



E-ISSN: 2676-4253

Journal of Technology in Aerospace Engineering

Vol. 8, No. 3, pp. 75-98, 2024

<https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.3.6>

Journal Homepage: <https://jtae.ari.ac.ir>



Original Research Paper

A Review of the Application of Optimization Algorithms Nature Inspired in the Design of Flight Paths

Iman Shafieenejad^{1*} , MohammadReza Banitalebi Dehkordi² , and Mohammad Amin Nourianpour³ 

1. Aerospace Research Institute, Ministry of Science and Technology Research, Tehran, Iran

2, 3. Department of Aerospace Engineering, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received 15 July 2023

Revised 09 October 2023

Accepted 09 October 2023

Available Online 31 January 2024

Keywords:

Thermal barrier coating bee colony

Optimization

Particle swarm optimization

Ant colony optimization,

Group control of flying devices

Route design

ABSTRACT

In this article, an overview of the application of optimization algorithms inspired by nature in the design of the flight path has been discussed. The significant increase in the capabilities and availability of independent ground and air tools makes safety and security challenges especially important in the protection of strategic infrastructure. In this context, the detection of multiple mobile threats with the aim of invading the limited spaces of these infrastructures is an important issue. This paper focuses on the trajectory planning problem for the interception of multiple aerial targets by a group of UAVs. 3D trajectory planning for the tracking of moving targets is a challenging task, especially when the tracking is performed by a crowd of UAVs, because there are numerous motion and dynamic constraints. The goal is first to assign targets to individual drones (task assignment) and create a 3D path for each one. Many algorithms are known as the main schemes to solve this kind of problem based on collective intelligence; many of them are based on biological systems such as particle swarm optimization, ant colony optimization, artificial bee colony optimization, bat-inspired algorithm, etc. This article presents a comprehensive review of collective intelligence algorithms focusing on 3D path planning problems for target tracking by a group of UAVs. It also focuses on improving existing collective intelligence algorithms for more optimal and correct path optimization. A comprehensive review of each algorithm with an analysis of its advantages and disadvantages in the context of target tracking is also provided. This extensive review is the outline for researchers and practitioners in the field of mass UAVs.

* Corresponding Author's E-mail: shafieenejad@ari.ac.ir

How to Cite this Article:

I. Shafieenejad, M. R. Banitalebi Dehkordi, and M. A. Nourianpour, "A Review of the Application of Optimization Algorithms Nature Inspired in the Design of Flight Paths," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 75-98, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.3.6>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





مروری بر کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی الهام گرفته‌شده از طبیعت در طراحی مسیر وسایل پرنده

ایمان شفیعی‌نژاد^{۱*}، محمدرضا بنی‌طالبی‌دهکردی^۲، و محمدامین نوریان‌پور^۳

۱- استادیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران
۲- کارشناسی، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله به مروری بر کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی الهام گرفته شده از طبیعت در طراحی مسیر وسایل پرنده پرداخته شده است. افزایش چشمگیر قابلیت‌ها و در دسترس بودن ابزارهای زمینی و هوایی مستقل، چالش‌های ایمنی و امنیتی را به ویژه در حفاظت از زیرساخت‌های استراتژیک حائز اهمیت می‌کند. در این زمینه، رهگیری تهدیدات موبایلی متعدد با هدف تهاجم به فضاها محدود این زیرساخت‌ها موضوع مهمی است. این مقاله بر روی مشکل برنامه‌ریزی مسیر برای رهگیری چندین هدف هوایی توسط گروهی از پهپادها تمرکز دارد. برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی برای رهگیری اهداف متحرک یک کار چالش برانگیز است، به‌ویژه زمانی که رهگیری توسط انبوهی از پهپادها انجام می‌شود، زیرا محدودیت‌های حرکتی و دینامیکی متعددی وجود دارد. هدف ابتدا تخصیص اهداف به پهپادهای منفرد (تخصیص وظایف) و ایجاد یک مسیر سه‌بعدی برای هر یک است. بسیاری از الگوریتم‌ها به‌عنوان طرح‌های اصلی برای حل این نوع مسائل بر اساس هوش جمعی شناخته شده‌اند، بسیاری از آن‌ها بر اساس سیستم‌های بیولوژیکی مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات، بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها، بهینه‌سازی کلونی زنبورهای مصنوعی، الگوریتم الهام گرفته از خفاش و غیره هستند. این مقاله مروری جامع از الگوریتم‌های هوش جمعی با محوریت مشکلات مربوط به برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی برای رهگیری هدف توسط گروهی از پهپادها ارائه شده است. همچنین بر بهبود الگوریتم‌های هوش جمعی موجود برای بهینه‌سازی مسیر بهینه‌تر و صحیح‌تر تمرکز می‌کند. یک بررسی جامع برای هر الگوریتم با تجزیه و تحلیل مزایا و معایب آن در زمینه رهگیری هدف نیز ارائه شده است. این بررسی گسترده طرح کلی برای محققان و متخصصان در زمینه حرکت دسته جمعی پهپادها است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۴ تیر ۱۴۰۲
بازنگری ۱۷ مهر ۱۴۰۲
پذیرش ۱۷ مهر ۱۴۰۲
اولین انتشار ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل
بهینه‌سازی ازدحام ذرات
بهینه‌سازی کلونی مورچه
کنترل گروهی وسایل پرنده
طراحی مسیر

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shaficenejad@ari.ac.ir

How to Cite this Article:

I. Shaficenejad, M. R. Banitalebi Dehkordi, and M. A. Nourianpour, "A Review of the Application of Optimization Algorithms Nature Inspired in the Design of Flight Paths," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 75-98, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.3.6>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



۱ مقدمه

به دام افتادن احتمالی در حداقل‌های محلی، و محدودیت‌های ناشی از محدودیت‌های مربوط به ویژگی‌های شبکه رنج می‌برند. این الگوریتم‌ها اغلب از نظر محاسباتی پیچیده هستند و تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری را ندارند. برخی از این الگوریتم‌ها ماهیت قوی ندارند و در نتیجه در برنامه‌های خودکار بالادرنگ و همچنین در محیط‌هایی با موانع دینامیکی متعدد کار نمی‌کنند که از ضعف آن‌ها به شمار می‌رود [۵]. نویسندگان متعددی کار گسترده‌ای را در زمینه با تمرکز بر برنامه‌ریزی مسیر دو بعدی انجام می‌دهند، اما هیچ اشاره مستقیمی به اطلاعات جمعی و ازدحام در ماموریت‌های رهگیری وجود ندارد. ریش و همکاران [۶] یک روش جدید و نوینی برای برنامه‌ریزی مسیر و رهگیری چندین هدف برای چندین پهپاد به نام Eppstein's k-best ارائه می‌کنند. این روش، مسیری را ایجاد می‌کند که محدود به نقاط راه از پیش تعیین شده نیست، و بنابراین تنها راه‌حل‌های بهینه را ارائه می‌دهد.

در این مقاله با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی الهام گرفته شده از طبیعت مانند الگوریتم ازدحامی ذرات، الگوریتم زنبور عسل کلونی، کرم شب تاب، الگوریتم کبوترها و الگوریتم مورچه‌های کلونی در طراحی مسیر وسایل پرنده بررسی شده‌است تا به کمک رفتار بهینه حیوانات در طبیعت، طراحی مسیر را به بهینه‌ترین صورت انجام داد.

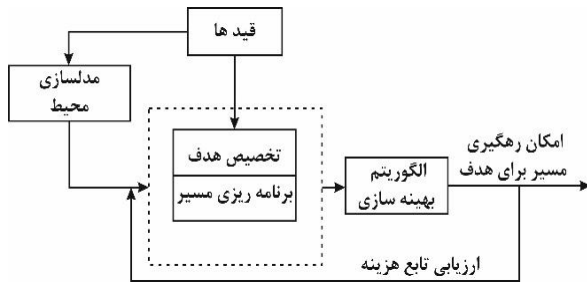
۱.۱ هدف

در دنیای امروز پهپادها به طور گسترده برای ارزیابی ریسک و عملیات تحت تهدید بدون ایجاد هیچ گونه خطری برای جان انسان استفاده می‌شوند. پهپادها نیاز به تعامل با انسان دارند، به‌ویژه زمانی که نیاز به نظارت مستمر باشد. با این حال، توانایی انسان برای نظارت بر گروه بزرگی از پهپادها محدود است و نیازمند پیشرفت در زمینه می‌باشد. در چنین مواردی، پهپادها باید توانایی تصمیم‌گیری برای تخصیص کار و نوابری مسیر ایمن را داشته باشند که به نوبه خود نیازمند الگوریتم‌ها یا تکنیک‌های برنامه‌ریزی مسیر کارآمد هستند. برنامه‌ریزی یک مسیر امن برای پهپاد از موقعیت اولیه تا هدف، کار ساده‌ای نیست و به عوامل مختلفی مانند طول مسیر، اجتناب از مانع، مصرف انرژی و غیره بستگی دارد. پهپادها می‌توانند مسیرهای بهینه‌شده را برای رهگیری هدف همراه با اجتناب از برخورد دنبال کنند. در این مقاله، مشکلات مربوط به ترکیب برنامه‌ریزی مسیر و رهگیری هدف توسط انبوهی از پهپادها را مورد بحث قرار گرفته‌است. دسته‌ای از پهپادها معمولاً با پهپادهای بسیار زائد و نسبتاً ساده مشخص می‌شوند، که دارای حسگرهای نسبتاً ساده روی هواپیما برای تعامل با سایر پهپادها و همچنین با محیط هستند. به دلیل این ویژگی‌ها، گروهی از پهپادها بسیار مقیاس‌پذیر، انعطاف‌پذیر و قوی هستند. اگرچه مقالات مروری مختلفی در مورد برنامه‌ریزی مسیر ازدحام

امروزه بشریت شاهد افزایش چشمگیر، در دسترس بودن وسایل نقلیه بر پایه هوش مصنوعی و نیمه خودران زمینی و هوایی می‌باشد و همچنین فرصت استفاده از آن‌ها را در انواع خدمات و وظایف گسترش یافته‌است. وسایل نقلیه خودران در حال حاضر در عملیات جستجو و نجات؛ در مناطق مستعد فاجعه، نظارت، نقشه برداری سه بعدی، سنجش از دور و موارد دیگر استفاده می‌شوند. نیروی ویژه پلیس فرانسه نیز برای شناسایی دستگیری قاچاقچیان از پهپادها بهره می‌برد. شرکت آمازون نیز اخیراً شروع به استفاده از پهپادها برای تحویل بسته‌ها کرده‌است و ۴۰ درصد از سم پاشی‌ها در ژاپن توسط وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین^۱ انجام می‌شود [۱]. استفاده گسترده از وسایل نقلیه خودران در هر دو زمینه نظامی و غیرنظامی مزایای بالقوه و همچنین خطرات زیادی را به همراه دارد. از حوادث غیرعمدی جزئی (ضربه به یک شی) تا تهدیدات امنیت ملی متفاوت است. کاهش خطرات ناشی از استفاده گسترده از وسایل نقلیه متحرک خودران، به‌ویژه هواپیماهای بدون سرنشین، شامل اجرای قوانین و مقررات، شناسایی، کنترل و احتمالاً از بین بردن آن‌ها است [۲]. یک وظیفه مهم در کاهش خطر پهپادهای متخاصم و متجاوز که تهدید به حمله به یک فضای محدود می‌کنند، توانایی رهگیری آن‌ها قبل از ایجاد خسارت است. منظور از رهگیری، درگیر کردن یک عامل دفاعی با تهدید برای نظارت بر عملکرد خود از نزدیک یا جلوگیری از تکمیل مأموریت مورد بررسی است. بسیاری از برنامه‌های کاربردی که نیاز به رهگیری چندین تهدید زمینی یا هوایی پویا دارند، می‌توانند توسط گروهی از پهپادها اجرا شوند، زیرا می‌توانند همزمان با تغییرات دینامیکی محیط سازگار شوند. گروهی از پهپادها همچنین در برابر انواع متمایز خطاها تحت شرایط خاص مقاومت بیشتری دارند، به‌ویژه، خرابی یک یا چند پهپاد در داخل حرکت جمعی که ممکن است لزوماً کل مأموریت را تحت تأثیر قرار ندهد [۳]. یکی از ویژگی‌های کلیدی در عملکرد یک دسته از پهپادها، توانایی تعیین اهداف و ساخت یک مسیر سه‌بعدی برای هر یک از اعضای جمعی است. رویکردهای مختلفی برای حل مشکلات کلی مربوط به برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی برای یک پهپاد منفرد، مانند نقشه‌های راه احتمالی، الگوریتم‌ها، میدان پتانسیل مصنوعی، تابع نوابری احتمالی توسعه و پیاده‌سازی شده‌اند [۴]. بسیاری از این الگوریتم‌ها از روش‌های جستجوی مبتنی بر نمونه‌برداری و مبتنی بر نمودار استفاده می‌کنند که برای فضای پیکربندی با ابعاد بالا مناسب هستند و پیاده‌سازی آن‌ها نسبتاً آسان هستند. آن‌ها همچنین به طور احتمالی کامل می‌شوند به‌طوری که احتمال یافتن راه حل با توجه به زمان کافی افزایش می‌یابد. با این حال، برخی از این روش‌ها از کاستی‌هایی مانند

1. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

پهینه‌سازی نتیجه با عملکرد ارزیابی (هزینه) با در نظر گرفتن محدودیت‌های سینماتیکی و دینامیکی است. شکل ۱ طرح کلی فرآیند رهگیری هدف را نشان می‌دهد. فرآیند را می‌توان در سه مرحله زیر خلاصه کرد.



