۱۶۲].

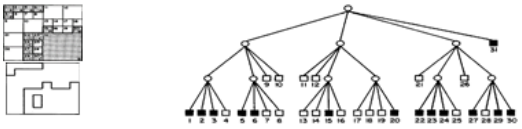
روش‌های مثلث‌بندی سلسله مراتبی: روش‌های مثلث‌بندی سلسله‌مراتبی با تقسیم‌بندی بازگشتی، یک مثلث‌بندی می‌سازند. تفاوت این مثلث‌بندی با دیگر الگوریتم‌های مثلث‌بندی عمومی، در آن است که الگوی سلسله مراتبی، درختی را تشکیل می‌دهد که هر گره آن بیش از یک والد ندارد اما در سایر روش‌ها ممکن است چندین والد داشته باشد [۱۶۳].

روش‌های مبتنی بر ویژگی: در این رویکرد، مجموعه‌ای از نقاط ورودی دریافت و براساس اهمیت، آن‌ها را رتبه‌بندی می‌کنند. رتبه‌بندی برای انتخاب مهم‌ترین نقاط به عنوان مجموعه رئوس و ساختن مثلثی از این نقاط است [۱۶۴].

روش‌های اصلاح: روش‌های پالایش الگوریتم‌های چندگذری[2] هستند که با حداقل تقریب اولیه شروع می‌شوند، در هر گذر یک یا چند نقطه را به‌عنوان راس در مثلث‌بندی وارد می‌کنند و تا رسیدن به خطای مورد نظر تکرار می‌شوند. برای داده‌های ورودی در یک شبکه مستطیلی، حداقل تقریب دو مثلث است. برای توپولوژی‌های دیگر، تقریب اولیه ممکن است پیچیده‌تر باشد. روش‌های افزایشی معمولاً برای حفظ مثلث بندی در حین انجام پالایش استفاده می‌شوند [۱۶۵].

روش‌های حذف: رویکرد حذف، برای ساده‌سازی سطح با کل مدل ورودی شروع می‌شود و به طور مکرر آن را ساده می‌کند و رئوس، مثلث‌ها یا سایر ویژگی‌های هندسی را در هر گذر حذف می‌کند [۱۶۶]. روش‌های تقسیم سلسله مراتبی سریع و ساده هستند و مدل سازی چندوضوحی را تسهیل می‌کنند. این روش‌ها دارای رویکردهایی مانند درخت چهارتایی و درخت k تایی هستند که مبتنی بر استراتژی تقسیم و غلبه هستند. این رویکردها به صورت بازگشتی سطح را به مناطق تقسیم می‌کنند و یک سلسله مراتب با ساختار درختی ایجاد می‌کنند. براساس پژوهش‌های انجام شده تاکنون، کارآمدترین نمایش از یک مثلث‌بندی، ساختار درخت چهارتایی[3] با یک معیار خطا است [۱۶۷] .این نمایش، اطلاعاتی که سلسله مراتب وضوح چندگانه را توصیف کند ذخیره نمی‌کند و فقط مقادیر ارتفاع و خطا را برای هر نقطه شبکه ذخیره می‌کند. مثلث‌بندی محیط اغلب براساس مثلث‌های دوبعدی دلانی برای ایجاد شبکه‌های نامنظم مثلثی است. هرم Delaunay یک توسعه چند وضوحی از TIN های مبتنی بر دلانی است که در آن گروه‌هایی از مثلث‌های متصل به صورت سلسله مراتبی با مجموعه‌هایی با مثلث‌های کمتر جایگزین می‌شوند. در [۱۸۵]، یک روش سلسله مراتبی درخت چهارتایی با تبدیل موجک دوبعدی برای ساده‌سازی زمین استفاده شده است. در این رویکرد، نقاط ارتفاع بر اساس اهمیت ضرایب موجک از شبکه حذف می‌شوند و مجموعه نقاط

درخت چهارتایی باقی‌مانده با استفاده از جداول جستجو به صورت محلی مثلث‌بندی می‌شوند و برای فشرده‌سازی تصویر نیز به کار گرفته شده‌اند (شکل۶). در ادامه رویکردهای ساختار درخت چهارتایی معرفی خواهند شد.



شکل۶. بلوک‌های یک تصویر و درخت چهارتایی مربوطه. بلوک‌های تصویر سایه دار و بلوک‌های پس زمینه خالی هستند

۴-۲- درخت چهارتایی محدودشده سلسله‌مراتبی

مثلث‌بندی تطبیقی درخت چهارتایی سطوح منیفولد برای اولین بار در [۱۶۵] ارائه شد و برای نمونه‌برداری و مثلث‌بندی تطبیقی استفاده شد. تقسیم درخت چهارتایی به صورت بازگشتی انجام می‌شود تا زمانی‌که برای هر منطقه نمونه‌برداری انجام شود. این روش دارای رویکردهای مختلفی است.

درخت چهارتایی محدود شده: برای جلوگیری از تقسیم‌های احتمالی در نمایش چند ضلعی یک درخت چهارتایی، هر ناحیه درخت چهارتایی را با توجه به اندازه نواحی مجاورش به گونه‌ای مثلث‌بندی کرد که هیچ شکافی ظاهر نشود به چنین مثلث‌بندی بدون ترک یا تطبیقی نیز گفته می‌شود. در این رویکرد برای مثلث‌بندی ابتدا نمونه‌برداری اولیه روی یک شبکه یکنواخت انجام می‌شود. سپس هر منطقه با توجه به برخی معیارهای پذیرش (خطای تقریب) ارزیابی می‌شود و این مراحل تا زمانی که نمونه‌گیری تطبیقی معیارهای پذیرش را در کل سطح برآورده کند تکرار می‌شود. در نهایت مثلث‌بندی و رندر کردن تمام مناطق درخت چهارتایی صورت می‌گیرد.

نقشه‌های مسطح درخت چهارتایی: در [۱۶۸] تکنیک درخت چهارتایی محدود برای داده‌های سطح ۲.۵ بعدی اعمال می‌شود. این نمایش خام رایج مدل‌های ارتفاعی محیط شبکه‌ای دیجیتال است. در [۱۶۵] علاوه بر توصیف اولیه درخت چهارتایی محدود شده، دو الگوریتم ساخت کارآمد را برای تولید و مثلث‌بندی یک درخت چهارتایی محدود از مجموعه‌ای از نقاط روی یک شبکه منظم ارائه می‌کند. یک روش از پایین به بالا و روش دیگر از بالا به پایین برای ایجاد سلسله مراتب چهار درخت محدود انجام می‌شود.

رندرینگ LoD پیوسته: یک رویکرد متفاوت برای تولید و مثلث‌بندی یک درخت چهارتایی محدود شده در [۱۶۶] بر اساس مفهوم همجوشی مثلث ارائه شده است. با شروع مثلث‌بندی کل مجموعه داده‌های محیط شبکه‌ای-دیجیتال، با ادغام متوالی مثلث ها از پایین به بالا ساده سازی می‌شود. ادغام مثلث در دو فاز انجام می‌شود .ابتدا، در یک گره اتمی، جفت‌های مثلث متساوی الساقین که یک لبه کوتاه مشترک دارند به هم می‌پیوندند و نقطه وسط لبه مرزی چهارگوش حذف می‌شود. در فاز دوم، راس مرکزی یک ناحیه چهارگانه با ادغام زوج‌های مثلث متساوی الساقین در امتداد مورب حذف می‌شود.

انطباق بهینه مش‌ها در زمان واقعی: این رویکرد بر اساس مفهوم سلسله مراتب مثلثی دوتایی است که به صورت بازگشتی مثلث‌ها را با شکافتن طولانی‌ترین لبه در راس پایه اصلاح می‌کند [۱۶۹].

شبکه‌های نامنظم مثلثی راست: این شبکه‌ها یک چارچوب مثلث‌بندی چند تفکیک‌پذیری برای

مثلث‌بندی درخت چهارتایی محدود است که بر اساس سلسله‌مراتب درختی مثلثی است [۱۷۰]. این رویکرد بر نمایش کارآمد سلسله مراتبی مثلث باینری و پیمایش سریع مش برای همسایه‌یابی متمرکز است و با شروع از یک مربع مثلث شده، مثلث‌ها را به صورت بازگشتی در راس پایه یا نقطه میانی طولانی‌ترین لبه تقسیم می‌کنند. تقسیم در بدترین حالت در زمان $O(\log n)$ خاتمه می‌یابد، با n که اندازه سلسله مراتب درخت مثلثی است.

مثلث‌بندی درخت چهارتایی محدود: رویکرد مثلث‌بندی درخت چهارتایی محدود ارائه شده در [۱۷۱] بر روی تجسم زمین در زمان واقعی در مقیاس بزرگ متمرکز است. روش مثلث‌بندی بر اساس سلسله مراتب درخت چهارتایی مانند [۱۶۸] است و از رابطه وابستگی ارائه شده در [۱۶۶] برای تولید مثلث‌های درخت چهارتایی با حداقل تطابق استفاده می‌کند. دو الگوریتم مثلث‌بندی بالا به پایین و پایین به بالا به صورت شبه‌کد برای یک میدان ارتفاعی و جایی که هر رأس دارای یک خطای تقریبی مرتبط با آن است ارائه شده‌اند.

فشرده‌سازی با وضوح چندگانه: در [۱۶۹]، مثلث‌بندی‌های درخت چهارتایی محدود یا مثلثی راست با توجه به ذخیره‌سازی و پردازش کارآمد داده، روش‌های جستجو و دسترسی و فشرده‌سازی داده‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد. پیشنهاد شده است که داده‌ها همیشه به صورت فشرده مدیریت شوند، حتی پردازش تعاملی، بر روی داده‌های فشرده انجام می‌شود. در چارچوب مثلث‌بندی چند تفکیک‌پذیری از رویکرد سلسله‌مراتبی مثلثی استفاده می‌شود.

۵- تحلیل انتقادی و پیشنهادات آتی

هدف از این بخش، ارائه یک تحلیل انتقادی از مهم ترین رویکردهای موجود برنامه ریزی مسیر برای پهپادها، و بحث در مورد شکاف‌ها و نقاط ضعف تحقیقاتی آن‌ها است که مسیر تحقیقات آینده را در این موضوع نشان می‌دهد.

نکته حائز اهمیت آن است که این مقاله تنها به روش‌های ارائه شده با کاربرد گسترده توجه می‌کند و اشاره کوتاهی به سایر روش‌های مرسوم دارد. به منظور انجام یک بررسی جامع از برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی پهپادها این مقاله تعداد زیادی از الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر موجود را که با موفقیت در محیط های سه بعدی پیاده سازی شده اند، تحلیل می‌کند و با ذکر چالش‌های محیط سه‌بعدی، به ارائه راه‌حل‌های کارامد و بهینه جهت پیاده‌سازی الگوریتم‌های مذکور می‌پردازد.

هم‌چنین برای اولین بار به تفصیل به تاثیر مبحث ساختار داده در برنامه‌ریزی مسیر پهپاد و مدلسازی محیط پرداخته خواهد شد. سپس با دسته‌بندی کاربردهای پهپادها به ارائه الگوریتم-های پیشنهادی مناسب آن کاربرد می‌پردازیم و در نهایت، الگوریتم‌های پیشنهادی در هردسته را به عنوان راه‌حلی در جهت رفع چالش‌های معرفی شده در بخش‌های ابتدایی مقاله معرفی خواهیم کرد.

۵-۱- مزایا و معایب رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر

این مقاله الگوریتم های برنامه ریزی مسیر پوششی سه بعدی را به دو دسته مبتنی بر نمونه-برداری و هوش مصنوعی تقسیم می کند و آن‌ها را براساس قابلیت‌هایی مانند سادگی طراحی،

برنامه‌ریزی آنلاین، برنامریـزی بهینـه سراسـری و غیره از یکدیگر متمایز می‌کند.

رویکردهای مبتنی بر نمونه‌بـرداری، محـیط را به مجموعه‌ای ازسلول‌ها تقسیم می‌کنند به همین دلیل اجرای ایـن نـوع تکنیـک‌هـا آسـان اسـت و ساختار ساده ای دارد. بنابراین آنها بـرای شـرایط برنامه ریزی ایستا و آنلاین مناسب هسـتند. روش تجزیه دقیق نیاز به اطلاعات از پیش تعریف شـده نسبتا کاملی دارد لذا مناسب محیط‌هـای ایسـتا و آفلاین اسـت. هرچـه اطلاعـات اولیـه نسـبت بـه محیط بیشـتر باشـد چـالش‌هـای کمتـری بـرای برنامه‌ریزی مسیر وجود دارد. بنابراین بدیهی است که تعداد قابل توجهی از مقالات به دنبـال برنامـه ریزی مسیر با روش تجزیـه دقیـق هسـتند کـه از این رویکرد پیروی می‌کند. اما اتکای بیش از حـد به محیط های از پیش تعریف شـده، مشـکلاتی را در رابطه با مقیاس پذیری راه حـل هـای موجـود برای محیط‌های پیچیـده تـر ایجـاد مـی کنـد. از طرفی، در دنیای واقعی و در لحظه شروع برنامـه-ریزی مسیر، اطلاعات کاملی از محیط در دسترس نیست. به همین دلیل، نویسندگان زیـادی تمایـل خود را برای گسـترش بیشـتر تحقیقـات خـود، از طریق گسترش راه حل مبتنی بر محیط شـناخته شده به سمت محیط‌هـای پویـا و ناشـناخته ابـراز کردند. بنـابرابن تمرکـز ایـن پـژوهش در بررسـی روش‌های تجزیـه غیردقیـق بـوده اسـت. جاییکـه اطلاعات ناقص از محیط وجود دارد و بـا جسـتجو در محیط، به سطح دانش عامـل جسـتجو اضـافه خواهد شد.

الگوریتم‌های تجزیه نیمه‌دقیـق، محـیط را بـه مجموعه‌ای متفاوت از سلول‌ها تقسیم می‌کنند که می‌تواند فاصله بین مرکز سـلول‌هـا را محاسـبه و سپس در فاز جستجو با استفاده از الگـوریتم‌هـای بهینه برنامه‌ریزی مسیر، سلول‌ها را در فضای کـار توزیع کنند. این نوع روش‌ها را می‌توان بـا روش-هـای دیگـر بـرای دسـتیابی بـه بهینـه سراسـری ترکیب کرد و برای کار آنلاین مورد اسـتفاده قـرار داد. هدف الگوریتم‌هـای مبتنـی بـر عـدم تجزیـه انجام ماموریت با یک پهاد در محیط‌های مـنظم و ساده است که نیاز به تجزیه محیط وجود نـدارد و الگوهای هندسی ساده برای کاوش کافی است.

این روش نیز مناسب محیط ایستا و آفلاین اسـت که پیش‌تر در خصـوص چـالش‌هـای آن صـحبت شـد. رویکردهـای هـوش مصـنوعی، روش‌هـای اکتشـافی هسـتند و مـی‌تواننـد بـه خـوبی بـا محدودیت‌های پیچیده بدون سـاختار و همچنـین سایر مسائل NP مقابله کنند. این نوع الگوریتم‌هـا مسیر را با جهـش بهینـه مـی‌کننـد، امـا فرآینـد جهش به زمان تکرار طولانی نیاز دارد.(جدول ۸).

جدول ۸. معرفی چالش‌ها و رویکردهای متناسب با آن‌ها

	چالش	رویکردهای پیشنهادی	الگوریتم‌های پیشنهادی
c_1	توپولوژی	رویکرد نیمه دقیق	ژنتیک، آتاماتای سلولی، پیاده‌روی تصادفی، جستجوس بلادرنگ، مبتنی بر فرمون
c_2	مسیریابی و برنامه‌ریزی حرکت	رویکرد دقیق، عدم تجزیه	اولویت محلی، تشکیل خط، مارپیچی، رفت و برگشت
c_3	خودمختاری	رویکرد نیمه دقیق	ژنتیک، آتاماتای سلولی، پیاده‌روی تصادفی، جستجوس بلادرنگ، مبتنی بر فرمون
c_4	مصرف انرژی	رویکرد دقیق، عدم تجزیه	اولویت محلی، تشکیل خط، مارپیچی، رفت و برگشت
c_5	تحرک	رویکرد نیمه دقیق،	ژنتیک، آتاماتای سلولی، پیاده‌روی تصادفی، جستجوس بلادرنگ، مبتنی بر فرمون
c_6	پوشش قطعی	رویکرد دقیق، عدم تجزیه	اولویت محلی، تشکیل خط، مارپیچی، رفت و برگشت
c_7	آنلاین بودن	رویکرد نیمه دقیق، غیردقیق	ژنتیک، آتاماتای سلولی، پیاده‌روی تصادفی، جستجوس بلادرنگ، مبتنی بر فرمون
c_8	راه‌حل متمرکز	رویکرد دقیق، عدم تجزیه	اولویت محلی، تشکیل خط، مارپیچی، رفت و برگشت

۵-۲- استراتژی‌های غالب در برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی مبتنی بر ساختار داده

محدودیت‌های موجود در پهپادها از جمله برخورد با وسایل نقلیه هوایی که در فضای سه بعدی به صورت پویا و معلق در حرکت هستند، ویژگی‌های فیزیکی پهپادها، استقامت، محدودیت‌های مانور، محدودیت‌های حمل بار، شرایط خارجی محیط و غیره باعث سخت شدن طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر موجود می‌شود.

به دلیل پیشرفت گسترده کاربردهای پهپادهای بدون سرنشین در حوزه‌های مختلف ممکن است الگوریتم‌های قبلی کارایی خود را ازدست داده یا مطلوب نباشند. بنابراین، تکنیک‌های برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی برای محاصره و کاوش پهپادها با اشیای پیچیده و در یک محیط پیچیده مورد نیاز هستند.