شکل ۱- فرآیند برنامه‌ریزی مسیر برای رهگیری هدف

مرحله ۱: درک و مدل‌سازی از محیط‌سهبعدی بوده که در این مرحله تمام ویژگی‌های مربوط به محیط، به ویژه وضعیت ازدحام، اهداف و موانع تعیین می‌شود. به طور کلی، بر اساس روش‌های شبکه اشغال پویا [۱۰]، یا بر اساس روش‌های تخمین احتمال رهگیری همراه با الگوریتم کنترل پیش‌بینی برای مدل‌سازی موقعیت موانع و اهداف یا تهدیدات است.

مرحله ۲: تخصیص هدف و برنامه‌ریزی مسیر است که در این مرحله، تمام اهداف موجود در محیط به پهپادهای منفرد که ازدحام را تشکیل می‌دهند، اختصاص می‌یابد. تخصیص بر اساس محدودیت‌های مأموریت (به‌عنوان مثال تعداد پهپادهای اختصاص داده‌شده به هر هدف)، نوع اهداف و ترتیب ادراک آن‌ها، محدودیت‌های زمانی و غیره است. بر اساس تخصیص هدف، مسیر هر پهپاد در ازدحام ساخته شده است.

مرحله ۳: فرمول‌بندی تابع تناسب که تابع تناسب با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌های سینماتیکی و دینامیکی محیط‌سهبعدی و یافتن مسیر بهینه برای هر پهپاد فرموله می‌شود.

۱.۲ مدل‌سازی محیط

مدل‌سازی محیطی عامل مهمی در تخصیص هدف و برنامه‌ریزی حرکت است، به‌ویژه برای کنترل حرکت یک پهپاد ازدحام، به دلیل تعامل حیاتی بین پهپادها و موانع موجودی که در محیط وجود دارد. روش‌شناسی و محدودیت‌های چندین الگوریتم محبوب مورد استفاده برای مدل‌سازی محیط در مأموریت‌های رهگیری در جدول ۱ نشان داده شده است. در مطالعه‌ای بر روی الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر سهبعدی

پهپادها [۹-۷] وجود دارد که مشکل برنامه‌ریزی مسیر را در نظر می‌گیرد، اما آن‌ها مشکل رهگیری هدف متحرک را در نظر نمی‌گیرند. برنامه‌ریزی مسیر برای رهگیری هدف متحرک به طور کامل با موانع موجود در محیط و همچنین با پویایی اهداف مرتبط است. در این مقاله، بر روی الگوریتم‌های موجود مبتنی بر هوش جمعی^۱ و اصلاحات آن‌ها برای حل مسائل مربوط به برنامه‌ریزی مسیر ترکیبی و رهگیری هدف بحث شده است.

۲.۱ مشارکت و یافته‌های کلیدی

سهام اصلی و یافته‌های کلیدی مقاله به شرح زیر است: (۱) یک بررسی گسترده از الگوریتم‌های برنامه‌ریزی مسیر بر اساس تکنیک‌های اطلاعاتی ازدحام برای رهگیری هدف توسط یک پرواز دسته جمعی پهپادها ارائه شده است. (۲) یک ارزیابی انتقادی از تکنیک‌های برنامه‌ریزی مسیر انجام شده و به شکل جدولی نشان داده شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده برای ارزیابی عبارتند از پیچیدگی محاسباتی، حافظه حالت‌های قبلی، تکنیک‌های جستجو، سرعت همگرایی و مقیاس‌پذیری. (۳) روش‌های متمایز برای مدل‌سازی محیط، تخصیص هدف و فرمول‌بندی تابع تناسب^۲ را از نظر برنامه‌ریزی مسیر مؤثر ازدحام پهپادها تجزیه و تحلیل و نیز مقایسه شده‌اند. این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: بخش ۲ مسائل مربوط به مدل‌سازی محیط‌های سهبعدی و فرمول‌بندی‌های مختلف مسئله برای ارزیابی (هزینه) توابع را ارائه می‌دهد. مقدمه‌ای بر مشکل کلی رهگیری هدف در بخش ۳ توضیح داده شده است. این بخش همچنین کاربردهای هوش جمعی برای رهگیری هدف را مورد بحث قرار می‌دهد. بخش ۴ مروری کوتاه بر الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه می‌کند و بخش ۵ الگوریتم‌های هوش جمعی را برای برنامه‌ریزی مسیر و رهگیری هدف در مورد انبوهی از پهپادها توضیح می‌دهد و بحث می‌کند. مقایسه الگوریتم‌های مبتنی بر پارامترهای چندگانه در بخش ۶ آورده شده است و بخش ۷ نکات پایانی را ارائه می‌دهد.

۲ برنامه‌ریزی یک مسیر سهبعدی برای رهگیری

مأموریت‌های گروهی از پهپادها

برنامه‌ریزی مسیر برای رهگیری اهداف در فضای سهبعدی یکی از چالش برانگیزترین وظایف در برنامه‌ریزی حرکتی است، به‌ویژه در مورد حرکت گروهی پهپادها. برنامه‌ریزی مسیر معمولاً فرآیند تخصیص اهداف به‌ازای ازدحام و ایجاد یک مسیر بهینه از منبع به هدف و در عین حال اجتناب از برخورد با موانع و سایر اعضای ازدحام و در عین حال

2. Fitness Function

1. Swarm Intelligence(SI)

سلولی تقسیم شده‌است. هر سلول توسط یک پهپاد منفرد مشاهده شده و احتمال وجود هدف را دارد که بر اساس توزیع برنولی در نتیجه تشخیص صفر (هدف یافت نشد) یا یک (هدف پیدا شد) مدل شده‌است. فقط پهپادهایی که در سلول‌های مجاور وجود دارند می‌توانند اطلاعات را به اشتراک بگذارند. یک روش جهانی برای مدل‌سازی محیط در مأموریت رهگیری هدف نیز در سال ۲۰۲۲ معرفی شده‌است که در آن کل محیط به‌عنوان یک فضای اقلیدسی سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شود که یک الگوریتم منحنی معروف به L+Dumo برای رهگیری هدف کارآمد پیاده‌سازی شده‌است. این الگوریتم تکراری است و از داده‌های حسگر اولیه برای تولید مدل سه‌بعدی محیط استفاده می‌کند. در مطالعه دیگری [۱۳]، یک دوربین سوراخ سوزنی روی هواپیما برای مدل‌سازی دنیای سه‌بعدی استفاده شده‌است. هر پیکسل از تصویر گرفته‌شده توسط دوربین، اطلاعات فاصله اندازه‌گیری شده (با در نظر گرفتن مجموع تجمعی محدوده هر پیکسل) از موقعیت شروع تا موقعیت هدف و موقعیت مانع را نمایش می‌دهد. یک تکنیک ناوبری مبتنی بر فیلتر کالمن، همراه با ترکیب داده‌های حسگر، برای اجتناب موثر از موانع استفاده می‌شود. سانفورچه و همکاران [۱۴] یک مدل‌سازی محیط سه‌بعدی آنلاین را با استفاده از نقشه اکتوما معرفی می‌کنند. این نرم‌افزار منبع باز است که داده‌های اندازه‌گیری شده به‌دست آمده از هر نوع سنسور فاصله را برای ساخت یک مدل سه‌بعدی از محیط ناشناخته پردازش می‌کند. در مرجع [۱۵]، نویسنده یک تابع مثلثاتی و مدل‌سازی زمین مبتنی بر سطح شهر را پیاده‌سازی کرده‌است. در مدل‌سازی سطح شهر، یک زمین سه‌بعدی با استفاده از اطلاعات پایه استخراج‌شده از نقشه شهر، مانند ارتفاعات و مکان‌های مراکز ساختمان‌ها، شبیه‌سازی می‌شود. مدل‌سازی ساختمان بر اساس سه ماتریس که در زیر ارائه شده‌است، انجام می‌شود.

$$Bu_i^e |^{i=1,2,3,\dots,N^B} = (X_{1,i}, X_{2,i}) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_{1,i} \\ X_{2,i} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} rand[X_1^L, X_1^U] \\ rand[X_2^L, X_2^U] \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Bu_i^W = rand[0, H^L] \quad (3)$$

در معادله بالا جایی که موقعیت هر ساختمان با Bu_i^e نشان داده می‌شود، جایی که N^B تعداد کلی ساختمان‌ها را نشان می‌دهد، X^L و X^U به ترتیب حداکثر و حداقل حد فاصله افقی جستجو را نشان می‌دهند، H^L حداکثر حد ارتفاع ساختمان‌ها است، و Bu_i^W مخفف

[۱۱]، محیط به‌عنوان فضای کاریا دامنه تعریف می‌شود که در آن موانع به‌عنوان مجموعه‌ای از مدل‌های عملکردی از موانع و هندسه اهداف در فضای کاری مشخص می‌شوند.

جدول ۱ - محدودیت‌های تکنیک استفاده شده در مدل‌سازی محیط

محققین (منابع)	روش شناسی برای مدل‌سازی محیط	محدودیت‌ها
R. W. Beard و همکاران [۱۸]	نمودار ورونویی ^۱	استفاده از شرایط مرزی ثابت
L. Yang و همکاران [۱۹]	مجموعه‌ای از نقاط و توابع ^۲	مناسب نبودن برای دینامیک محیط
S. Aggarwal و همکاران [۲۴]	انتشار برنولی ^۳	به اشتراک گذاشتن اطلاعات فقط در سلول‌های مجاور
D. Li و همکاران [۲۵]	فضای اوکیلدیان ^۴	نیازمند اطلاعات اولیه حسگرها
H. Yu و همکاران [۲۶]	فیلتر کالمن ^۵	فرض کردن معادلات به‌صورت خطی برای نشان دادن محیط
J. Ren و همکاران [۲۷]	اوکتومپ ^۶	رسم مدل سه‌بعدی به‌صورت مجازی
J. Hu و همکاران [۲۸]	تابع تریگونومیک ^۷	تولید مدل‌های ناپوسته از محیط
H. H. Triharminto و همکاران [۲۹]	نقشه دینامیکی زمان - محیط ^۸	برای مدل سه‌بعدی مناسب نیست
A. S. Prabuwno و همکاران [۳۰]	فرایند تصمیم‌گیری مارکوو ^۹	آسان نبودن پیاده‌سازی آن

نویسندگان معدودی در روش نمودار ورونویی را برای مدل‌سازی محیط در مأموریت‌های رهگیری توسط پهپادها پیاده‌سازی می‌کنند. در این روش، ناحیه مورد نظر، با n تعداد مانع، به n سلول محدب تقسیم می‌شود، که توسط خطوط هم‌فاصله از موانع ساخته شده و لبه‌های چند ضلعی ورونویی را تشکیل می‌دهند. هر لبه چند ضلعی ورونویی یک تابع هزینه مرتبط است و برای یافتن راه حل جهانی برای انبوهی از پهپادها در فضای سه‌بعدی استفاده می‌شود. در مرجع [۱۲]، یک چارچوب عددی، بر اساس توزیع برنولی، برای مدل‌سازی محیط برای جستجوی هدف در یک سناریوی فضای باز پیشنهاد شده‌است که کل محیط به یک شبکه

6. Octomap
7. Trigonometric Function
8. Time- Environment Dynamic Map
9. Markov Decision Process

1. Voronoi Diagram
2. Set of Points and Functions
3. Bernoulli Distribution
4. Euclidian Space
5. Kalman Filter

عرض هر ساختمان است. این سه ماتریس مدل گسسته و ناپیوسته زمین را ارائه می‌کنند و منحنی بی‌زیر را برای ایجاد یک مسیر صاف برای پهپادها از ابتدا تا نقطه هدف اتخاذ می‌کنند.

ژائو و همکاران [۱۶] روش جدیدی را برای مدل‌سازی محیط با پیاده‌سازی نقشه دینامیکی زمان-محیط (TEDM) پیشنهاد کردند که در آن، مدل‌سازی یک مانع دینامیکی با معرفی یک محور زمانی انجام می‌شود و هر هدف به دو بخش تقسیم می‌شود: هدف محلی و جهانی. نتایج شبیه‌سازی و وضوح کارایی TEDM را در مدل‌سازی موانع نامنظم نشان می‌دهد. یک روش مبتنی بر فرآیند تصمیم مارکوف (MDP) توسط نویسندگان برای مدل‌سازی آنالاین محیط و غلبه بر مشکلات عدم قطعیت موجود در الگوریتم‌های هوش جمعی ارائه شده است.

۲.۲ تخصیص هدف

هدف اصلی تخصیص هدف در یک ماموریت رهگیری توسط یک گروه پهپاد برای به حداقل رساندن احتمال بقای اهداف و به حداقل رساندن کل زمان ماموریت است. تخصیص هدف را می‌توان به دو نوع استاتیک و دینامیک تقسیم کرد. در تخصیص هدف ایستا، تمام اهداف در یک مرحله به هر پهپاد اختصاص داده می‌شود، در حالی که در تخصیص هدف پویا، به دلیل تغییر در محیط و وضعیت هدف، می‌توان اهداف را در طول ماموریت به هر پهپاد تخصیص داد. به طور کلی، پهپادها به محموله کوچکی از انواع و قابلیت‌های متمایز مجهز هستند. همچنین، برخی از اهداف ممکن است مقادیر متفاوتی از سایر اهداف داشته باشند. بنابراین ویژگی‌های پهپاد و اهداف باید در تخصیص هدف در نظر گرفته شود.