درنتیجه یکی دیگر از مسائل چالش‌انگیز مدلسازی محیط به صورت سه‌بعدی است. با توجه به اینکه محیط واقعی پرواز پهپاد در فضای سه‌بعدی است و از طرفی اکثر پیشنهادات موجود در ادبیات فقط به برنامه ریزی مسیر در یک محیط دو بعدی می پردازند، تمرکز این پژوهش به طور سیستماتیک به بررسی راه‌حل‌های ارائه شده در فضای سه‌بعدی است. باتوجه به مقالات بررسی شده از یک سو درنظرگرفتن بُعد سوم اجتناب ناپذیر است و از سوی دیگر برنامه‌ریزی محیط در فضای سه‌بعدی سربار محاسباتی بالایی خواهد داشت. شبیه‌سازی محیط پرواز در مقیاس بزرگ سه بعدی، چالش‌هایی را برای حفظ کارایی به همراه خواهد داشت. برای بهبود عملکرد الگوریتم، پیچیدگی مدلسازی محیط باید تا حد امکان کاهش یابد بدون اینکه وضوح تصویر تضعیف شود.

ساده‌سازی هندسی باید با یک آستانه خطای تقریبی کنترل شود. علاوه بر این، بخش‌های مختلف محیط را می‌توان در سطوح مختلف جزئیات[1] رندر کرد به این معنی که بعد از مدلسازی و ساده‌سازی، تصویر را برای نمایش آماده کرد تا عملکرد را افزایش دهد. بیشتر روش‌های ارائه شده جهت پیش‌پردازش و مدلسازی تاکنون، محیط را به صورت مسطح و ساده مدل‌سازی کرده‌اند[۱۷۲]. این ساده‌سازی برای کاربردهایی مانند تمیز کردن کف، تشخیص مین‌های زمینی، چمن‌زنی و غیره معتبر است اما در کاربردهای نظارتی مانند بازرسی زیرساخت‌ها که فاز جستجوی مسیر اهمیت بیشتری دارد، پرواز پهپاد در فضای سه‌بعدی است. بنابراین روش‌های برنامه‌ریزی ساده مسیر دو بعدی قادر به یافتن موانع و مقایسه با محیط سه‌بعدی نیستند و نیازمند الگوریتم‌های خاص فضای سه‌بعدی است که عدم قطعیت‌های دنیای واقعی در نظر گرفته شود بنابراین فضای پیوسته دنیای واقعی باید گسسته شود. رای نمایش داده‌های ورودی دیجیتال در نمایش شبکه‌ای مانند داده‌های به دست آمده از ارتفاعات مختلف زمین که در قالب یک مدل با وضوح چندگانه هستند و گسسته‌سازی فضا استفاده از ساختارهای داده سلسله مراتبی مانند مثلث‌بندی چند وضوحی مبتنی بر چهاردرخت کارآمدترین هستند.

برای کاهش پیچیدگی مدلسازی محیط بدون تأثیر منفی بر وضوح تصویر، مثلث‌بندی باید با ویژگی‌های سطح زمین و موقعیت موانع و اهداف

سازگار باشد به نحوی که مثلث‌بندی برای سطوح صاف و بدون مانع متفاوت از سطوح غیرمسطح باشد. علاوه بر این، ساختار داده مثلث‌بندی باید قابلیت استخراج اطلاعات با دقت متغیر را فراهم کند، به طوری که بتوان از چندین سطح مختلف جزئیات در زمان اجرا پشتیبانی کند. کارآمدترین نمایش از یک مثلث‌بندی، ساختار درخت چهارتایی ضمنی با یک معیار خطا است. این نمایش نیازی به ذخیره اطلاعاتی که سلسله مراتب وضوح چندگانه را توصیف کند ندارد و فقط به مقادیر ارتفاع و خطا برای هر نقطه شبکه نیاز دارد.

۵-۳- الگوریتم‌های پیشنهادی برای غلبه بر چالش‌ها

براساس پژوهش‌های بررسی‌شده مسئله برنامه-ریزی مسیر در فاز مدلسازی محیط دارای چالش-هایی نظیر میزان پوشش، مقیاس‌پذیری و تحمل خرابی و در فاز جستجوی مسیر دارای چالش-هایی مانند طول مسیر، جلوگیری از تصادم و انرژی مصرفی است.

براساس نتایج مشاهده شده در مقالات مختلف به نظر می‌رسد معیار جلوگیری از تصادم و طول مسیر علی‌رغم تاثیرگذاری شایانی که در برنامه‌ریزی مسیر دارند کمتر مورد توجه قرار گرفته شده‌اند. هم‌چنین تابه‌حال ساختار داده مناسبی خاص کاربردهای پهپادی ارائه نشده است. لذا باتوجه به اینکه استفاده از الگوریتم‌های سلبندی مثلثی از نظر میزان پوشش و مقیاس‌پذیری کارایی بالاتری دارند پیشنهاد می‌شود در فاز مدلسازی از این دسته از الگوریتم‌ها به همراه یک ساختار داده سلسله‌مراتبی استفاده شود. هم‌چنین پیشنهاد می‌شود در فاز جستجوی مسیر، از الگوریتم‌های هوش مصنوعی مبتنی بر ارتفاع به منظور برآورد اهداف بهینه استفاده شود.

۵-۴- شکاف‌های تحقیقاتی و پیشنهادات آتی

همانطور که بیان شد رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر براساس قابلیت‌های ذاتی خود بررسی شده و متناسب با فضای مسئله مورد ارزیابی قرار گرفتند. براین اساس، رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر غیر دقیق به‌عنوان پرکاربردترین رویکرد برنامه‌ریزی مسیر معرفی شد. با این حال شرایطی مانند ابعاد محیط و موانع، ایستا یا پویا بودن موانع و به طور کلی پویا بودن محیط همچنان در سطح کیفیت مسیر تاثیر گذار هستند.

بسیاری از مقالات آنالیز شده در روش تجزیه نیمه دقیق، یا به طور کلی موانع دینامیکی را نادیده گرفتند یا فقط موانع ایستا را در نظر می گیرند. با اینحال همانطور که بیان شد تمرکز این پژوهش به تحلیل این دسته از مقالات ختم نشد به گونه ای که پژوهش‌های بررسی شده پیشرفت مثبت به سمت برنامه‌ریزی محیطی پویا در آینده را نشان می‌دهد. نکته حائز اهیمت آن است که عدم دانش کافی از محیط می‌تواند مشکلات دیگری مانند تصادم، افزایش تعداد دفعات بازدید از مسیر را به وجود آورد که نه تنها به سربار محاسباتی ناشی از پردازش اطلاعات ناقص اضافه خواهد کرد بلکه کمک چندانی به بهبود کیفیت مسیر نیز نخواهد کرد. بنابراین، یک الگوریتم برنامه‌ریزی مناسب برای اینکه بتواند در دنیای واقعی مورد استفاده قرار گیرد و بر چالش‌های حین پیاده‌سازی غلبه کند باید حتی الامکان وابستگی خود را از محیط و موانع شناخته شده و ایستا کاهش دهد تابتواند در محیط‌های عملیاتی

و پویا تصمیم‌گیری درستی انجام دهد. هم‌چنین قابلیت تعمیم و توسعه در فضای سه‌بعدی را داشته باشد.

افزایش توانایی درک مسئله و طراحی محیط پویا و سه‌بعدی برای انجام عملیات ایمن و قابل اعتماد با در نظرگرفتن سربار محاسباتی قابل قبول پهپاد بسیار حائز اهمیت است. تحقیقات آینده باید بر توسعه الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیری تأکید کند که بتوانند به صورت آنلاین محیط پویا را شناسایی کرده و از موانع موجود در آن اجتناب کند. هم‌چنین با استفاده از پتانسیل شبکه‌ی پهپاد، ضمن حفظ سادگی قابلیت مقیاس‌پذیری را افزایش دهد. بنابراین در این شرایط انتخاب پارامترهای اصلی برای تعیین کیفیت مسیر یک چالش است. پیشنهاد ما آن است که تصمیم‌گیری در خصوص میزان تاثیرگذاری پارامترهای محیطی وابسته به زمینه کاربرد پهپاد و میزان آگاهی از وضعیت محیط باشد.

حالت اول: در کاربردهای غیر حیاتی و در حالتی که اطلاعات مشخص و نه لزوما کاملی از محیط وجود دارد طراحی مسیر آفلاین و اصلاح مسیر مبتنی بر بازخورد آنلاین از محیط می‌تواند یک راه‌حل خوب باشد. داشتن اطلاعات از پیش تعریف شده، روش‌های جستجوی مسیر را قادر می‌سازد تا پوشش و دقت نتایج را در سطح سراسری بهتر کند و باعث ایجاد نتایج با کیفیت بالا و مسیرهای هموارتر شود. با این حال همانطور که گفته شد، بیشتر رویکردهای جستجوی مسیر موجود، آفلاین هستند و مسیرهای محاسبه شده را بر اساس بازخورد آنلاین به روز نمی‌کنند. بنابراین، با توجه به قدرت محاسباتی فعلی واحدهای پردازش، اصلاح طراحی مسیر سراسری و به روز رسانی آنها به صورت محلی بر اساس بازخورد حاصل از اطلاعات به دست آمده به صورت آنلاین می تواند یک ایده بسیار جالب برای تحقیقات آینده باشد.

ضمن اینکه طراحی ساختار داده مناسب، جهت کاهش حجم داده تبادل شده در حافظه و تسهیل پردازش اطلاعات کمک بزرگی به تحقق این ایده خواهد کرد. امروزه، با وجود فناوری‌های بسیار سریع انتقال داده مانند G5 و پردازش مبتنی بر ابر، تسریع در انتقال داده‌ها و پردازش آن‌ها دور از ذهن نیست. این ایده همچنین می‌تواند شکاف بین دو فاز مدلسازی و جستجوی مسیر را که مستلزم دو بار بازدید از یک سلول است، کاهش دهد. این رویکرد توسعه‌ای مطلوب از تکنیک تجزیه غیردقیق مبتنی بر رویکرد نمونه‌برداری است.

حالت دوم: در حالتی که اطلاعات دقیقی از محیط و موانع وجود ندارد یکی از راه‌حل‌های بهینه، نمونه‌گیری از یک قسمت کوچک محیط و طراحی یک الگوریتم مقیاس‌پذیر با درصد خطای پایین برای شبیه‌سازی کل محیط است. برنامه‌ریزی مسیر در یک محیط پیچیده و در یک مقیاس بزرگ عمدتا سخت و دشوار است و حتی با فرض طراحی مسیری برای این محیط، پیاده‌سازی و انجام آزمایشات مکرر در مرحله نهایی هزینه‌بر خواهد بود. لذا طراحی الگوریتم‌های مقیاس‌پذیر می‌تواند یکی از ایده‌های قابل توجه برای محققان و توسعه‌دهندگان در این زمینه باشد. الگوریتم‌های مقیاس‌پذیر مبتنی بر روش‌های نمونه‌گیری محاسباتی می‌توانند به طور هوشمندانه مجموعه کوچکی از محیط را به عنوان یک نمونه و براساس معیارهای از پیش طراحی شده‌ای انتخاب کنند. سپس شبیه‌سازی هایی را

در این نمونه‌ها اجرا کنند تا یک نگاشت سفارشی با سربار محاسباتی کاهش یافته تولید شود به گونه‌ای که ویژگی‌های خروجی نگاشت اصلی را حفظ کند. در این رویکرد، انتخاب معیارهای مناسب جهت انتخاب یک مجموعه بهینه یک چالش محسوب می‌شود و نیازمند انجام محاسبات و ازمایشات دقیق بر روی نمونه‌ها است. یک پیشنهاد جدید جهت رفع این چالش، استفاده از رویکرد سلسله مراتبی برای گرفتن نمونه‌ها از محیط است. بر طبق این رویکرد می‌توان اندازه، کیفیت و تعداد نمونه‌ها را در یک ساختار سلسله مراتبی به گونه‌ای تنظیم کرد که بهترین پوشش به دست آید.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش‌های پیشین، دسته‌بندی‌های مختلفی برای برنامه‌ریزی مسیر ارائه شده است که یک نمای کلی از الگوریتم‌های موجود در این زمینه را نشان می‌دهد در حالی‌که عمده الگوریتم‌های معرفی شده مناسب محیط ایستا و شناخته شده هستند و برای استفاده در دنیای واقعی غیرممکن یا نیازمند توسعه و تغییر زیاد در ساختار اصلی هستند. هم‌چنین در سایر پژوهش‌ها توجه کمتری به فاز پیاده‌سازی و چالش‌هایی که به همراه دارد شده است.

بنابراین دو طبقه‌بندی جامع و جدید از رویکردهای کاربردی و تکنیک‌های نمایشی برنامه‌ریزی مسیر مبتنی بر ساختار داده الگوریتم-ها، خصوصیات محیط و پارامترهای بهینه در دنیای واقعی معرفی می‌کند. دسته اول، طبقه-بندی رویکردهای تجزیه نیمه‌دقیق به عنوان کاربردی‌ترین روش تجزیه را همراه با ساختار داده رویکردهای مذکور به تفکیک فازها نشان می‌دهد.

دسته دوم رویکردهای برنامه‌ریزی مسیر بر اساس تکنیک‌های نمایشی در فضای سه‌بعدی را نشان می‌دهد. علاوه براین، یک تحلیل انتقادی از رویکردهای کلیدی تاثیرگذار براساس میزان اهمیت در کیفیت مسیر و توجه پژوهشگران ارائه و محدودیت‌ها و شکاف‌های تحقیقاتی اصلی آن‌ها را برجسته می‌کند. در عین حال مهم‌ترین پیشنهادات کارهای آینده را برای محققین فراهم خواهد آورد. نتایج مطالعات، تمایل واضح پژوهشگران به استفاده از رویکرد تجزیه سلولی نیمه‌دقیق به عنوان راه‌حلی در بهبود برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

۷- منابع

[1]. K. Daniel and C. Wietfeld, “Using public network infrastructures for UAV remote sensing in civilian security operations,” Homeland Security Affairs Journal (HSAJ), 2011.

[2]. T. Kopfstedt, M. Mukai, M. Fujita, and C. Ament, “Control of formations of UAVs for surveillance and reconnaissance missions,” IFAC Proc. Volumes, vol. 41, no. 2, pp. 5161–5166, 2008.

[3]. D. Bein, W. Bein, A. Karki, and B. B. Madan, “Optimizing border patrol operations using unmanned aerial vehicles,” in Proc. 12th Int. Conf. Inf. Technol.-Generations, pp. 479–484, 2015.

[4]. F. Jian and A. L. Swindlehurst, “Dynamic UAV relay positioning for the ground-to-air uplink,” in Proc. IEEE Globecom Workshops, pp. 1766–1770, 2010.

[5]. C. Hua, R. Niu, B. Yu, X. Zheng, R. Bai, and S. Zhang, “A global path planning method for unmanned ground vehicles in off-road environments based on mobility prediction,” Machines, vol. 10, p. 375, 2022. doi: 10.3390/machines10050375.

[6]. C. Deng, S. Wang, Z. Huang, Z. Tan, and J. Liu, “Unmanned aerial vehicles for power line inspection: A cooperative way in platforms and communications,” J. Commun., vol. 9, pp. 687–692, 2014.

[7]. H, mazaheri, S. goli and A. nourollah, Path planning of colleague UAVs based on combined GWO-NSGA-II and WOA algorithm. Journal of Information and Communication Technology in Policing, ,