فناوری کنترل پیش‌بینی برای به حداکثر رساندن تابع هدف که ارزش اهداف و احتمال رهگیری را در نظر می‌گیرد و در عین حال از برخورد جلوگیری می‌کند و زمان را به حداقل می‌رساند. یکی از اشکالات عمده تکنیک کنترل پیش‌بینی مدل، پیچیدگی آن است. برای مقابله با این پیچیدگی، کرووز و همکارانش [۱۷] الگوریتم مبتنی بر هوش جمعی معروف به بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۲ را پیاده‌سازی کرده‌اند که در آن بهترین تخصیص هدف ممکن بر اساس رابطه (۴) انجام می‌شود.

$$Max J = \sum_t \sum_u \sum_d \sum_j C_{tudj} X_{tudj} \quad (4)$$

C_{tudj} هزینه کل تخصیص هدف است، X_{tudj} نشان دهنده متغیر تصمیم است، u نشان دهنده شاخص‌های پهپادها، مخفف decoys و j نشان دهنده مسدود کننده است. مقدار تابع ۱ است اگر یکی از

ترکیبات (u, d, j) به هدف (t) تخصیص داده شود، و همه اهداف در غیر این صورت ۰ تخصیص داده شوند. سوچیت و همکارانش^۳ [۱۸] یک روش تخصیص هدف غیرمتمرکز به نام مکانیسم مذاکره را پیشنهاد کردند که در آن پهپادها با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند و اطلاعات اهداف مانند موقعیت و ارزش را برای مذاکره در مورد تخصیص هدف به اشتراک می‌گذارند. آن‌ها همچنین تأثیر دامنه سنسورهای داخلی را در تخصیص هدف در نظر گرفته‌اند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که وقتی برد حسگرها کم است، مکانیسم مذاکره با اشتراک‌گذاری اطلاعات بهتر از بدون اشتراک‌گذاری اطلاعات عمل می‌کند. با این حال، مکانیسم پیشنهادی از نظر سرعت هم‌گرایی فاقد دقت است زیرا از یک رویکرد تصادفی برای یافتن راه‌حل استفاده می‌کند. برای این کار لیو^۴ و همکارانش [۱۹] با ترکیب سیستم کلونی مورچه‌ها و مکانیسم حراج غیرمتمرکز، روشی همه‌جا حاضر را پیشنهاد کرد. مکانیسم حراج غیرمتمرکز برای تخصیص اهداف به عوامل خارجی را در حداقل زمان و سیستم کلونی مورچه‌ها برای برنامه‌ریزی مسیر برای رهگیری هدف استفاده می‌شود.

بعضی از مهندسی مکانیسم تخصیص وظایف ناهم‌زمان را برای تخصیص اهداف پیاده‌سازی کردند. در این مکانیسم، دسته‌ای از پهپادها به زیر گروه‌ها تقسیم شده و بر اساس اولویت به اهداف اختصاص می‌یابند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این مکانیسم زمان ارتباط و پیچیدگی سیستم را کاهش می‌دهد.

چن^۵ و همکاران [۲۰] یک الگوریتم اصلاح شده جستجوی بسته گرگ دو قسمتی را پیشنهاد کردند که در آن عدم قطعیت‌های حساس به زمان و پارامترها برای تخصیص کار در مورد پهپادهای چندگانه ناهمگن در نظر گرفته می‌شوند. برای حل مشکل عدم قطعیت پارامترها، نویسندگان از روش داخلی استفاده کرده‌اند و یک الگوریتم برنامه‌ریزی سلسله‌مراتبی آنالاین برای حذف عدم قطعیت‌های حساس به زمان پیاده‌سازی شده است. نتایج تجربی به وضوح نشان می‌دهد که الگوریتم اصلاح شده جستجوی بسته گرگ دو قسمتی از نظر پیچیدگی و زمان از سایر الگوریتم‌ها بهتر عمل می‌کند. در مطالعه دیگری، نویسندگان از یک الگوریتم ژنتیک مبتنی بر منطق فازی برای تخصیص وظایف چند پهپاد استفاده کرده‌اند. منطق فازی راه حل را بر اساس روش آزمون و خطا تعیین می‌کند و بنابراین برای حل مشکل تخصیص کار زمان می‌برد. برای غلبه بر این مشکل، هیبریداسیون یک الگوریتم ژنتیک با منطق فازی توسط نویسندگان اجرا شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک مبتنی بر منطق فازی از نظر مقیاس پذیری و

4. Liu
5. Chen

1. Bezier
2. Particle Swarm Optimization (PSO)
3. Sujit

$$J_t = K_{tc} \sum_{j=1}^N f_{min,j} + \alpha K_{dc} \sum_{j=1}^N d_{min,j} \quad (7)$$

در جایی که K_{tc} و K_{dc} نشان دهنده ضرایب وزنی هستند، $d_{min,j}$ میانگین فاصله اقلیدسی از موقعیت اولیه پهپاد j ام تا هدف را مشخص می‌کند، α به‌عنوان ضریب عادی سازی و $f_{min,j}$ نشان دهنده حداقل فاصله تهدید از پهپاد j است. در مطالعه دیگری [۳۱]، نویسندگان پیشنهاد کردند که یک تابع محدودیت اضافی در تابع هزینه کل که در مرجع ذکر شده، لحاظ شود. تابع محدودیت برای ایجاد مسیرهایی به گونه‌ای اجرا می‌شود که گروهی از پهپادها بتوانند از موانع اجتناب کنند و در عین حال شعاع چرخشی ایمن را از موانع نزدیک حفظ کنند. PSO برای کمینه کردن تابع هزینه کل (J_{cost})، همانطور که در رابطه (۸) ارائه شده‌است، استفاده می‌شود.

$$J_{cost} = \frac{W_4 J_4 + W_5 J_5}{W_4 + W_5} \quad (8)$$

که در آن W_4 و W_5 وزن‌های انتخاب شده بر اساس وظایف پروازی مختلف را نشان می‌دهند. طول کل مسیر تولید شده، ارائه شده توسط J_4/J_5 ، اساساً مجموع تجمعی جابجایی زاویه ای مسیر بدون مانع تولید شده‌است. یک تابع تناسب موثر با گنجاندن دو عملکرد جدید که بر عملکرد یک پهپاد در طول عملیات آن تأثیر می‌گذارد، توسعه یافته‌است [۳۲]. یک تابع فاصله تا مقصد است و دیگری فضای جستجوی محدود (منطقه خاصی که گروهی از پهپادها باید وظیفه خود را در آن انجام دهند). تابع فاصله تا مقصد برای تعیین جهت جستجوی مناسب برای هدف متحرک در فضای سه‌بعدی و تابع فضای جستجوی محدود برای تعیین حداکثر و حداقل فاصله از مناطق تهدید استفاده می‌شود.

۳ رهگیری هدف

رویکردهای مختلفی برای حل مسائل مربوط به رهگیری هدف توسط گروهی از ربات‌های متحرک پیشنهاد شده‌است [۳۳، ۳۴].

- دانش قبلی از محیط - سطح اطلاعات موجود قبل و در طول فرآیند رهگیری: اطلاعات را می‌توان پیش از پیش داده یا در طول فرآیند با استفاده از جریان داده‌های بلادرنگ به‌دست آورد.
- نوع ارتباط - نمایندگان می‌توانند اطلاعات را به اشتراک بگذارند (تعاونی) یا به‌طور مستقل بدون به اشتراک گذاشتن اطلاعات با سایر عوامل (غیرمشارکتی) عمل کنند.

هزینه محاسباتی از الگوریتم‌های k -means و c -means بهتر عمل می‌کند.

۳.۲ تابع هزینه

هدف از تابع تناسب (هزینه) ایجاد ارتباط بین یک الگوریتم بهینه‌سازی برای برنامه‌ریزی حرکت و دنیای واقعی است. هنگام پیاده‌سازی الگوریتم‌های مبتنی بر هوش جمعی، ایجاد یک تابع هزینه موثر برای تعیین کارایی ازدحام پهپادها مورد نیاز است. هنگامی که عملکرد تناسب اندام موثر ایجاد شد، معیار اصلی برای تعیین مقدار یک مسیر برای هر پهپاد برای رهگیری یک هدف و همچنین کارایی کل می‌شود.

در برخی از تحقیقات قبلی [۲۷-۲۱]، توابع هزینه تنها با در نظر گرفتن طول مسیر از منبع تا هدف تعیین شده‌است و موانع در یک محیط ثابت ارائه شدند. با این حال، این نوع تابع هزینه برای یک محیط پویا، که در آن موانع و اهداف موقعیت خود را تغییر می‌دهند، مناسب نیست. محدودیت‌هایی مانند ارتفاع پرواز، زاویه چرخش و زاویه سمت، مربوط به قابلیت‌های پهپاد نیز باید در هنگام ایجاد تابع هزینه برای برنامه‌ریزی مسیر کارآمد رهگیری هدف لحاظ شوند. بسادا پورتاس^۱ و همکاران [۲۸] یک تابع هزینه را با گنجاندن هزینه مصرف سوخت در طول ماموریت بلادرنگ در میدان جنگ فرموله کردند.

ژو^۲ و همکاران [۲۹] یک تابع هزینه پیشنهاد کردند که فقط هزینه منطقه تهدید (مانند مانع) (J_T) و هزینه سوخت (J_F) را در نظر می‌گیرد که به ترتیب در معادلات (۵) و (۶) تعریف می‌شود.

$$J_T = \int_0^L W_T dl \quad (5)$$

$$J_F = \int_0^L W_F dl \quad (6)$$

که در آن W_T و W_F متغیرهای مربوط به طول کل مسیر قابل پرواز هستند و به ترتیب تهدید (موانع، تشخیص رادار و غیره) و هزینه سوخت هر بخش خط در مسیر تولید شده L را نشان می‌دهند. از آنجایی که هر دو تابع تهدید و هزینه سوخت در ابعاد مختلف هستند، هر دو قبل از بهینه‌سازی بین صفر و یک نرمال می‌شوند.

یک تابع هزینه برای رهگیری یک هدف متحرک با استفاده از استراتژی همکاری گروهی از پهپادها با گنجاندن قرار گرفتن در معرض تهدید در برابر پهپاد و میانگین فاصله اقلیدسی از شروع تا موقعیت هدف طراحی شده‌است [۳۰]. تابع هزینه (J_t) با اجرای تابع احتمالی چگالی^۳ به حداقل می‌رسد و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

سمت نهایی هدف را نشان می‌دهد، با فرض اینکه هدف در یک خط مستقیم با سرعت ثابت حرکت می‌کند. کوثری و همکاران [۳۹] یک کنترلر هماهنگ جدید بر اساس حالت لغزشی و تکنیک کنترل اجماع، برای رهگیری یک هدف با تشکیل یک الگوی دایره ای در فاصله ثابت از هدف طراحی کنید. کنترل حالت لغزشی یک تکنیک کنترل غیرخطی است که دارای ویژگی‌های مفیدی مانند دقت، استحکام، تنظیم آسان و پیاده سازی است. اجماع روشی برای دستیابی به توافق در مورد برخی از اطلاعات مورد علاقه به روشی توزیع شده است که در [۴۰] شرح داده شد. آن‌ها فرض می‌کنند که هم گروه پهپادها و هم اهداف در یک ارتفاع ثابت هستند. آن‌ها نتیجه می‌گیرند که با استفاده از کنترل حالت sliding، نیازی نیست برای اطلاعات کامل از هدف در تحقیقات اخیر [43-41]، یک استراتژی رمزگذاری ژن یکنواخت برای تخصیص خودکار اهداف به پهپادها بر اساس بهترین هزینه پرواز هدف به کار گرفته شده است. بردار سه گانه $[U_i, T_j, C(i, j)]$ برای نشان دادن رمزگذاری ژن یکنواخت، آمین پهپاد، T_j هدف j و $C(i, j)$ نشان دهنده هزینه پرواز پنجمین پهپاد است. به منظور تبدیل فضای گسسته بین پهپادها و اهداف به یک فضای پیوسته، یک الگوریتم تکامل دیفرانسیل بهبود یافته پیاده‌سازی شده است که از ارزش هزینه در کد ژنی استفاده می‌کند.

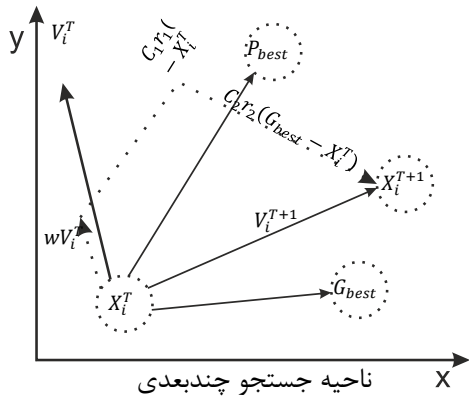
۴ الگوریتم‌های فراابتکاری

الگوریتم‌های فراابتکاری در دو دهه اخیر در زمینه هوش مصنوعی و بهینه‌سازی ریاضی شهرت یافته است. اصطلاح فراابتکاری اولین بار توسط گلاور در سال ۱۹۸۶ ابداع شد که ترکیبی از پیشوند یونانی متا (سطح بالا) و ابتکاری (پیدا کردن/کشف کردن) است. این الگوریتم‌ها ماهیت تصادفی دارند و در مقایسه با تکنیک‌های مرسوم، راه‌حل بهینه را با تلاش محاسباتی کمتر پیدا می‌کنند. از ویژگی‌های منحصر به فرد این الگوریتم‌ها می‌توان به سادگی، انعطاف‌پذیری، عملکرد بدون مشتق و قابلیت اجتناب از بهینه محلی آن‌ها اشاره کرد. از نظر منطقی این الگوریتم‌ها ثابت کرده‌اند که هیچ الگوریتمی نمی‌تواند راه‌حل منحصر به فردی برای همه مجموعه‌ای از مسائل ارائه دهد که محققان را به توسعه الگوریتم‌های جدید ترغیب می‌کند. این الگوریتم‌ها مستقل از مسئله هستند و می‌توانند عمدتاً به چهار کلاس مختلف طبقه‌بندی شوند: الگوریتم مبتنی بر ازدحام، مبتنی بر فیزیک، الگوریتم مبتنی بر تکامل و الگوریتم مبتنی بر انسان. هوش جمعیه‌عنوان هوش جمعی گروهی از عوامل مانند پرندگان، مورچه‌ها، ماهی‌ها، گرگ‌ها و غیره تعریف می‌شود. الگوریتم هوش جمعی از این رفتار اجتماعی الهام گرفته شده و با حفظ تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری در فضای جستجو، راه حل بهینه را پیدا می‌کند. اکتشاف به بررسی جهانی فضای جستجو اشاره

- اجتناب از مانع - برخی از روش‌ها فقط بر فرآیند رهگیری واقعی تمرکز می‌کنند، درحالی‌که برخی دیگر نیز اجتناب از برخورد با عوامل و موانع دیگر را در نظر می‌گیرند.
- مکان اهداف - مانند دانش قبلی از محیط، برخی از روش‌ها نیاز به دانش قبلی در مورد مکان اهداف (و همچنین مسیر آن‌ها) دارند در حالی که برخی دیگر از ابزارهای جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ برای تعیین مکان اهداف استفاده می‌کنند.