navigation and control techniques," J. Intell. Robot. Syst., vol. 80, pp. 87–138, 2015.
[20]. D. McFerran and M. Swider, "The Best Drone 2018: DJI, Parrot and More for Beginners and Pros," TechRadar, 2018. [Online]. Available: https://www.techradar.com/news/best-drones.
[21]. E. Galceran and M. Carreras, "A survey on coverage path planning for robotics," Robot. Auton. Syst., vol. 61, pp. 1258–1276, 2013.
[22]. Z. Huang et al., "Communication-Topology Preserving Motion Planning: Enabling Static Routing in UAV Networks," ACM Trans. Sensor Netw., vol. 20, no. 1, pp. 1–39, 2023.
[23]. I. Erturk and I. Chmielewski, "Improving Drone Data Gathering WSN Application Performance with a Predefined p-based Approach for Slotted p-Persistent CSMA MAC," in Proc. Int. Conf. Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Prague, Czech Republic, pp. 1–5, 2022.
[24]. S. Haas, M. N. Alam, and Z. J., "Coverage and connectivity in three-dimensional networks," in Proc. MOBICOM, pp. 346–357, 2006.
[25]. A. Ghosh, "Estimating coverage holes and enhancing coverage in mixed sensor networks," in Proc. 29th Annu. IEEE Int. Conf. Local Computer Networks, 2004, pp. 68–76.
[26]. A. Ghosh and S. K. Das, "A Distributed Greedy Algorithm for Connected Sensor Cover in Dense Sensor Networks," in Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS 2005), LNCS, vol. 3560, Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. doi: 10.1007/11502593_26.
[27]. G. Wang, G. Cao, and T. F. La Porta, "Movement-assisted sensor deployment," IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 5, no. 6, pp. 640–652, 2006.
[28]. J. Giesbrecht, "Global path planning for unmanned ground vehicles," Tech. Rep., Defence Research and Development Suffield (Alberta), 2004.
[29]. H. Hwang, A. Majeed, and S. Oun, "Recent Developments in Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles," in Motion Planning, 2021.
[30]. Y. Gong, K. Chen, T. Niu, et al., "Grid-based coverage path planning with NFZ avoidance for UAV using parallel self-adaptive ant colony optimization algorithm in cloud IoT," J. Cloud Comput., vol. 11, no. 29, 2022, doi: 10.1186/s13677-022-00298-2.
2025. doi: 10.22034/pitc.2025.1283146.1352
[8]. Y. Ye and A. M.-C. So, "On solving coverage problems in a wireless sensor network using Voronoi diagrams," in Proc. WINE, 2005, pp. 584–593.
[9]. B. Carbunar, A. Grama, J. Vitek, and O. Carbunar, "Coverage preserving redundancy elimination in sensor networks," in Proc. SECON, Oct. 2004, pp. 377–386.
[10]. X. Hu, B. Pang, F. Dai, and K. H. Low, "Risk Assessment Model for UAV Cost-Effective Path Planning in Urban Environments," IEEE Access, pp. 150162–150173, 2020.
[11]. C. H. Hugenholtz and K. Whitehead, "Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: A review of progress and challenges," J. Unmanned Veh. Syst., pp. 69–85, 2014.
[12]. Y. Wu, S. Wu, and X. Hu, "Cooperative Path Planning of UAVs & UGVs for a Persistent Surveillance Task in Urban Environments," IEEE Internet Things J., vol. 8, no. 6, pp. 4906–4919, Mar. 2021, doi: 10.1109/JIOT.3030240.
[13]. T. Tang, S. Zhou, Z. Deng, H. Zou, and L. Lei, "Vehicle detection in aerial images based on region convolutional neural networks and hard negative example mining," Sensors, p. 336, 2017.
[14]. H. Shakhatreh, A. Khreishah, and B. Ji, "Providing wireless coverage to high-rise buildings using UAVs," Proc. IEEE Int. Conf. Communications (ICC), 2017.
[15]. C. Nattero, C. T. Recchiuto, A. Sgorbissa, and F. Wanderlingh, "Coverage Algorithms for Search and Rescue with UAV Drones," in Proc. Workshop of the XIII AIIA Symp. Artificial Intelligence*, 2014.
[16]. A. Valenzuela, K. Reinke, and S. Jones, "A new metric for the assessment of spatial resolution in satellite imagers," Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf., vol. 114, p. 103051, 2022, doi: 10.1016/j.jag.2022.103051.
[17]. C. Di Franco and G. Buttazzo, "Coverage path planning for UAVs photogrammetry with energy and resolution constraints," J. Intell. Robot. Syst., pp. 1–18, 2016.
[18]. M. Torres, D. A. Pelta, J. L. Verdegay, and J. C. Torres, "Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3D terrain reconstruction," Expert Syst. Appl., vol. 55, pp. 441–451, 2016.
[19]. J. Alvarenga, N. I. Vitzilaios, K. P. Valavanis, and M. J. Rutherford, "Survey of unmanned helicopter model-based

[43]. J. F. Araújo, P. B. Sujit, and J. B. Sousa, “Multiple UAV area decomposition and coverage,” in Proc. IEEE Symp. Comput. Intell. Secur. Def. Appl. (CISDA), pp. 30–37, 2013, doi: 10.1109/CISDA.6595424.
[44]. J. A. Sauter, R. Matthews, H. V. D. Parunak, and S. A. Brueckner, “Performance of Digital Pheromones for Swarming Vehicle Control,” in Proc. 4th Int. Joint Conf. Auton. Agents Multiagent Syst., pp. 903–910, 2005.
[45]. S. Koenig and R. G. Simmons, “Easy and Hard Testbeds for Real-Time Search Algorithms,” in Proc. AAAI/IAAI, vol. 1, pp. 279–285, 1996.
[46]. G. Cannata and A. Sgorbissa, “A minimalist algorithm for multi-robot continuous coverage,” IEEE Trans. Robot., vol. 27, pp. 297–312, 2011.
[47] A. Pirzadeh and W. Snyder, “A Unified Solution to Coverage and Search in Explored and Unexplored Terrains Using Indirect Control,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., 1990, pp. 2113–2119.
[48]. R. E. Korf, “Real-time heuristic search,” Artif. Intell., vol. 42, pp. 189–211, 1990.
[49]. W. Wang, J. Zhao, Z. Li, and J. Huang, “Smooth Path Planning of Mobile Robot Based on Improved Ant Colony Algorithm,” J. Robot., 2021, pp. 1–10, doi: 10.1155/2021/4109821.
[50]. D. Albani, D. Nardi, and V. Trianni, “Field coverage and weed mapping by UAV swarms,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS), 2017, pp. 4319–4325, doi: 10.1109/IROS.2017.8206296.
[51]. R. Shivgan and Z. Dong, “Energy-Efficient Drone Coverage Path Planning using Genetic Algorithm,” in Proc. HPSR, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1109/HPSR48589.2020.9098989.
[52]. J. Valente, D. Sanz, J. Del Cerro, A. Barrientos, and M. Á. de Frutos, “Near-optimal coverage trajectories for image mosaicing using a mini quad-rotor over irregular-shaped fields,” Precis. Agric., vol. 14, pp. 115–132, 2013.
[53]. L. Nam, L. Huang, X. Li, and J. Xu, “An approach for coverage path planning for UAVs,” in Proc. AMC, pp. 411–416, 2016, doi: 10.1109/AMC.2016.7496385.
[54]. Y. Bouzid, Y. Bestaoui, and H. Siguerdidjane, “Quadrotor-UAV Optimal Coverage Path Planning in Cluttered Environment with A Limited Onboard Energy,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., pp. 979–984.
[55]. A. Barrientos et al., “Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach
[31]. Y. Dadi, Z. Lei, R. Rong, and X. Xiaofeng, “A new evolutionary algorithm for the shortest path planning on curved surface,” in Proc. 7th Int. Conf. Comput.-Aided Ind. Des. Concept. Des., 2006, pp. 1–4.
[32]. H. Choset, E. Acar, A. A. Rizzi, and J. Luntz, “Exact cellular decompositions in terms of critical points of Morse functions,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), 2000, pp. 2270–2277.
[33]. Y. Stergiopoulos, M. Thanou, and A. Tzes, “Distributed collaborative coverage-control schemes for non-convex domains,” IEEE Trans. Autom. Control, vol. 60, no. 9, pp. 2422–2427, 2015.
[34]. Y. S. Jiao, X. M. Wang, H. Chen, and Y. Li, “Research on the Coverage Path Planning of UAVs for Polygon Areas,” in Proc. 5th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl., 2010, pp. 1467–1472.
[35]. Y. Li, H. Chen, M. J. Er, and X. Wang, “Coverage path planning for UAVs based on enhanced exact cellular decomposition method,” Mechatron., vol. 21, pp. 876–885, 2011.
[36]. C. Levcopoulos and D. Krznaric, “Quasi-Greedy Triangulations Approximating the Minimum Weight Triangulation,” J. Algorithms, vol. 27, pp. 303–338, 1998.
[37]. W. H. Huang, “Optimal Line-sweep-based Decompositions for Coverage Algorithms,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom, vol. 1, pp. 27–32, 2001.
[38]. F. Balampanis, I. Maza, and A. Ollero, “Area Decomposition, Partition and Coverage with Multiple Remotely Piloted Aircraft Systems Operating in Coastal Regions,” in Proc. Int. Conf. Unmanned Aircraft Syst. (ICUAS), pp. 275–283, 2016.
[39]. F. Balampanis, I. Maza, and A. Ollero, “Coastal areas division and coverage with multiple UAVs for remote sensing,” Sensors, vol. 17, no. 808, 2017.
[40]. E. Gabriely and E. Rimon, “Spiral-STC: An on-line coverage algorithm of grid environments by a mobile robot,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp. 954–960, 2002.
[41]. P. Vincent and I. Rubin, “A Framework and Analysis for Cooperative Search Using UAV Swarms,” in Proc. AAMAS, Nicosia, Cyprus, 2004, pp. 79–86.
[42]. J. J. Acevedo, B. C. Arrue, I. Maza, and A. Ollero, “Cooperative large area surveillance with a team of aerial mobile robots for long endurance missions,” J. Intell. Robot. Syst., vol. 70, pp. 329–345, 2013.