تعداد اهداف - تعداد اهداف تاثیر قابل توجهی بر پیچیدگی فرآیند دارد. یک استراتژی کنترل توزیع شده توسط نویسندگان در مرجع [۳۵] برای رهگیری هدف مشارکتی توسط انبوهی از روبات‌های متحرک پیاده سازی شده است. هر ربات با توجه به حداقل فاصله وزنی، بدون استفاده از کنترل کننده متمرکز به یک هدف متحرک خاص اختصاص داده می‌شود و با اتخاذ نوابری موازی، هدف متحرک را رهگیری می‌کند. در نوابری موازی، ربات‌های متحرک جهت گیری خود را موازی با هر ربات همسایه برای رهگیری هدف متحرک، به جای دنبال کردن مسیری که هدف طی می‌کند، حفظ می‌کنند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که اهداف را می‌توان در حداقل زمان رهگیری کرد. شریدان و همکاران [۳۶] روشی را برای رهگیری آنلاین گروهی از اهداف متحرک توسط انبوهی از روبات‌ها با استفاده از مفهوم افق غلظتی ارائه می‌کند. در این روش برای کاهش زمان محاسباتی، ازدحام بر اساس تعداد اهداف به دسته‌های فرعی تقسیم می‌شود. آن‌ها نشان می‌دهند که این مفهوم زمان تکمیل ماموریت را به حداقل می‌رساند. متأسفانه این روش‌ها فقط برای رهگیری هدف در هواپیمای دو بعدی مناسب هستند. در مرجع [۳۷]، نویسندگان از یک تکنیک برآوردگر حداقل مربعات قابل اعتماد برای پردازش نقاط راه هدایت شده تولید شده برای رهگیری اهداف متحرک در فضای سه بعدی استفاده می‌کنند. خطاهای ردیابی (تفاوت بین نقطه بین راه مورد نظر و ایستگاه بین راه فعلی) با استفاده از حسگرهای روی برد و یک رایانه همراه در تولید هر نقطه راه هدایت شده (تعیین شده توسط GPS) محاسبه و ثبت می‌شوند. سپس آن‌ها با نقطه راه هدایت شده قبلی هماهنگ می‌شوند تا مسیر درست پهپاد را حفظ کنند. هر نقطه راه هدایت شده با مجموعه‌ای از متغیرها نشان داده می‌شود $[x, y, \theta, T]$ ، که در آن $[x, y]$ مختصات نقاط راه، θ عنوان بخش مسیر بعدی و T زمان صرف شده برای تولید نقطه راه جدید در یک مطالعه اخیر [۳۸]، الگوریتم مبتنی بر چرخه محدود برای رهگیری یک هدف متحرک با سرعت نامعلوم پیاده سازی شده است. فیلتر کالمن برای محاسبه موقعیت و سرعت هدف استفاده می‌شود. هر هدف با بردار حالت $X_k = [X_t, Y_t, \theta_t]$ نشان داده می‌شود که در آن $[X_t, Y_t, \theta_t]$ نشان دهنده موقعیت اولیه و عنوان هدف است و $[X_t, Y_t, \theta_t]$ موقعیت و

ازدحامی ذرات معمولی گنجانده نشد، توسط شی و ابرهارت^۱ در سال ۱۹۹۸ [۶۹] گنجانده شد.



شکل ۲ - ارائه و نمایش مدل بهینه‌سازی هوش جمعی

در شکل ۲ نشان داده شده‌است. در این شکل، خطوط پررنگ، سرعت و موقعیت ذره را پس از هر تکرار نشان می‌دهد. خطوط نقطه چین اجزای معادله (۷) را نشان می‌دهند، در حالی که X و Y به ترتیب جهت افقی و عمودی جستجو را در یک فضای راه حل نشان می‌دهند. نویسندگان متعددی یک نسخه اصلاح‌شده از بهینه‌ساز ازدحام ذرات را برای رهگیری اهداف متحرک با تطبیق تئوری دگرگراف^۲ پیشنهاد کردند. آن‌ها فرض کردند که زمان صرف شده توسط هر پهباد برای انجام وظیفه (حمله) در مقایسه با زمان صرف شده توسط هر پهباد برای رسیدن به هدف ناچیز است. تعداد پهپادهای مورد نیاز برای رهگیری هر هدف با توجه به ویژگی آن هدف محاسبه می‌شود. برای افزایش سرعت همگرایی الگوریتم، آن‌ها پیشنهاد کردند که وزن اینرسی (W) را به صورت خطی از $1/2$ به $0/2$ کاهش دهند و مقادیر $C1$ ، $C2$ را به ترتیب از $2/0.5$ به $0/4$ و $3/7$ تغییر دهند. در مرجع [۴۵] رویکرد جدیدی ارائه شد. با PSO در گروهی از پهپادها اجرا شد که در آن هر ذره توسط سه بردار تعریف می‌شد: موقعیت، سرعت و بهترین موقعیت ذره. بهترین موقعیت ذره (که توسط خود الگوریتم تعیین می‌شود) موقعیت‌های قبلی هر ذره را دنبال می‌کند و بهترین موقعیت کل ازدحام با توجه به مجموعه بهترین موقعیت ذره محاسبه می‌شود.

در این پیاده‌سازی، کل گروه به دو گروه تقسیم می‌شود: یکی برای رهگیری هدف و دیگری برای گشت‌زنی. وظیفه گروه گشت‌زنی شناسایی مهاجم و هشدار به گروه رهگیری است. اخیراً، زیتگ و همکاران [۴۶] یک نسخه بهبود یافته از PSO را برای حل مشکل حداقل‌های محلی راه حل و عدم توانایی جستجوی دقیق محلی در طول

دارد در حالی که بهره‌برداری به جستجوی محلی در اطراف مناطق مناسب یافت شده در مرحله اکتشاف اشاره دارد.

غنی‌فر و همکاران [۹۳ و ۹۲] با کمک الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات، ابتدا، ضرایب کنترل‌کننده حلقه بسته با استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند را محاسبه نموده و در کنترلر پهباد خود استفاده نمودند.

۵ الگوریتم‌های مبتنی بر هوش ازدحام برای برنامه‌ریزی مسیر رهگیری هدف

در این بخش، انواع متمایز الگوریتم‌های مبتنی بر هوش جمعی برای برنامه‌ریزی مسیر رهگیری هدف توسط گروهی از پهپادها را مورد بحث قرار می‌دهیم و بهبودهایی را برای بهینه‌سازی مسیر توصیه می‌کنیم.

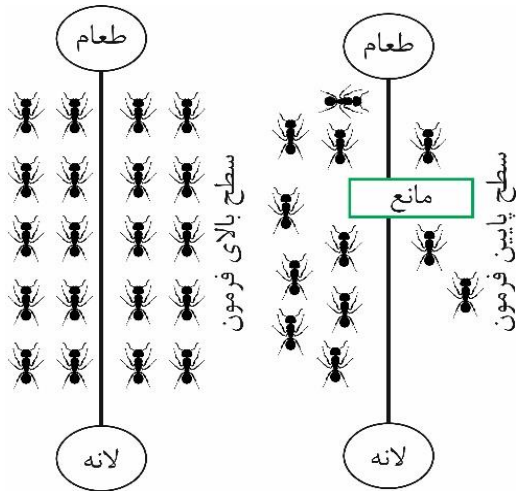
۱.۵ بهینه‌سازی ازدحام ذرات

بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک الگوریتم مبتنی بر هوش جمعی است که برای اولین بار توسط کندی و ابرهارت برای ارائه یک شبیه‌سازی گرافیکی از رفتار دسته جمعی پرندگان ارائه شد. در بهینه‌سازی ازدحام ذرات، هر راه حل بالقوه به عنوان یک ذره در نظر گرفته می‌شود که سرعت و موقعیت تصادفی خود را در فضای جستجو دارد. فضای جستجو به عنوان مجموعه‌ای از همه راه‌حل‌های احتمالی برای مسئله بهینه‌سازی شده تعریف می‌شود. هر ذره با توجه به بهترین محلول (تناسب) در فضای محلول به بهترین موقعیت و سرعت خود می‌رسد. ذره T ام در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سرعت و موقعیت خود را در هر مرحله T ام مطابق معادلات زیر به روز می‌کند.

$$V_i^{T+1} = W * V_i^T + r_1 * C_1 * (P_{best} - X_i^T) + r_2 * C_2 * (G_{best} - X_i^T) \quad (9)$$

$$X_i^{T+1} = X_i^T + V_i^T \quad (10)$$

در جایی که X_i^T و V_i^T نشان دهنده موقعیت و بردار سرعت ذره i در ازدحام هستند، W نشان‌دهنده وزن اینرسی برای حفظ تعادل بین توانایی جستجوی محلی و جهانی است و $C1$ ، $C2$ نشان‌دهنده ثابت شتاب است و توسط کاربر از پیش تعریف شده‌است. $r1$ و $r2$ اعداد تصادفی تولید شده در محدوده [۱] هستند. P_{best} بهترین موقعیت شخصی ذره i در زمان T است و G_{best} بهترین موقعیت جهانی i امین ذره در ازدحام است. اصطلاح وزن اینرسی (W) در ابتدا در بهینه‌سازی



شکل ۳ - رفتار جستجوی مورچه‌ها در بهینه‌ساز کلونی مورچه‌ها

سپس کلونی مورچه‌ها به طور جمعی کوتاه‌ترین مسیر را بر اساس چگالی دنباله فرمون تعیین می‌کند. یک رویکرد چند مستعمره ای بر اساس ACO توسط نویسندگان در مرجع [۵۰] برای جلوگیری از برخورد بین پشه‌ها و به حداقل رساندن زمان خالی برای انجام وظیفه (جستجو و حمله) اجرا شد. در این سیستم، گروهی از پشه‌ها، کوتاه‌ترین مسیر را از i امین گره تا گره z ام، در یک نمودار جهت‌دار که محیط را نشان می‌دهد، بر اساس N زمان پرسه‌زدگی مختلف قبلی که توسط کلنی مورچه‌ها گرفته شده بود، انتخاب کردند. نتایج تجربی به وضوح نشان می‌دهد که با اجرای این رویکرد، زمان صرف شده برای تکمیل کار کاهش می‌یابد. همانطور که توسط گائو و همکاران بیان شده‌است.

چالش اصلی در استفاده از ACO برای انبوهی از پشه‌ها برای جستجوی هدف و حمله، هموارسازی مسیر و به‌روزرسانی فرمون است. هموارسازی مسیر برای تعیین کوتاه‌ترین مسیر بین هر دو نقطه ضروری است و میزان ترشح فرمون توسط مورچه‌ها در منطقه جستجوی غذا بسیار مهم است. مورچه‌ها حرکت خود را بر اساس آن مقدار تعیین می‌کنند. نویسندگان اصلاحیه‌ای را در ACO پیشنهاد کرده‌اند با معرفی یک آستانه تکرار، هر مورچه پردازنده خود را برای مقابله با مشکل لوکال مینیمم و برقراری ارتباط مناسب با سایر مورچه‌ها دارد. برای جلوگیری از رفتار نوسانی مورچه‌ها، یک قانون جدید به روزرسانی فرمون برای جستجوی کلی به شرح زیر پیشنهاد شد.

$$T_{(x,y)}^i(K+1) = T_{(x,y)}^i(K) + f * \Delta T_{g0} \quad (14)$$

زمان اجرا پیشنهاد کرد. کل ازدحام با توجه به عملکرد تناسب هر ذره به گروه‌های فرعی تقسیم می‌شود و سپس حداکثر مقدار تناسب برای کل ازدحام بر اساس حداکثر ارزش تناسب هر متر زیرمجموعه محاسبه می‌شود.

$$V_i^{T+1} = W * V_i^{T-1} + r_1 * C_1 * Sub_1 + r_2 * C_2 * Sub_2 \quad (11)$$

هر ذره سرعت و موقعیت خود را مطابق معادله زیر به روز می‌کند.

$$Sub_1 = P_{best} + Swarm \quad (12)$$

$$Sub_2 = G_{best} + Swarm \quad (13)$$

که در آن Sub_1 و Sub_2 در هر مرحله T طبق معادلات زیر به روز می‌شوند. در مرجع [۴۷]، نویسندگان یک الگوریتم بهینه‌سازی ذرات را برای برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی پشه‌ها پیشنهاد کردند که راه حل سریع و بهینه‌تری دارد. در این الگوریتم نقشه لجستیک مبتنی بر آشوب برای استقرار اولیه ذرات در فضای جستجو به کار گرفته شده‌است. پس از آن، استراتژی جهش اتخاذ می‌شود در حالی که ضرایب شتاب (C_1 ، C_2) و حداکثر سرعت برای به‌دست آوردن راه حل بهینه تطبیق داده می‌شوند. در مرجع [۴۸]، یک الگوریتم ترکیبی PSO و میدان پتانسیل مصنوعی پیشنهاد شده‌است. الگوریتم پیشنهادی سریع است و مسیر بهینه را در محیط غنی از مانع پیدا می‌کند. نسخه بهبودیافته PSO در مقایسه با نسخه اصلی PSO در مورد محیط‌های پیچیده برای جلوگیری از موانع نتیجه مطلوب‌تری به‌دست می‌آورد.

۲.۵ بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها

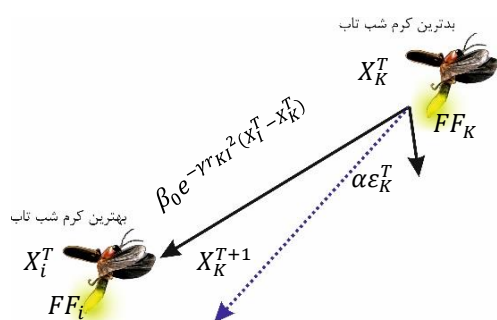
بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها در ابتدا توسط دوریگو^۱ و همکاران پیشنهاد شد [۴۹]. این الگوریتم به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی چند بعدی که از رفتار جستجوی یک گونه مورچه خاص الهام گرفته شده‌است. مورچه‌ها به طور تصادفی در جستجوی غذا با گذاشتن ماده شیمیایی به نام فرمون از آن به‌عنوان بازخورد برای بازگشت به لانه استفاده می‌کنند. انتخاب مسیر توسط مورچه‌های دیگر نیز بر اساس دنباله فرمون است. تراکم دنباله فرمون در طول مسیر، احتمال اینکه مورچه‌های دیگر همان مسیر را انتخاب کنند و در نتیجه مسیرهای فرمونی در آن مسیر مترکم‌تر می‌شوند را افزایش می‌دهد. نمایش مدل ACO در شکل ۳ نشان داده شده‌است.

1. Dorigo

- روشنایی هر کرم شبتاب نشان‌دهنده یک راه‌حل ممکن برای مسئله بهینه‌سازی است و متناسب با تابع تناسب است. جذابیت (β) یک کرم شبتاب که توسط یک کرم شبتاب مجاور دیده می‌شود با توجه به فاصله (r) متفاوت است و به شرح معادله (۱۵) است.

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (15)$$

که β_0 جذابیت را در فاصله صفر تعریف می‌کند ($r = 0$)، و γ نشان دهنده ضریب جذب نور محیط است.



شکل ۴ - رفتار جذب کردن حشره شب تاب در مدت گشتن به دنبال بهترین جواب در دامنه مورد نظر

کرم شبتاب به سمت کرم شب تاب با توجه به معادله زیر روشن‌تر حرکت می‌کند.

$$X_K^{T+1} = X_K^T + \beta_0 e^{-\gamma r^2} (X_i^T - X_K^T) + \alpha \epsilon_K^T \quad (16)$$

که در آن X_K^{T+1} موقعیت جدید کرم شب تاب k را پس از یک بازه زمانی واحد ($T+1$) نشان می‌دهد. X_K^T و X_i^T به ترتیب موقعیت کرم شب تاب l و k را در زمان T تعریف می‌کنند. فاصله اقلیدسی بین دو کرم شب تاب با r_{kl} نشان داده می‌شود. ϵ_K^T بردار اعداد تصادفی است که با توزیع یکنواخت بین صفر و یک فرموله شده‌است. α پارامتر تصادفی‌سازی است که برای بهبود کیفیت بهینه‌سازی استفاده می‌شود. مقدار بیشتر α منجر به قابلیت جستجوی جهانی بهتر الگوریتم می‌شود.

لیو و همکاران [۵۱] پارامتر جذب تطبیقی (γ_i) و تصادفی‌سازی (α_i) را برای برنامه‌ریزی مسیر کارآمد برای رهگیری هدف در محیط استاتیک طراحی کرد. برای افزایش سرعت همگرایی الگوریتم FA، پارامتر جذب طبق رابطه (۱۷) فرموله شد.

$$\gamma_i = \gamma_0 + \frac{(\gamma_f - \gamma_0)}{n} \quad (17)$$

که در آن $T_{(x,y)}^i(K+1)$ سطح فرمون بعد از هر تکرار است، f عدم قطعیت در محیط را نشان می‌دهد و T_{g0} ضریب به روز رسانی فرمون جهانی را نشان می‌دهد.

ACO بهبود یافته برای برنامه‌ریزی مسیر رهگیری چندین هدف از طریق وسایل نقلیه هوایی جنگی بدون سرنشین هماهنگ (UCAV) به کار گرفته شد. نویسندگان سه UCAV (به‌عنوان UCAV I، UCAV II و UCAV III) و دو هدف را در نظر گرفته‌اند که در آن هر UCAV مجهز به یک دستگاه حمله کننده‌است. اهداف توسط UCAV I با استفاده از حسگرهای داخلی آن شناسایی می‌شوند. پس از شناسایی هدف، UCAV I با در نظر گرفتن محدودیت‌های محیطی، مسیرهای بهینه را برای همه UCAV‌ها ایجاد می‌کند. UCAV II و UCAV III تمام اطلاعات مربوط به مسیرها را از UCAV I دریافت می‌کنند و این مسیرها را دنبال می‌کنند. روش شبه طیفی نورد (RPM) با ACO بهبود یافته برای برنامه‌ریزی مسیر بهتر و برای مقابله با محدودیت‌های دینامیکی مربوط به عدم قطعیت در محیط استفاده شد. روش RPM از گسسته‌سازی متغیرهای کنترل و حالت برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌کند.

در مرجع [۴۹، ۵۰] یک رویکرد ترکیبی از الگوریتم ACO و میدان پتانسیل مصنوعی (APF) برای برنامه‌ریزی ماموریت مشترک ازدحام پهپاد در یک محیط پویا نامشخص پیشنهاد شده‌است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که رویکرد ترکیبی پیشنهادی به طور موثر مأموریت را اجرا می‌کند و از موانع بدون برخورد اجتناب می‌کند. یک الگوریتم ACO بهبود یافته برای برنامه‌ریزی مسیر پهپاد در منطقه پیچیده کوهستانی برای عملیات نجات اضطراری پیشنهاد شده‌است. رویکرد پیشنهادی از ساختار چند ضلعی تاپسون برای ساخت راه‌حل اولیه استفاده می‌کند و راه‌حل سریع‌تری با حداقل طول مسیر در مقایسه با الگوریتم سنتی ارائه می‌دهد.

به طور کلی، نسخه پیشرفته ACO می‌تواند مسیر صافی را از موقعیت شروع UCAV تا موقعیت هدف به روشی بسیار کارآمد ایجاد کند و از PSO و الگوریتم ژنتیک بهتر عمل کند.

۵.۳ الگوریتم کرم شبتاب

الگوریتم کرم شبتاب (FA) توسط Xin-She Yang در سال ۲۰۰۸ تعریف شد. این الگوریتم از الگوی چشمک‌زن در مناطق گرمسیری برای جذب سایر کرم‌های شبتاب الهام گرفته شده‌است. نمایش الگوریتم کرم شب تاب در شکل ۴ نشان داده شده‌است. FA با در نظر گرفتن سه قانون زیر فرموله شده‌است.

- همه کرم شب تاب‌ها تک جنسیتی هستند.
- جذابیت هر کرم شبتاب باشد تنور آن نسبت مستقیم دارد.

می‌کنند. زنبورهای شاغل برای به اشتراک گذاشتن اطلاعات منبع غذایی با یکدیگر و (۳) زنبورهای پیشاهنگی که وظیفه جستجوی تصادفی منابع غذایی جدید را بر عهده دارند. پس از اتمام منبع غذایی، زنبورهای شاغل به زنبورهای پیشاهنگ تبدیل می‌شوند تا به دنبال منبع غذایی دیگری بگردند. نمایش الگوریتم خفاش در شکل ۶ نشان داده شده‌است. این فرآیند تا زمانی که تمام منابع غذایی توسط زنبورهای شاغل تمام شود ادامه دارد. نویسندگان در مرجع [۵۳]، ABC را برای برنامه‌ریزی مسیر و رهگیری هدف از طریق UCAV با تطبیق مدل چگالی احتمال پیاده‌سازی کردند. برای نمایش تهدیدها از مدل چگالی احتمال استفاده شد. در این روش پیشنهادی، راه حل با اجتناب از تهدیدات، به حداقل رساندن مصرف انرژی و کوتاه کردن فاصله منبع تا هدف ایجاد می‌شود. هر راه حل به‌عنوان یک "منبع غذایی" نشان داده شده‌است. UCAV ها موقعیت و سرعت خود را در فضای محلول با توجه به منبع هدف تنظیم می‌کنند که توسط UCAV استفاده شده به روز شده‌است. احتمال انتخاب منبع غذایی با استفاده از رابطه ۲۳ محاسبه می‌شود.

$$P_i = \frac{obj(F_i)}{\sum_{i=1}^n obj(F_i)} \quad (23)$$

که در آن $Obj(F_i)$ بهترین مقدار تناسب منبع غذایی پنجم است و n نشان دهنده تعداد کل منابع غذایی است. یک الگوریتم ذخیره حافظه معروف به الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی فشرده (CABC) توسط نویسندگان در مرجع [۹۵] پیشنهاد شد، که در آن مدل ریاضی طول مسیر و تهدیدها در تابع هدف برای برنامه‌ریزی مسیر موثر و رهگیری هدف گنجانده شد. در الگوریتم CABC، یک PDF برای تولید راه حل بهینه استفاده شد.

در مطالعه دیگری، الگوریتم ABC با انطباق استراتژی تعادل-تکامل برای تشکیل یک روش برنامه‌ریزی مسیر همه جا حاضر و روش رهگیری هدف برای پهپادها اصلاح شد. در استراتژی تکامل تعادل، تعادل بین بهره‌برداری و اکتشاف برای جستجوی هدف توسط پهپادها به دلیل وضعیت همگرایی داخلی در طول فرآیند تکرار حفظ می‌شود. نویسندگان، از طریق نتایج تجربی، نشان می‌دهند که استراتژی پیشنهادی در اجتناب از تهدیدات و رهگیری هدف در یک محیط پویا کارآمد است. قابلیت بهره‌برداری کارآمد الگوریتم ABC آن را برای برنامه‌ریزی مسیر در یک محیط ایستا با اهداف متعدد مناسب می‌کند و از SA، DE، BA و SA بهتر عمل می‌کند.

۵.۶ بهینه‌سازی تغذیه باکتری

الگوریتم بهینه‌سازی تغذیه باکتری (BFOA) توسط کوین پاسینو [۵۴] در سال ۲۰۰۲ معرفی شد. این الگوریتم از رفتار کموتاکتیک باکتری

که با نگه داشتن مقادیر نرخ پالس انتشار در ۰.۶ و بلندی صدا در ۰.۹۵، بهترین نتیجه به‌دست آمد.

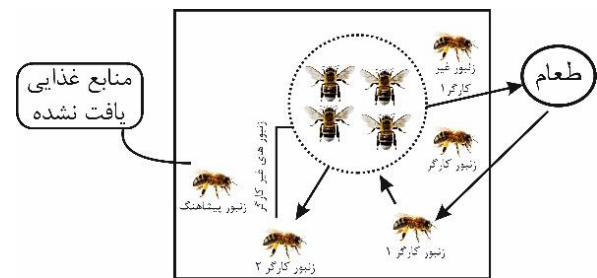
در BA ساده، راه حل بهینه با استفاده از پیاده روی تصادفی ایجاد می‌شود که سرعت همگرایی الگوریتم را کاهش می‌دهد. به منظور حذف این مشکل، یک عامل وزن جهش در نظر گرفته شد. راه حل بهینه جدیدی با توجه به رابطه ۲۲، برای افزایش کارایی جستجو و سرعت همگرایی الگوریتم محاسبه شد

$$X_{NEW} = X_{R1}^T + (X_{R2}^T - X_{R3}^T)F \quad (22)$$

که در آن X_{NEW} راه حل بهینه جدید را نشان می‌دهد. $X_{R1}^T, X_{R2}^T, X_{R3}^T$ اعدادی با توزیع یکنواخت هستند و F نشان دهنده ضریب وزنی جهش است. در مرجع [۵۲]، نویسندگان یک BA بهبود یافته برای ردیابی یک هدف مهاجم در میدان نفتی پیشنهاد کردند. در ابتدا، از یک روش پیش‌بینی برای تخمین مسیر هدف مهاجم استفاده می‌شود و پس از آن از BA های بهبود یافته برای بهینه‌سازی مسیر ردیابی پهپادها استفاده می‌شود. الگوریتم بهبود یافته از قابلیت جستجوی غذا در الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه برای جلوگیری از بهینه‌سازی محلی و بهبود پایداری استفاده می‌کند. الگوریتم خفاش در مقایسه با GA، ACO و DE قابلیت کاوش خوبی دارد و بنابراین کارایی آن را برای ایجاد کوتاه‌ترین مسیر از شروع تا موقعیت هدف در یک دوره کوتاه تأیید می‌کند.

۵.۵ بهینه‌سازی کلونی زنبورهای مصنوعی

الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC) توسط کارابوگا [۵۳] بر اساس رفتار جستجوی عسل فرموله شد.



شکل ۶- رفتار جستجوی زنبورها در الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی

زنبورها، برای حل یک مسئله بهینه‌سازی چند بعدی. در الگوریتم ABC راه حل احتمالی هر مشکلی با منبع غذایی نشان داده می‌شود و زنبورهای عسل مسئولیت جستجوی منبع غذایی جدید را دارند. در ABC، کلنی زنبورهای مصنوعی به سه گروه تقسیم می‌شوند: (۱) زنبورهای شاغل، که در آن تعداد زنبورهای گروه با منابع غذایی نزدیک کندو مرتبط است، (۲) زنبورهای تماشاچی که رقص تکان دادن را تماشا

استفاده می‌شود. $\phi(j)$ جهت تصادفی طول واحد تولید شده را نشان می‌دهد که به‌طور یکنواخت در محدوده $[0, 2\pi]$ توزیع شده‌است. یانگ و همکاران [۵۵] یک رویکرد فراگیر برای تخصیص هدف چند UCAY در یک محیط پویا با استفاده از یک الگوریتم جستجوی باکتریایی با استراتژی تخصیص مجدد ترکیبی پیشنهاد کرد. در این رویکرد، هر UCAY به‌عنوان باکتری نشان داده می‌شود و ماده مغذی (هدف) را در یک محیط پویا جستجو می‌کند، جایی که موقعیت موانع ثابت نیست. یک استراتژی تخصیص مجدد ترکیبی برای افزایش سرعت همگرایی BFOA اصلی استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی به وضوح نشان می‌دهد که با حفظ اندازه گام 0.2 ، هر UCAY در مدت زمان کوتاهی به هدف اختصاص می‌یابد.