path for 3D mapping of an area with structures using a multirotor," in Proc. ICUAS, 2016, pp. 905–910, doi: 10.1109/ICUAS.2016.7502538.
[68]. M. Darrah, M. Trujillo, K. Speransky, and M. Wathen, "Optimized 3D mapping of a large area with structures using multiple multirotors," in Proc. ICUAS, 2017, pp. 716–722, doi: 10.1109/ICUAS.2017.7991414.
[69]. S. Hayat, E. Yanmaz, T. X. Brown, and C. Bettstetter, "Multi-objective UAV path planning for search and rescue," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), 2017, pp. 5569–5574.
[70]. M. Rosalie et al., "Area exploration with a swarm of UAVs combining deterministic chaotic ant colony mobility with position MPC," in Proc. Int. Conf. Unmanned Aircraft Syst. (ICUAS), 2017, pp. 1392–1397, doi: 10.1109/ICUAS.2017.7991418.
[71]. C.-T. Cheng, K. Fallahi, H. Leung, and C. Tse, "Cooperative path planner for UAVs using ACO algorithm with Gaussian distribution functions," in Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. (ISCAS), 2009, pp. 173–176, doi: 10.1109/ISCAS.2009.5117713.
[72]. T.-S. Lee, J.-S. Choi, J. Lee, and B. Lee, "3-D Terrain Covering and Map Building Algorithm for an AUV," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS), 2009, pp. 4420–4425, doi: 10.1109/IROS.2009.5354768.
[73]. S. Paull, M. S. Gharah Bolagh, H. Seto, and H. Li, "Sensor driven online coverage planning for autonomous underwater vehicles," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS), 2012, pp. 2875–2880.
[74]. R. Zelinsky, A. Jarvis, J. Byrne, and S. Yuta, "Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robot," in Proc. Int. Conf. Adv. Robot., 1993, pp. 533–538.
[75]. C. Luo, S. Yang, X. Li, and M. Meng, "Neural Dynamics Driven Complete Area Coverage Navigation Through Cooperation of Multiple Mobile Robots," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 64, pp. 750–760, 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2609838.
[76]. Y. Stergiopoulos, M. Thanou, and A. Tzes, "Connectivity-aware coordination of robotic networks for area coverage optimization," in Proc. IEEE ICIT, 2012, pp. 31–35.
[77]. H. L. Andersen, "Path Planning for Search and Rescue Mission using Multicopters," Engineering, 2014.
to the area," J. Field Robot., vol. 28, pp. 667–689, 2011.
[56]. J. Valente, J. D. Cerro, A. Barrientos, and D. Sanz, "Aerial coverage optimization in precision agriculture management: A musical harmony inspired approach," Comput. Electron. Agric., vol. 99, pp. 153–159, 2013.
[57]. S. A. Sadat, J. Wawerla, and R. T. Vaughan, "Recursive Non-Uniform Coverage of Unknown Terrains for UAVs," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., pp. 1742–1747, 2014.
[58]. S. A. Sadat, J. Wawerla, and R. T. Vaughan, "Fractal Trajectories for Online Non-Uniform Aerial Coverage," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), pp. 2971–2976, 2015.
[59]. H. Mazaheri, S. Goli, and A. Nourollah, "Path planning in three-dimensional space based on butterfly optimization algorithm," Sci. Rep., vol. 14, no. 2332, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-52750-9.
[60]. D. Albani, D. Nardi, and V. Trianni, "Field coverage and weed mapping by UAV swarms," in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., pp. 4319–4325, 2017.
[61]. J. Zelenka and T. Kasanicky, "Insect Pheromone Strategy For The Robots Coordination – Reaction on Loss Communication," in Proc. IEEE CINTI, 2014, doi: 10.1109/CINTI.2014.7028653.
[62]. S. Lim and H. Bang, "Waypoint planning algorithm using cost functions for surveillance," Int. J. Aeronaut. Space Sci., vol. 11, pp. 136–144, 2010.
[63]. A. Khan, E. Yanmaz, and B. Rinner, "Information Merging in Multi-UAV Cooperative Search," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), 2014, pp. 3122–3129.
[64]. M. Popović, G. Hitz, J. Nieto, I. Sa, R. Siegwart, and E. Galceran, "Online Informative Path Planning for Active Classification Using UAVs," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), 2017, pp. 5753–5758.
[65]. M. Ramasamy and D. Ghose, "A Heuristic Learning Algorithm for Preferential Area Surveillance by Unmanned Aerial Vehicles," J. Intell. Robot. Syst., vol. 88, pp. 655–681, 2017, doi: 10.1007/s10846-017-0498-5.
[66]. M. Paradzik and G. İnce, "Multi-agent search strategy based on digital pheromones for UAVs," in Proc. 24th Signal Process. Commun. Appl. Conf. (SIU), 2016, pp. 233–236, doi: 10.1109/SIU.2016.7495720.
[67]. M. Trujillo, M. Darrah, K. Speransky, B. DeRoos, and M. Wathen, "Optimized flight

[78]. A. M.-C. So and Y. Ye, “On solving coverage problems in a wireless sensor network using Voronoi diagrams,” in Proc. WINE, 2005, pp. 584–593.
[79]. B. Carbunar, A. Grama, J. Vitek, and O. Carbunar, “Redundancy and coverage detection in sensor networks,” IEEE Trans. Sensor Netw., vol. 2, no. 1, pp. 94–128, Feb. 2006.
[80]. J. Jiang, Z. Song, H. Zhang, and W. Dou, “Voronoi-based improved algorithm for connected coverage problem in wireless sensor networks,” in Proc. EUC, 2005, pp. 224–233.
[81]. A. Boukerche and X. Fei, “A Voronoi approach for coverage protocols in wireless sensor networks,” in Proc. IEEE GLOBECOM, 2007, pp. 5190–5194.
[82]. S. M. N. Alam and Z. J. Haas, “Coverage and connectivity in three-dimensional networks with random node deployment,” Ad Hoc Netw., vol. 3, pp. 157–169, 2015, doi: 10.1016/j.adhoc.2014.09.008.
[83]. W. Li and W. Zhang, “Coverage analysis and active scheme of wireless sensor networks,” IET Wireless Sensor Syst., pp. 86–91, 2012.
[84]. J. Habibi, H. Mahboubi, and A. G. Aghdam, “A gradient-based coverage optimization strategy for mobile sensor networks,” IEEE Trans. Control Netw. Syst., vol. 4, pp. 477–488, 2017.
[85]. C. Qiu, H. Shen, and K. Chen, “An energy-efficient and distributed cooperation mechanism for k-coverage hole detection and healing in WSNs,” in Proc. IEEE 12th Int. Conf. Mobile Ad Hoc Sens. Syst., 2015, pp. 73–81.
[86]. F. Abbasi, A. Mesbahi, and J. M. Velni, “A new Voronoi-based blanket coverage control method for moving sensor networks,” IEEE Trans. Control Syst. Technol., 2017, doi: 10.1109/TCST.2017.2758344.
[87]. Sakai, Kazuya & Sun, Min-Te & Lai, Steve & Vasilakos, Athanasios. 2015. A Framework for The Optimal k-Coverage Deployment Patterns of Wireless Sensor Networks. IEEE Sensors Journal. 15. 1-1. 10.1109/JSEN.2015.2474711.
[88]. K. Sakai, M.-T. Sun, W.-S. Ku, T. H. Lai, and A. V. Vasilakos, “A framework for the optimal k-coverage deployment patterns of wireless sensors,” IEEE Sensors J., vol. 15, no. 12, pp. 7273–7283, 2015.
[89]. T. W. Sung and C. S. Yang, “Voronoi-based coverage improvement approach for wireless directional sensor networks,” J. Netw. Comput., pp. 202–213, 2014.
[90]. D. Dash and A. Dasgupta, “Distributed restoring of barrier coverage in wireless sensor networks using limited mobility sensors,” IET Wireless Sensor Syst., vol. 7, no. 6, pp. 198–207, Dec. 2017.
[91]. C. Yang and K.-W. Chin, “On nodes placement in energy harvesting wireless sensor networks for coverage and connectivity,” IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 13, no. 1, pp. 27–36, Feb. 2017.
[92]. W. Wei, Z. Sun, H. Song, H. Wang, and X. Fan, “Energy balance-based steerable arguments coverage method in WSNs,” IEEE Access, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2682845.
[93]. J. Yu, S. Wan, X. Cheng, and D. Yu, “Coverage contribution area based k-coverage for wireless sensor networks,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 66, no. 9, pp. 8510–8523, Sep. 2017.
[94]. X. Deng, Z. Tang, L. T. Yang, M. Lin, and B. Wang, “Confident information coverage hole healing in hybrid industrial wireless sensor networks,” IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 14, no. 5, pp. 2220–2229, 2018.
[95]. H. Mahboubi and A. G. Aghdam, “Distributed deployment algorithms for coverage improvement in a network of wireless mobile sensors: Relocation by virtual force,” IEEE Trans. Control Netw. Syst., vol. 4, no. 4, pp. 736–748, 2017.
[96]. A. Pananjady, V. K. Bagaria, and R. Vaze, “Optimally approximating the coverage lifetime of wireless sensor networks,” IEEE/ACM Trans. Netw., vol. 25, no. 1, pp. 98–111, 2017.
[97]. M. Shahidehpour and H. Wu, “Applications of wireless sensor networks for area coverage in microgrids,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 3, pp. 1590–1598, May 2018.
[98]. F. Samaniego, J. Sanchis, S. García-Nieto, and R. Simarro, “UAV motion planning and obstacle avoidance based on adaptive 3D cell decomposition: Continuous space vs discrete space,” in Proc. IEEE ETCM, 2017, pp. 1–6.
[99]. N. Mansard, A. DelPrete, M. Geisert, S. Tonneau, and O. Stasse, “Using a memory of motion to efficiently warm-start a nonlinear predictive controller,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), 2018, pp. 2986–2993.
[100]. D. Zhang, Y. Xu, and X. Yao, “An improved path planning algorithm for unmanned aerial vehicle based on RRT-connect,” in Proc. 37th Chinese Control Conf. (CCC), 2018, pp. 4854–4858.

Global Commun. Conf. (GLOBECOM), 2017, pp. 1–6.
[113]. B. Li, S. Patankar, B. Moridian, and N. Mahmoudian, “Planning large-scale search and rescue using team of UAVs and charging stations,” in Proc. Int. Symp. Safety, Security, and Rescue Robot. (SSRR), IEEE, 2018, pp. 1–8, doi: 10.1109/SSRR.2018.8468631.
[114]. S. Hayat, E. Yanmaz, T. X. Brown, and C. Bettstetter, “Multi-objective UAV path planning for search and rescue,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), IEEE, 2017, pp. 5569–5574.
[115]. V. Roberge and M. Tarbouchi, “Fast path planning for unmanned aerial vehicle using embedded GPU system,” in Proc. Int. Multi-Conf. Syst., Signals Devices (SSD), IEEE, 2017, pp. 145–150.
[116]. T. H. Pham, Y. Bestaoui, and S. Mammar, “Aerial robot coverage path planning approach with concave obstacles in precision agriculture,” in Proc. Workshop Res., Educ., Develop. Unmanned Aerial Syst. (RED-UAS), IEEE, 2017, pp. 43–48.
[117]. Z. Zhou et al., “When mobile crowd sensing meets UAV: Energy-efficient task assignment and route planning,” IEEE Trans. Commun., vol. 66, no. 11, pp. 5526–5538, 2018.
[118]. H. Sharma, T. Sebastian, and P. Balamuralidhar, “An efficient backtracking-based approach to turn-constrained path planning for aerial mobile robots,” in Proc. Eur. Conf. Mobile Robots (ECMR), IEEE, 2017, pp. 1–8.
[119]. D. Huang, D. Zhao, and L. Zhao, “A new method of the shortest path planning for unmanned aerial vehicles,” in Proc. Data-Driven Control and Learning Syst. (DDCLS), 6th, IEEE, 2017, pp. 599–605.
[120]. J. Scherer and B. Rinner, “Short and full horizon motion planning for persistent multi-UAV surveillance with energy and communication constraints,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS), IEEE, 2017, pp. 230–235.
[121]. P. Perazzo, F. B. Sorbelli, M. Conti, G. Dini, and C. M. Pinotti, “Drone path planning for secure positioning and secure position verification,” IEEE Trans. Mobile Comput., early access, 2017, pp. 1–1.
[122]. Y. Zhang, Z. Liu, Z. Yu, and Y. Qu, “Line-of-sight path following control on UAV with sideslip estimation and compensation,” in Proc. Chinese Control Conf. (CCC), IEEE, 2018, pp. 4711–4716.
[123]. D.-S. Jang, H.-J. Chae, and H.-L. Choi, “Optimal control-based UAV path planning with dynamically-constrained TSP with
[101]. N. Wen, L. Zhao, X. Su, and P. Ma, “UAV online path planning algorithm in a low altitude dangerous environment,” IEEE/CAA J. Autom. Sinica, vol. 2, no. 2, pp. 173–185, 2015.
[102]. Z. Shen, X. Cheng, S. Zhou, X.-M. Tang, and H. Wang, “A dynamic airspace planning framework with ADS-B tracks for manned and unmanned aircraft at low-altitude sharing airspace,” in Proc. Digit. Avionics Syst. Conf. (DASC), IEEE/AIAA, 2017, pp. 1–7.
[103]. Z. Yingkun, “Flight path planning of agriculture UAV based on improved artificial potential field method,” in Proc. Chinese Control Decis. Conf. (CCDC), IEEE, 2018, pp. 1526–1530.
[104]. A. Ait Saadi et al., “UAV Path Planning Using Optimization Approaches: A Survey,” Arch. Comput. Methods Eng., vol. 29, pp. 4233–4284, 2022.
[105]. J. da Silva Arantes et al., “Evaluating hardware platforms and path re-planning strategies for the UAV emergency landing problem,” in Proc. Int. Conf. Tools Artif. Intell. (ICTAI), IEEE, 2017, pp. 937–944.
[106]. J. Liu, X. Wang, B. Bai, and H. Dai, “Age-optimal trajectory planning for UAV-assisted data collection,” arXiv:1804.09356, 2018. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1804.09356
[107]. M. Kang et al., “An empirical study on robustness of UAV path planning algorithms considering position uncertainty,” in Proc. Int. Conf. Intell. Syst. Knowl. Eng. (ISKE), IEEE, 2017, pp. 1–6.
[108]. H. Li, Y. Chen, Z. Chen, and H. Wu, “Multi-UAV Cooperative 3D Coverage Path Planning Based on Asynchronous Ant Colony Optimization,” in Proc. Chinese Control Conf. (CCC), 2021, pp. 4255–4260.
[109]. T. Lozano-Pérez and M. A. Wesley, “An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles,” Commun. ACM, vol. 22, no. 10, pp. 560–570, 1979.
[110]. J. Wang, W.-B. Chen, and V. Temu, “Multi-vehicle motion planning for search and tracking,” in Proc. IEEE Conf. Multimedia Inf. Process. Retrieval (MIPR), IEEE, 2018, pp. 352–355.
[111]. S.-Y. Park, C. S. Shin, D. Jeong, and H. Lee, “DroneNetX: Network reconstruction through connectivity probing and relay deployment by multiple UAVs in ad hoc networks,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 67, no. 11, pp. 11192–11207, 2018.
[112]. Y. Pan et al., “Directional monitoring of multiple moving targets by multiple unmanned aerial vehicles,” in Proc. IEEE

environments," in Proc. IEEE Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics (AIM), IEEE, 2017, pp. 1627–1632.
[136]. X. Chen, G.-Y. Li, and X.-M. Chen, "Path planning and cooperative control for multiple UAVs based on consistency theory and Voronoi diagram," in Proc. Chinese Control Decis. Conf. (CCDC), IEEE, 2017, pp. 881–886.
[137]. T. Chen, G. Zhang, X. Hu, and J. Xiao, "Unmanned aerial vehicle route planning method based on a star algorithm," in Proc. IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. (ICIEA), IEEE, 2018, pp. 1510–1514.
[138]. S. Benders and S. Schopferer, "A line-graph path planner for performance constrained fixed-wing UAVs in wind fields," in Proc. Int. Conf. Unmanned Aircraft Syst. (ICUAS), IEEE, 2017, pp. 79–86.
[139]. Z. Lv, L. Yang, Y. He, Z. Liu, and Z. Han, "3D environment modeling with height dimension reduction and path planning for UAV," in Proc. Int. Conf. Model. Identif. Control (ICMIC), IEEE, 2017, pp. 734–739.
[140]. J. Li et al., "A hybrid path planning method in unmanned air/ground vehicle (UAV/UGV) cooperative systems," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 65, no. 12, pp. 9585–9596, 2016.
[141]. S. K. Gupta, P. Dutta, N. Rastogi, and S. Chaturvedi, "A control algorithm for cooperatively aerial survey by using multiple UAVs," in Proc. Recent Dev. Control, Autom. Power Eng. (RDCAPE), IEEE, 2017, pp. 280–285.
[142]. J. Kwak and Y. Sung, "Autonomous UAV flight control for GPS-based navigation," IEEE Access, vol. 6, pp. 37947–37955, 2018.
[143]. X. Sun, Y. Liu, W. Yao, and N. Qi, "Triple-stage path prediction algorithm for real-time mission planning of multi-UAV," Electron. Lett., vol. 51, no. 19, pp. 1490–1492, 2015.
[144]. C. Zhang, H. Liu, and Y. Tang, "Analysis for UAV heuristic tracking path planning based on target matching," in Proc. Int. Conf. Mech. Aerosp. Eng. (ICMAE), IEEE, 2018, pp. 34–39.
[145]. B. Y. Li et al., "On 3D autonomous delivery systems: Design and development," in Proc. Int. Conf. Adv. Robot. Intell. Syst. (ARIS), IEEE, 2017, pp. 1–6.
[146]. C. Zhang and X. Meng, "Spare A* search approach for UAV route planning," in Proc. Int. Conf. Unmanned Syst. (ICUS), neighborhoods," in Proc. Int. Conf. Control, Autom. Syst. (ICCAS), 2017, pp. 373–378.
[124]. E. Masehian and D. Sedighizadeh, "Multi-objective robot motion planning using a particle swarm optimization model," J. Zhejiang Univ. SCIENCE C, vol. 11, no. 8, pp. 607–619, 2010.
[125]. W. Meng et al., "Decentralized multi-UAV flight autonomy for moving convoys search and track," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 25, no. 4, pp. 1480–1487, 2017.
[126]. J. J. Kuffner and S. M. LaValle, "RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA), vol. 2, 2000, pp. 995–1001.
[127]. Y. Lin and S. Saripalli, "Sampling-based path planning for UAV collision avoidance," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 18, no. 11, pp. 3179–3192, 2017.
[128]. H. Yang, Q. Jia, and W. Zhang, "An environmental potential field based RRT algorithm for UAV path planning," in Proc. 37th Chinese Control Conf. (CCC), 2018, pp. 9922–9927.
[129]. R. Fedorenko, A. Gabdullin, and A. Fedorenko, "Global UGV path planning on point cloud maps created by UAV," in Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Intell. Transp. Eng. (ICITE), 2018, pp. 253–258.
[130]. W. Zu et al., "Multi-UAVs cooperative path planning method based on improved RRT algorithm," in Proc. IEEE Int. Conf. Mechatron. Autom. (ICMA), 2018, pp. 1563–1567.
[131]. M. Levin, A. Paranjape, and M. Nahon, "Agile fixed-wing UAV motion planning with knife-edge maneuvers," in Proc. Int. Conf. Unmanned Aircraft Syst. (ICUAS), IEEE, 2017, pp. 114–123.
[132]. Q. Sun, M. Li, T. Wang, and C. Zhao, "UAV path planning based on improved rapidly-exploring random tree," in Proc. Chinese Control Decis. Conf. (CCDC), IEEE, 2018, pp. 6420–6424.
[133]. M. Li, H.-N. Wu, and Z.-Y. Liu, "Sampling-based path planning and model predictive image-based visual servoing for quadrotor UAVs," in Proc. Chinese Autom. Congr. (CAC), IEEE, 2017, pp. 6237–6242.
[134]. X. Li et al., "Control method of UAV based on RRT* for target tracking in cluttered environment," in Proc. Int. Conf. Power Electron. Syst. Appl.–Smart Mobility, Power Transf. & Security (PESA), IEEE, 2017, pp. 1–4.
[135]. B. Nurimbetov, O. Adiyatov, S. Yeleu, and H. A. Varol, "Motion planning for hybrid UAVs in dense urban