یک الگوریتم کنترل غیرمتمرکز، بر اساس BFOA توسط نویسندگان در مرجع [۵۵] برای رهگیری هدف توسط گروهی از ربات‌های متحرک به کار گرفته شد. در این الگوریتم، هر ربات "باکتریایی" بر اساس غلظت، با اتخاذ حداقل طول مسیر و حداقل تعداد چرخش، ماده مغذی (هدف) را پیدا می‌کند. حرکت هر ربات "باکتریایی" با مرحله کموتاکتیک به شرح زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = B\delta + Ad_i \quad (25)$$

جایی که $P_i(t)$ نشان دهنده موقعیت ربات i است، δ نشان دهنده جهت حرکت ربات است، A و B به ترتیب ضرایب d_i و δ هستند، d_i مجموع تجمعی تعامل ربات i با سایر ربات‌ها است. برای جلوگیری از برخورد، و با استفاده از رابطه ۲۶ قابل محاسبه است.

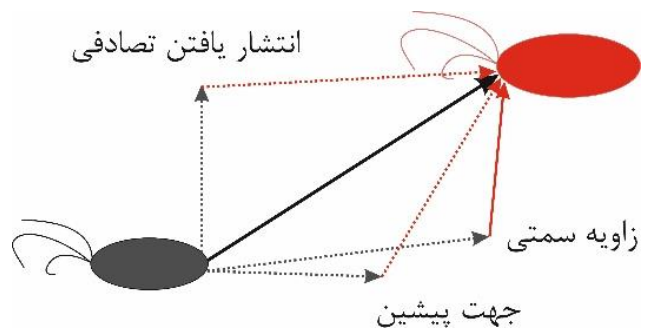
$$d_i = \sum_{n=1}^{C_i} d_i^n \quad (26)$$

که C_i نشان دهنده تعداد همسایگان برای ربات i و d_i^n نشان دهنده تعامل i امین ربات با ربات n است و به‌صورت زیر قابل محاسبه است.

$$d_i^n = \frac{(N_i - N_m)}{\|N_i - N_m\|} \quad (27)$$

که در آن N_i و N_m به ترتیب نشان دهنده تعداد i امین و m امین ربات است. در مرجع [۵۵]، نویسندگان یک الگوریتم بهبود یافته BFOA را برای برنامه‌ریزی مسیر وسایل نقلیه سطحی بدون سرنشین (USV) تحت محیط شبکه پیشنهاد کردند. در این رویکرد، الگوریتم A^* در BFOA گنجانده شده‌است و برای برنامه‌ریزی مسیر جهانی USV در

اشریشیا کلی (E. coli) در یک محیط مغذی الهام گرفته شده‌است. باکتری E. coli در حین جستجوی مواد مغذی (هدف) موجود در محیط، با کمک تازک به حرکت خود دست می‌یابد. در طول جستجوی مواد مغذی، این باکتری از نظر بیولوژیکی دارای دو نوع حرکت است: یکی «شنا» و دیگری «جلوگیری». شنا فرآیندی است که در آن باکتری در جهت خاصی حرکت می‌کند و غلتیدن فرآیند تغییر جهت حرکت است. مفهوم اساسی الگوریتم BFO این است که باکتری‌هایی که استراتژی جستجوی خوبی دارند زنده می‌مانند، درحالی که باکتری‌هایی با استراتژی علوفه یابی ضعیف از بین می‌روند. نمایش مدل BFO در شکل ۷ نشان داده شده‌است. BFOA از چهار مرحله تشکیل شده‌است: کموتاکسی، ازدحام، تولید مثل، و حذف - پراکندگی، کموتاکسی رویدادی است که در آن باکتری‌ها با دوری از محیط مضر با گام‌های کوچک به سمت ماده مغذی حرکت می‌کنند.



شکل ۷ - رفتار جستجو کردن مدل باکتری‌ها

فرآیندی که در آن باکتری‌ها خود را در یک الگوی حلقه قرار می‌دهند و سپس برای جستجوی مواد مغذی با هم حرکت می‌کنند، به‌عنوان ازدحام شناخته می‌شود. در مرحله تولید مثل، کمترین باکتری‌های سالم (ارزش تناسب اندام کمتر) دور ریخته می‌شوند و باکتری‌های سالم (ارزش تناسب اندام بالا) برای حفظ اندازه ازدحام به دو باکتری تقسیم می‌شوند. حذف-پراکندگی مرحله نهایی است که در آن باکتری‌ها با توجه به احتمال پراکندگی و حذف توصیف شده در محیط جدید پراکنده می‌شوند. در هر مرحله کموتاکتیک، حرکت تک باکتری به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i)\phi(i) \quad (28)$$

که در آن $\theta^i(j, k, l)$ موقعیت i امین باکتری را در گام‌های کموتاکتیک z در داخل مرحله k th باروری دومین رویداد حذف-پراکندگی نشان می‌دهد. $C(i)$ برای تعیین اندازه گام در حین دویدن و غلت زدن باکتری

پرواز می‌کنند. کبوترهایی که هنوز از محل مورد نظر دور هستند و با مکان‌های دیدنی آشنا نیستند به دنبال کبوترانی هستند که با مکان مورد نظر آشنا هستند. در این عملگر، i امین کبوتر موقعیت خود را در تکرار k با توجه به معادلات زیر به روز می‌کند.

$$N_p(k) = \frac{N_p(k-1)}{2} \quad (30)$$

$$X^c(k) = \frac{\sum X^i(k) \cdot fitness(X^i(k))}{N_p \sum fitness(X^i(k))} \quad (31)$$

$$X^i(k) = X^i(k-1) + rand * (X^c(k) - X^i(k-1)) \quad (32)$$

که در آن $X^c(k)$ موقعیت مرکزی کبوتر i در تکرار k و N_p تعداد کبوتر است. کیفیت کبوتر من با عملکرد تناسب اندام نشان داده می‌شود $f_{min}(X^i(k)) + \epsilon$ برای حل مسئله حداکثر بهینه‌سازی، تابع تناسب را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$fitness(X^i(k)) = f_{max}(X^i(k)) \quad (33)$$

ژانگ و همکاران [۵۷] طعمه شکارچی و PIOA را ترکیب کردند. در این الگوریتم، مفهوم شکارچی-شکار برای حذف تمایل PIOA پایه به همگرایی در یک راه حل محلی استفاده شد. مدل‌سازی شکارچیان بر اساس بدترین راه حل‌ها است و به صورت ریاضی به صورت زیر قابل ارائه است.

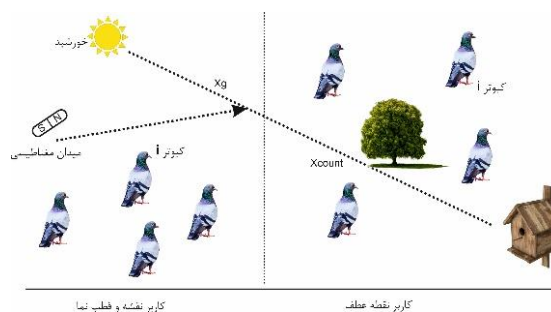
$$K^{predator} = K^{worst} + \delta \left(1 - \frac{T}{T^{max}}\right) \quad (34)$$

در جایی که $K^{predator}$ یک راه حل ممکن را نشان می‌دهد، K^{worst} بدترین راه حل را در فضای راه حل ارائه می‌دهد، سرعت شکار با δ ، T و T^{max} به ترتیب نشان دهنده تکرار فعلی و حداکثر تعداد تکرار است. نویسندگان همچنین دریافته‌اند که الگوریتم بهینه‌سازی الهام گرفته از کبوتر شکارچی (PPIOA) از نظر استحکام و سرعت هم‌گرایی نسبت به تکنیک‌های مختلف تکامل برتر است. در این مطالعه اخیر، یک مدل ترکیبی از تابع پتانسیل لبه (EPF) و PIOA برای شناسایی و رهگیری هدف توسط گروهی از پهپادها در ارتفاع کم پیشنهاد شده است. EPF روشی است که برای آن استفاده

محیط‌های کاری مختلف آزمایش می‌شود. به دلیل تعداد کمتر پارامترهای تنظیم، الگوریتم BFO برای مواردی که شرایط وجود دارد مناسب‌ترین است. تخصیص هدف پهپادهای متعدد در یک محیط پویا و تولید نتایج قابل اعتماد در مقایسه با BA، ACO، و PSO.

۷.۵ بهینه‌سازی الهام گرفته از کبوتر

الگوریتم بهینه‌سازی الهام گرفته از کبوتر یک الگوریتم هوش جمعی تصادفی است و توسط هابین دوان و پی‌کسین کوآ [۵۶] در سال ۲۰۱۴، بر اساس رفتار خانه نشینی کبوترها معرفی شد. کبوترها از میدان مغناطیسی زمین، موقعیت خورشید و نقاط دیدنی خاص برای یافتن راه خانه خود استفاده می‌کنند. نمایش مدل PIO در شکل ۸ نشان داده شده است. در PIOA، حرکت هر کبوتر توسط دو عملگر ریاضی تعریف می‌شود، یکی عملگر نقشه و قطب نما و دیگری عملگر نقطه عطف است.



شکل ۸ - روند بهینه‌سازی مدل الگوریتمی کبوترها

در نقشه و عملگر قطب‌نما، موقعیت و سرعت کبوتر i در چند بعد در فضا در هر تکرار به روز می‌شود که به صورت معادلات زیر است:

$$V^i(K) = V^i(K-1) * e^{-pk} + rand * (X^g - X^i(k-1)) \quad (28)$$

$$X^i(K) = X^i(K-1) + V^i(K) \quad (29)$$

که در آن $V^i(K)$ و $X^i(K)$ به ترتیب سرعت و موقعیت i امین کبوتر در تکرار k هستند. P نشانگر نقشه و عملگرهای قطب نما برای یافتن مسیر و جهت صحیح است. X^g نشان دهنده بهترین موقعیت جهانی فعلی کبوتر چهارم است و رند هر عدد تصادفی بین صفر و یک است. در اپراتور نقطه عطف، تعداد کبوترها (N_p) در تکرار k به نصف کاهش می‌یابد و کبوترهای باقی مانده مستقیماً به سمت هدف

مسأوی لوسیفیرین هستند. بر اساس قانون گذار، همه عوامل از دو مرحله عبور می کنند: فاز به روز رسانی لوسیفیرین و مرحله حرکت. در مرحله به روز رسانی لوسیفیرین، عوامل مقدار لوسیفیرین خود را در هر تکرار به شرح زیر به روز می کنند.

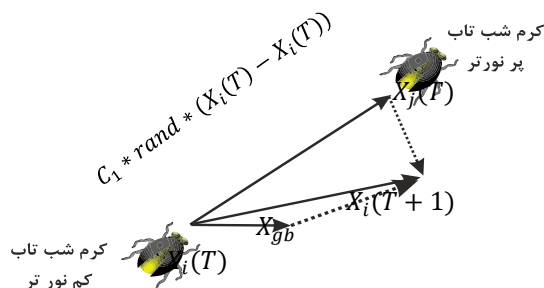
$$L_j(T+1) = (1 - \rho)L_j(T) + \gamma J_j(T+1) \quad (35)$$

جایی که $L_j(T)$ نشان دهنده مقدار لوسیفیرین عامل j در زمان T است، γ نشان دهنده ثابت افزایش لوسیفیرین، ρ ثابت فروپاشی لوسیفیرین است ($0 < \rho < 1$)، و $J_j(T)$ مقدار تابع هدف را در مکان عامل j در زمان T . در مرحله حرکت، هر یک از کرم های درخشان مکانیزم احتمالی را به سمت کرم درخشانده همسایه که دارای مقدار لوسیفیرین بالاتر از خود است، تنظیم می کند. در هر تکرار، مدل ریاضی حرکت کرم درخشان i به سمت کرم درخشان تر j با معادله (۳۵) ارائه می شود.

$$X_i(T+1) = X_i(T) + S \frac{X_j(T) - X_i(T)}{\|X_j(T) - X_i(T)\|} \quad (36)$$

که در آن S اندازه گام را نشان می دهد و $X_i(T)$ نشان دهنده موقعیت کرم درخشان i در زمان T است. نمایش مدل GSOA در شکل ۹ نشان داده شده است. تانگ^۲ و همکارانش به منظور غلبه بر این مشکل، GSOA و PSO را ترکیب کرده است، جایی که مقدار لوسیفیرین با نقاط راه نشان داده می شود. موقعیت بهینه جدید UCAV در فضای جستجوی بعدی D به شرح زیر محاسبه می شود.

$$X_i(T+1) = X_i(T) + C_1 * rand * (X_j(T) - X_i(T)) + C_2 * rand * (X_{gb}(T) - X_i(T)) \quad (37)$$



شکل ۹ - حرکت کرم درخشان در بهینه سازی جمعی کرم های درخشان

می شود، تشخیص مبتنی بر لبه در تصاویر دیجیتال. هر پهباد از تابع EPF برای تعیین موقعیت هدف استفاده می کند. هائو و همکاران یک PIOA اصلاح شده برای حل مسئله تخصیص و رهگیری چندگانه در یک محیط پویا ارائه کرد. یک رویکرد جهش افزایش غیرخطی برای ایجاد تعادل بین سرعت و قابلیت جستجوی جهانی پهبادها در نقشه و عملگر قطب نما (P) اجرا شد. برای افزایش سرعت همگرایی الگوریتم با مراجعه به الگوریتم ژنتیک، یک متقاطع جهش نیز اجرا شد. نتایج شبیه سازی سناریوهای مختلف نشان می دهد که PIOA اصلاح شده پیشنهادی نیز قادر به یافتن راه حل بهینه در یک دنیای پویا واقعی است. در این مطالعه اخیر، نویسندگان یک PIOA کوشیموتاسیون قوی را برای برنامه ریزی مسیر پهبادهای متعدد پیشنهاد کردند. از نظر ریاضی، توزیع کوشی، توزیع احتمال پیوسته بدون واریانس و انتظار است. نویسنده استحکام الگوریتم پیشنهادی را با کاوش در یک محیط متفاوت مانند توپوگرافی فلات و محیط باد محور فلات بررسی کرد. PIOA مبتنی بر کوانتومی تطبیقی برای برنامه ریزی مسیر پهباد در محیط های پیچیده پیشنهاد شده است. این الگوریتم از نگاهت منطقی برای مقداردهی اولیه جمعیت در فضای جستجو استفاده می کند و با متعادل کردن پارامترهای عامل تعادل بین جستجوی محلی و جستجوی جهانی را حفظ می کند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که رویکرد پیشنهادی نتایج بهتری نسبت به PSO از نظر میزان همگرایی و دقت ارائه می دهد. تعادل خوب بین بهره برداری و توانایی جستجوی اکتشاف، PIO را به عنوان یک الگوریتم تثبیت شده برای حل مشکل تخصیص هدف چندگانه در یک محیط پویا در دنیای واقعی تبدیل می کند.