using UAV in an indoor environment," in Proc. IEEE Int. Symp. Appl. Mach. Intell. Inform. (SAMI), 2016, pp. 345–350.
[158]. H. V. Abeywickrama, B. A. Jayawickrama, Y. He, and E. Dutkiewicz, "Potential field based inter-UAV collision avoidance using virtual target relocation," in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Spring), 2018, pp. 1–5.
[159]. S. Chen, Z. Yang, Z. Liu, and H. Jin, "An improved artificial potential field based path planning algorithm for unmanned aerial vehicle in dynamic environments," in Proc. Int. Conf. Security, Pattern Anal., Cybern. (SPAC), IEEE, 2017, pp. 591–596.
[160]. N. Dyn, D. Levin, and S. Rippa, "Data-dependent triangulations for piecewise linear interpolation," IMA J. Numer. Anal., vol. 10, no. 1, pp. 137–154, Jan. 1990.
[161]. R. W. Hamming, Digital Filters, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1983.
[162]. H. Samet, The Design and Analysis of Spatial Data Structures, Reading, MA: Addison-Wesley, 1990.
[163]. R. Weibel, "Models and experiments for adaptive computer-assisted terrain generalization," Cartogr. Geogr. Inf. Syst., vol. 19, no. 3, pp. 133–153, 1992.
[164]. P. S. Heckbert and M. Garland, "Survey of polygonal surface simplification algorithms," School of Computer Science, Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, PA, Tech. Rep., 1995.
[165]. R. Pajarola, "Overview of quadtree-based terrain triangulation and visualization," 2002.
[166]. P. Lindstrom et al., "Real-time, continuous level of detail rendering of height fields," in Proc. SIGGRAPH, ACM, 1996, pp. 109–118.
[167]. B. Von Herzen and A. H. Barr, "Accurate triangulations of deformed, intersecting surfaces," ACM Comput. Graph., Proc. SIGGRAPH, vol. 21, no. 4, pp. 103–110, 1987.
[168]. R. Sivan and H. Samet, "Algorithms for constructing quadtree surface maps," in Proc. 5th Int. Symp. Spatial Data Handling, 1992, pp. 361–371.
[169]. T. Gerstner, "Multiresolution visualization and compression of global topographic data," Inst. für Angew. Math., Univ. Bonn, Tech. Rep. 29, 1999. To appear in Geoinformatics.
[170]. J. Milnor, Morse Theory, Princeton, NJ: Princeton Univ. Press.
[171]. R. Pajarola, "Large-scale terrain visualization using the restricted quadtree triangulation," Dept. of Computer Science, ETH Zürich, Tech. Rep. 292, 1998.
IEEE, 2017, pp. 413–417, doi: 10.1109/ICUS.2017.8278380.
[147]. X. Song and S. Hu, "2D path planning with Dubins-path-based A* algorithm for a fixed-wing UAV," in Proc. CCSSE, IEEE, 2017, pp. 69–73, doi: 10.1109/CCSSE.2017.8087897.
[148]. N. Bo, X. Li, J. Dai, and J. Tang, "A hierarchical optimization strategy of trajectory planning for multi-UAVs," in Proc. Int. Conf. Intell. Human-Machine Syst. Cybern. (IHMSC), Vol. 1, IEEE, 2017, pp. 294–298.
[149]. X. Ma, Z. Jiao, Z. Wang, and D. Panagou, "3-D decentralized prioritized motion planning and coordination for high-density operations of micro aerial vehicles," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 26, no. 3, pp. 939–953, 2018.
[150]. B. Penin, P. R. Giordano, and F. Chaumette, "Minimum-time trajectory planning under intermittent measurements," IEEE Robot. Autom. Lett., vol. 4, no. 1, pp. 153–160, 2019.
[151]. H. Liang et al., "Three-dimensional path planning based on DEM," in Proc. Chinese Control Conf. (CCC), IEEE, 2017, pp. 5980–5987.
[152]. Z. Mengying, W. Hua, and C. Feng, "Online path planning algorithms for unmanned air vehicle," in Proc. Int. Conf. Unmanned Syst. (ICUS), IEEE, 2017, pp. 116–119.
[153]. A. Budiyanto, A. Cahyadi, T. B. Adji, and O. Wahyunggoro, "UAV obstacle avoidance using potential field under dynamic environment," in Proc. Int. Conf. Control, Electron., Renew. Energy Commun. (ICCEREC), IEEE, 2015, pp. 187–192.
[154]. J. Dai, Y. Wang, C. Wang, J. Ying, and J. Zhai, "Research on hierarchical potential field method of path planning for UAVs," in Proc. IEEE Adv. Inf. Manage., Commun., Electron. Autom. Control Conf. (IMCEC), IEEE, 2018, pp. 529–535.
[155]. W. Bai et al., "A cooperative route planning method for multi-UAVs based on the fusion of artificial potential field and B-spline interpolation," in Proc. Chinese Control Conf. (CCC), IEEE, 2018, pp. 6733–6738.
[156]. D. Fu-guang, J. Peng, B. Xin-qian, and W. Hong-Jian, "AUV local path planning based on virtual potential field," in Proc. Int. Conf. Mechatron. Autom., Vol. 4, IEEE, 2005, pp. 1711–1716.
[157]. T. T. Mac, C. Copot, A. Hernandez, and R. De Keyser, "Improved potential field method for unknown obstacle avoidance

[172]. S. Thrun, “Learning metric-topological maps for indoor mobile robot navigation,” Artif. Intell., vol. 99, no. 1, pp. 21–71, 1998.

۸. پی‌نوشت

1. Unmanned Aerial Vehicle

۲. کاربردهای ذکر شده در بعضی موارد همپوشانی دارند.

3. Sessions
4. Big Data
5. Cloud Computing
6. GPS
7. Vehicular ad hoc network
8. GSD
9. QMI
10. SDF
11. Non-covering
12. Covering
13. Wind fields
14. Potential Fields
15. Roadmap
16. Boustrophedon Cellular Decomposition
17. Information Point
18. Pedestrian Pocket Algorithm
19. Back Tracking
20. Back and Forth (BF)
21. Spiral
22. Cell Decomposition
23. Roadmaps
24. Probabilistic Roadmaps
25. Rapid-exploring Random Trees
26. Potential Fields
27. Simulated Annealing (SA)
28. Ant Colony Optimization (ACO)
29. Brute-Force Search.
30. Delaunay
31. Multi-pass algorithms
32. Quadtree
33. Triangular Irregular Networks
34. Restrict Quad Tree
35. Level-of-Deta