۵. الگوریتم بهینه سازی ازدحام کرم درخشان

الگوریتم بهینه سازی ازدحام کرم درخشان توسط کریشان و گوس [۵۸] در سال ۲۰۰۵ پیشنهاد شد. این یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر SI است که بر اساس رفتار بیولومینسانس کرم درخشان است و می تواند راه حل های بهینه محلی متعددی را برای توابع چند وجهی ایجاد کند که از راه حل های متعدد تشکیل شده است. کیفیت منحصر به فرد GSO توانایی آن در به روز رسانی دامنه تصمیم محلی هر کرم درخشان است که منجر به تولید زیرگروه های ازدحام می شود و آن ها را قادر می سازد در چندین راه حل بهینه به طور همزمان همگرا شوند. در GSO، هر عامل (کرم درخشان) حامل یک مقدار لومینسانس معروف به "لوسیفیرین" که همچنین به عنوان رسانه ارتباطی بین عوامل عمل می کند. حالت اولیه GSO شامل توزیع تصادفی هر عامل در فضای محلول است و همه عوامل دارای مقدار

زودرس به‌عنوان همگرایی الگوریتم مبتنی بر هوش جمعی قبل از رسیدن به یک راه حل بهینه جهانی تعریف می‌شود و معمولاً به دلیل عدم تنوع رخ می‌دهد. مقیاس پذیری الگوریتم مبتنی بر هوش جمعی به توانایی الگوریتم برای کنترل تعداد بیشتری از ربات‌ها و اهداف بدون تأثیر بر عملکرد کلی اشاره دارد. دلیل اصلی مقیاس پذیری استفاده از محلی است.

ارتباط و حس اخیراً در مرجع [۴۴]، نویسندگان به وضوح مقیاس پذیری الگوریتم‌های مبتنی بر هوش جمعی را نشان داده‌اند و با در نظر گرفتن حالتی که اهداف ثابت هستند، پایداری را به صورت ریاضی ثابت کرده‌اند. یکی از ویژگی‌های مهم در گروهی از پهپادها، سادگی هر پهپاد مجزا و توانایی انجام وظایف پیچیده با هماهنگی در تعداد زیاد است. بنابراین، هر الگوریتم هوش جمعی باید پیچیدگی محاسباتی کمتری از پهپاد منفرد داشته باشد تا بتوان کار را با منابع سخت افزاری محدود به راحتی انجام داد. به طور کلی، اکثر الگوریتم‌های مبتنی بر هوش جمعی پیچیدگی محاسباتی پایینی دارند و به اندازه مسئله بستگی ندارند. پیچیدگی محاسباتی الگوریتم‌های مبتنی بر PSO نسبتاً کم است زیرا مراحل محاسباتی فقط به مقایسه فردی و جمع بردار نیاز دارند. در الگوریتم بهینه‌سازی خفاش، هر ربات جداگانه موقعیت خود را با توجه به اهداف محاسبه می‌کند که منجر به پیچیدگی محاسباتی کم می‌شود. به طور مشابه، الگوریتم مبتنی بر ABC و الگوریتم مبتنی بر PIO نیز پیچیدگی محاسباتی پایینی دارند. به روز رسانی فرمون و محاسبات به روز رسانی حالت در الگوریتم مبتنی بر ACO در مقایسه با PSO، BO، PIO و ABC از نظر محاسباتی پیچیده تر است. الگوریتم مبتنی بر BFO از پیچیدگی محاسباتی بالاتری برخوردار است زیرا شامل محاسبه بهترین موقعیت پهپاد منفرد، محاسبه ارزش تناسب بالا برای اندازه ازدحام، و محاسبه بهترین همسایه برای دنبال کردن هدف توسط ایجاد کنترل خوب آرایش برای دستیابی به حل بهینه مسئله رهگیری، زمان همگرایی باید کم باشد. الگوریتم اساسی PSO سرعت همگرایی بالایی دارد، اما می‌تواند به راحتی در حداقل‌های محلی گرفتار شود. برای غلبه بر این مشکل، نویسندگان در مرجع [۴۱] یک نسخه بهبودیافته از PSO را پیشنهاد کردند که در آن کل ازدحام پهپادها به زیر گروه‌هایی تقسیم می‌شوند تا به همگرایی سریع بدون گیر افتادن در بهینه محلی دست یابند. یک نسخه بهبودیافته از PIO توسط ژانگ و هابیبین با اثبات ریاضی ارائه شده‌است که عملکرد خوبی را نشان می‌دهد. الگوریتم‌ها از نظر ثبات و همگرایی در مقایسه با PSO پایه، در یک تکلیف مشترک توسط گروهی از پهپادها، خطر برخورد بین پهپادها و همچنین با موانع موجود در عرصه عملیاتی وجود دارد. بنابراین، اتخاذ یک روش اجتناب از مانع کارآمد برای دستیابی به عملکرد رضایت بخش مورد نیاز است. ساده ترین مکانیسم برای جلوگیری از موانع و برخورد با سایر پهپادها استفاده از حسگر روی برد است که در مرجع [۳۷] نشان داده شده‌است که از مکانیسم اجتناب از مانع Battenberg استفاده می‌کند.

در جایی که $X_{gb}(T)$ موقعیت جهانی یک UCAV را نشان می‌دهد، $X_i(T)$ موقعیت کرم درخشان را در زمان T ، C_1 و C_2 نشان دهنده ضریب شتاب، رند یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است و $X_j(T)$ موقعیت کرم درخشان j را نشان می‌دهد. در برنامه‌ریزی مسیر واقعی پهپادها، الگوریتم GSO نسبت به ACO که در آن پهپادها دارای حسگرهایی با برد محدود هستند، کارآمدتر است. علاوه بر این، GSO همچنین در مورد یک محیط پویا به دلیل قابلیت اجتناب از حداقل محلی و سرعت همگرایی سریع، بهتر از PSO عمل می‌کند.

۶ تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای

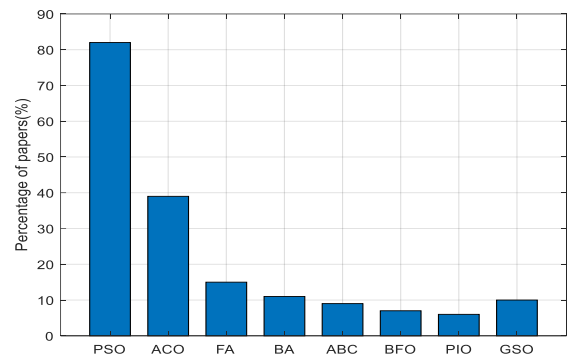
این بخش تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای از الگوریتم‌های مبتنی بر هوش جمعی را که در بخش ۴ مورد بحث قرار گرفت، بر اساس پارامترهای مهم برای رهگیری هدف توسط گروهی از پهپادها ارائه می‌کند. این پارامترها شامل پیچیدگی محاسباتی، ارتباطات مورد نیاز، تابع بهینه‌سازی، پیچیدگی حافظه، مقیاس‌پذیری و تکنیک‌های جستجو هستند. مقایسه بین الگوریتم‌ها در جدول ۵ ارائه شده‌است. پیچیدگی محاسباتی به‌عنوان نیاز سیستم برای منابع محاسباتی به‌عنوان تابعی از تعداد ربات‌ها و تعداد اهداف تعریف شده‌است. منابع با زمان محاسبات مورد انتظار و ذخیره محاسباتی مورد نیاز برای راه حل تعریف می‌شوند. تعداد کل روبات‌ها (جمعیت) در یک ازدحام با NT نشان داده می‌شود و سپس تعداد اهداف با TT نشان داده می‌شود. بنابراین پیچیدگی محاسبات توسط این دو پارامتر تعیین می‌شود. اگر یک الگوریتم دارای ویژگی‌های پارتیشن باشد، تعداد ربات‌ها در یک زیر گروه از یک گروه با NS نشان داده می‌شود که در آن $NS \leq NT$ ، و به طور مشابه تعداد اهداف در یک زیر گروه با TS نشان داده می‌شود. الگوریتم‌هایی که دارای تکنیک پارتیشن بندی هستند، طبیعتاً پیچیدگی محاسباتی کمتری دارند. حافظه حالت‌های قبلی بر تعداد منابع ذخیره‌سازی مورد نیاز الگوریتم تأثیر می‌گذارد. برای یک مشکل در مقیاس کوچک (تعداد کم ربات‌ها و/یا اهداف)، این پارامتر ممکن است ناچیز باشد، اما از آنجایی که مشکلات از نظر تعداد ربات‌ها و اهداف گسترش می‌یابد، ممکن است به عاملی حیاتی در عملکرد الگوریتم تبدیل شود. تکنیک جستجو به روش خاصی اشاره دارد که در آن الگوریتم راه حل مسئله را پیدا می‌کند. اکثر الگوریتم‌های مبتنی بر هوش جمعی از سه نوع ممکن از تکنیک‌های جستجو استفاده می‌کنند: جهش، انتخاب و تقاطع. جهش مکانیسمی برای اکتشاف جهانی است، در حالی که انتخاب نقش دوگانه‌ای دارد: یکی اتخاذ بهترین راه حل موجود در فضای جستجو و دیگری حفظ نیروی محرکه برای همگرایی. در نهایت، یک تقاطع تنوع گسترده‌ای را در فضای جستجو فراهم می‌کند. سرعت همگرایی به سرعتی اشاره دارد که الگوریتم می‌تواند به جواب بهینه برسد. یک الگوریتم خوب باید سرعت همگرایی بالایی داشته باشد و نباید دچار همگرایی زودرس شود. همگرایی

۷ نتیجه گیری

الگوریتم‌های مبتنی بر هوش ازدحام مورد استفاده در برنامه‌ریزی مسیر سه‌بعدی در مأموریت‌های رهگیری دارای اهمیت زیادی هستند. در این مقاله، ما الگوریتم‌های مختلف را تجزیه و تحلیل کرده و مقایسه‌ای از عملکرد آن‌ها ارائه داده‌ایم. این تحلیل‌ها بر اساس مشاهدات و نتایج به‌دست آمده از تست‌ها انجام شده‌است.

- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به دلیل کم‌ترین پیچیدگی محاسباتی به گسترده‌ترین شکل ممکن در برنامه‌ریزی مسیر برای رهگیری هدف استفاده می‌شود. با این حال، نکته‌ای که باید مدنظر داشت، این است که این الگوریتم به راحتی در حداقل‌های محلی گیر افتاده و به بهبودهای مستقیم نمی‌رسد.
- الگوریتم کلونی مورچه قابلیت مقیاس‌پذیری خوبی دارد، اما نیاز به تنظیم تعداد زیادی پارامتر دارد که این موضوع ممکن است پیچیدگی محاسباتی را افزایش دهد
- الگوریتم کرم شب تاب، این الگوریتم از یک عملگر برای جستجوی راه‌حل استفاده می‌کند و در نتیجه پیچیدگی محاسباتی آن کمتر است. با این حال، بهره‌برداری کمتری دارد.
- الگوریتم خفاش سرعت همگرایی بالایی دارد و به سرعت به یک راه‌حل مطلوب می‌رسد، اما نیاز به تنظیم پارامترهای مختلف دارد.
- الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل برای حل مسائل با ابعاد بالا بسیار امیدوار کننده‌است، اما از نظر سرعت همگرایی کمی کند عمل می‌کند.
- الگوریتم علوفه یابی باکتری، تعداد پارامترهای تنظیم در الگوریتم علوفه‌یابی باکتری‌ها به طور قابل توجهی کمتر است و بنابراین در حل مسئله برنامه‌ریزی مسیر در چند پهپاد بسیار کارآمد است، اما با افزایش تعداد اهداف، سرعت همگرایی کاهش می‌یابد. از این تجزیه و تحلیل مشخص می‌شود که هر یک از الگوریتم‌ها مزایا و معایب خود را دارند. انتخاب الگوریتم مناسب باید با توجه به ویژگی‌های مسئله و اهداف مأموریت‌های رهگیری انجام شود. همچنین، ممکن است نیاز به ارتقاء یا ترکیب این الگوریتم‌ها باشد تا به بهبود عملکرد در مسائل خاصی بپردازند [۶۰، ۶۱].

دافعه مصنوعی یکی دیگر از روش‌های برجسته اجتناب از موانع است، که در آن پهپاد به‌عنوان ذره‌ای در حال حرکت در یک میدان بالقوه توسعه‌یافته توسط هدف و موانع موجود در محیط، مدل‌سازی می‌شود. رویکرد مبتنی بر BFO روش دفع مصنوعی را برای دستیابی به اجتناب موثر از مانع اتخاذ کرد. الگوریتم مبتنی بر ACO در مرجع [۵۱] RPM را به منظور اجتناب از موانع در هر بخش مسیر ترکیب می‌کند. در رویکرد مبتنی بر PIO [۵۴]، پهپادها مسیر ایمن را برای رهگیری یک هدف در هر تکرار محاسبه می‌کنند تا از موانع جلوگیری کنند. هنگامی که یک برخورد احتمالی در بین پهپادها شناسایی شد، الگوریتم مسیر دیگری را در تکرارهای متوالی محاسبه می‌کند تا زمانی که مسیر بدون برخورد شناسایی شده‌است. مسئله برنامه‌ریزی مسیر و رهگیری هدف مستلزم چندین راه حل بهینه به‌صورت موازی و همچنین تعادل بین بهره‌برداری و اکتشاف است. استثمار پدیده‌ای است که در آنیک الگوریتم راه حل جدیدی تولید می‌کند که به مراتب بهتر از راه حل فعلی است. مزیت اصلی از بهره‌برداری این است که نرخ همگرایی را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۰- مقدار مقاله‌های انتشار یافته برای برنامه‌ریزی مسیر پهپاد به کمک الگوریتم‌های جمعی

الگوریتم کاوش پدیده‌ای است که در آن یک الگوریتم فضای جستجوی مسئله را به‌صورت موثر بررسی می‌کند روشی برای تولید راه حل‌هایی با تنوع [۴۰]. رویکرد مبتنی بر ACO [۴۹] و رویکرد مبتنی بر ABC [۵۴] هر دو تنها از دو جهش عملگر و انتخاب برای ایجاد راه حل بهینه استفاده می‌کنند که منجر به جستجوی جهانی خوب می‌شود. پرواز لوی در رویکرد مبتنی بر FA [۵۱] یک مکانیسم جهش را معرفی می‌کند که تنوع در جمعیت را تضمین می‌کند و از همگرایی الگوریتم در بهینه زودرس جلوگیری می‌کند.

جدول ۲- مقایسه مزایا و معایب الگوریتم‌های الهام گرفته شده از طبیعت

نوع الگوریتم	نام الگوریتم	مزایا	معایب
گلچینی گروهی (Swarm Intelligence)	الگوریتم کلونی مورچه (Ant Colony Optimization - ACO)	-قابلیت مقیاس‌پذیری خوب - قدرت پیدا کردن مسیرهای بهینه - انعطاف‌پذیری در مسائل مختلف	-نیاز به تنظیم پارامترهای متعدد - پیچیدگی محاسباتی نسبتاً بالا
گلچینی گروهی (Swarm Intelligence)	الگوریتم ذره‌ای (Particle Swarm Optimization - PSO)	-سادگی در پیاده‌سازی -سرعت همگرایی نسبتاً بالا	-تمایل به گیر افتادن در حداقل‌های محلی - وابستگی به تنظیم پارامترها
گلچینی گروهی (Swarm Intelligence)	الگوریتم خفاش (Bat Algorithm)	-سرعت همگرایی بالا -توانایی انتخاب چگالی نقاط بهینه	-نیاز به تنظیم پارامترهای مختلف -ممکن است به حداقل‌های محلی گیر بیفتد
هوشی ازدحام (Swarm Intelligence)	الگوریتم تابع شب تاب (Firefly Algorithm)	-قابلیت تغییر مکان نمایش‌دهنده‌ها در جستجوی بهینه -توانایی اجتناب از محدوده‌های حداقل محلی	-نیاز به تنظیم پارامترهای مختلف -کارایی نسبت به برخی مسائل ممکن است کمتر باشد
الگوریتم‌های تکاملی	الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)	-توانایی کار با فضای جستجوی گسترده -تنوع در جمعیت مسیرها	-نیاز به تعیین مناسبیت (فیتنس) مسیرها - پیچیدگی محاسباتی بالا

905-910, pp. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2016.7502538>.

[5] E. Zamora and W. Yu, "Recent advances on simultaneous localization and mapping for mobile robots," *IETE Technical Review*, vol. 30, no. 6, pp. 490-496, 2013.

[6] G. S. C. Avellar, G. A. S. Pereira, L. C. A. Pimenta, and P. Iscold, "Multi-UAV Routing for Area Coverage and Remote Sensing with Minimum Time," *Sensors*, vol. 15, no. 11, pp. 27783-27803, 2015, <https://doi.org/10.3390/s151127783>.

[7] H. Huang, Yuan Wang, Huan Zhou, Kangsheng Dong and Heming Liu, "Multi-UCAV cooperative autonomous attack path planning method under uncertain environment," in *Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, Xi'an, China, 2016, pp. 573-579, <https://doi.org/10.1109/IMCEC.2016.7867275>.

[8] X. Yang, "Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Firefly Algorithm," Luniver Press Frome, BA116TT, United Kingdom, 2011.

[9] X. S. Yang and X. He, "Firefly algorithm: Recent advances and applications," *International Journal of Swarm Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 36-50, 2013, <https://doi.org/10.1504/IJSI.2013.055801>.

[10] K. Lange, *Optimization*, 2nd ed., Springer, 2013.

[11] A. Bürkle, F. Segor, and M. Kollmann, "Towards autonomous micro-UAV swarms," *Journal of Intelligent*

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است.

مراجع

- [1] G. Şerban, I. Rus, D. Vele, P. Breţcan, M. Alexe, and D. Petrea, "Flood-prone area delimitation using UAV technology, in the areas hard-to-reach for classic aircrafts: Case study in the north-east of Apuseni Mountains, Transylvania," *Natural Hazards*, vol. 82, no. 3, pp. 1817-1832, 2016, <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2266-4>.
- [2] D. Kingston, S. Rasmussen, and L. Humphrey, "Automated UAV tasks for search and surveillance," in *2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, Buenos Aires, Argentina, 2016, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1109/CCA.2016.7587813>.
- [3] N. Ernest, A. Sathyan, and K. Cohen, "11 - Genetic Fuzzy Single and Collaborative Tasking for UAV Operations," in multi-rotor platform-based UAV systems, F. Cazaurang, K. Cohen, and M. Kumar, Eds.: ISTE Press - Elsevier, 2020, pp. 217-242. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-251-9.50011-X>.
- [4] M. M. Trujillo, M. Darrah, K. Speransky, B. DeRoos and M. Wathen, "Optimized flight path for 3D mapping of an area with structures using a multirotor," in *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Arlington, VA, USA, 2016,

- Shenyang, 2014, pp. 2376-2381, <https://doi.org/10.1109/WCICA.2014.7053093>.
- [23] Y. Zhao, Z. Zheng, and Y. Liu, "Survey on computational intelligence-based UAV path planning," *Knowledge-Based Systems*, vol. 158, pp. 54-64, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.05.033>.
- [24] T. M. Cabreira, L. B. Brisolará, and P. R. Ferreira Jr, "Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles," *Drones*, vol. 3, no. 4, pp. 1-38, 2019, <https://doi.org/10.3390/drones3010004>.
- [25] S. Aggarwal and N. Kumar, "Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges," *Computer Communications*, vol. 149, pp. 270-299, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.014>.
- [26] D. Li, P. Wang, and L. Du, "Path planning technologies for autonomous underwater vehicles-a review," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 9745-9768, 2018, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2888617>.
- [27] H. Yu, K. Meier, M. Argyle and R. W. Beard, "Cooperative path planning for target tracking in urban environments using unmanned air and ground vehicles," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 2, 2015, pp. 541-552, <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2301459>.
- [28] J. Ren, W. Du and F. Du, "A UAV 3-D space dynamic path planning in complex battlefield environment," in *Third International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*, Yangzhou, China, 2013, pp. 1379-1383, <https://doi.org/10.1109/ICIST.2013.6747794>.
- [29] J. Hu, L. Xie, K. Y. Lum, and J. Xu, "Multiagent information fusion and cooperative control in target search," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 1223-1235, 2013, <https://doi.org/10.1109/TCST.2012.2198650>.
- [30] H. H. Triharminto, A. S. Prabuwo, T. B. Adj, and N. A. Setiawan, "Adaptive dynamic path planning algorithm for interception of a moving target," *International Journal of Mobile Computing and Multimedia Communications (IJMCMC)*, vol. 5, no. 3, pp. 19-33, 2013, <https://doi.org/10.4018/jmcmc.2013070102>.
- [31] F. Andert and F. Adolf, "Online world modeling and path planning for an unmanned helicopter," *Autonomous Robot*, vol. 27, no. 3, pp. 147-64, 2009, <https://doi.org/10.1007/s10514-009-9134-y>.
- [32] M. Sanfourche *et al.*, "Perception for UAV: Vision-based navigation and environment modeling," *Aerospace Lab*, vol. 4, pp. 1-19, 2012.
- [33] Y. V. Pehlivanoglu, "A new vibrational genetic algorithm enhanced with a Voronoi diagram for path planning of autonomous UAV," *Aerospace Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 47-55, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2011.02.006>.
- & *Robotic Systems*, vol. 61, no. 4, pp. 339-353, 2011, <https://doi.org/10.1007/s10846-010-9492-x>.
- [12] P. O. Pettersson and P. Doherty, "Probabilistic roadmap-based path planning for an autonomous unmanned helicopter," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 395-405, 2006.
- [13] L. De Filippis, G. Guglieri, and F. Quagliotti, "Path planning strategies for UAVs in 3D environments," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 65, no. 1, pp. 247-64, 2012, <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9568-2>.
- [14] O. Cetin, I. Zagli, and G. Yilmaz, "Establishing obstacle and collision-free communication relay for UAVs using artificial potential fields," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 69, no. 1, pp. 361-372, 2013, <https://doi.org/10.1007/s10846-012-9761-y>.
- [15] S. Hacoheh, S. Shoval, and N. Shvalb, "Applying probability navigation function in dynamic uncertain environments," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 87, pp. 237-246, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.10.010>.
- [16] K. S. Camilus and V. Govindan, "A review on graph-based segmentation," *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*, vol. 4, no. 5, pp. 1-13, 2012, <https://doi.org/10.5815/ijigsp.2012.05.01>.
- [17] S. M. Persson and I. Sharf, "Sampling-based A* algorithm for robot path-planning," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 33, no. 13, pp. 1683-1708, 2014, <https://doi.org/10.1177/0278364914547786>.
- [18] M. Khosravi and A. G. Aghdam, "Cooperative receding horizon control for multi-target interception in uncertain environments," in *53rd Conference on Decision and Control*, Los Angeles, CA, U.S.A., 2014, pp. 4497-4502, <https://doi.org/10.1109/CDC.2014.7040091>.
- [19] R. W. Beard, T. W. McLain, M. A. Goodrich, and E. P. Anderson, "Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles," *Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 6, pp. 911-922, 2002, <https://doi.org/10.1109/TRA.2002.805653>.
- [20] L. Yang, J. Qi, D. Song, J. Xiao, J. Han, and Y. Xia, "Survey of robot 3D path planning algorithms," *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2016, no. 1, 2016, Art. no. 7426913, <https://doi.org/10.1155/2016/7426913>.
- [21] P. B. Sujit, S. Saripalli and J. B. Sousa, "Unmanned Aerial Vehicle Path Following: A Survey and Analysis of Algorithms for Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicleless," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 34, no. 1, pp. 42-59, <https://doi.org/10.1109/MCS.2013.2287568>.
- [22] L. Yang, J. Qi, J. Xiao, and X. Yong, "A literature review of UAV 3D path planning," in *11th World Congress on Intelligent Control and Automation*,

- 1, pp. 132–141, 2013, <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2198665>.
- [44] N. Özalp and O. K. Sahingoz, "Optimal UAV path planning in a 3D threat environment by using parallel evolutionary algorithms," in *2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, GA, U.S.A., 2013, pp. 308–317, <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2013.6564703>.
- [45] E. Besada-Portas, L. de la Torre, M. Jesus, and J. M. de la Cruz, "Evolutionary trajectory planner for multiple UAVs in realistic scenarios," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 4, pp. 619–34, 2010, <https://doi.org/10.1109/TRO.2010.2048610>.
- [46] W. Zhu and H. Duan, "Chaotic predator–prey biogeography-based optimization approach for UCAV path planning," *Aerospace Science and Technology*, vol. 32, no. 1, pp. 153–161, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2013.11.003>.
- [47] Y. Fu, M. Ding, and C. Zhou, "Phase angle-encoded and quantum-behaved particle swarm optimization applied to three-dimensional route planning for UAV," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 42, no. 2, pp. 511–526, 2012, <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2011.215958>.
- [48] R. Zhu, D. Sun, and Z. Zhou, "Cooperation strategy of unmanned air vehicles for multitarget interception," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 28, no. 5, 2005, Art. no. 1068, <https://doi.org/10.2514/1.14412>.
- [49] T. Y. Sun, C. L. Huo, S. J. Tsai, Y. H. Yu, and C. C. Liu, "Intelligent flight task algorithm for unmanned aerial vehicle," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 8, pp. 10036–10048, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.02.013>.
- [50] T. Y. Sun, C. L. Huo, S. J. Tsai, and C. C. Liu, "Optimal UAV flight path planning using skeletonization and particle swarm optimizer," in *2008 IEEE congress on evolutionary computation (IEEE world congress on computational intelligence)*, Hong Kong, China, 2008, pp. 1183–1188, <https://doi.org/10.1109/CEC.2008.4630946>.
- [51] Y. Liu, X. Zhang, X. Guan, and D. Delahaye, "Adaptive sensitivity decision-based path planning algorithm for unmanned aerial vehicle with improved particle swarm optimization," *Aerospace Science and Technology*, vol. 58, pp. 92–102, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.08.017>.
- [52] L. Freda and G. Oriolo, "Vision-based interception of a moving target with a nonholonomic mobile robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 6, pp. 419–432, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.02.001>.
- [53] A. Popescu and D. Popescu, "Moving target interception for a walking robot by fuzzy observer and fuzzy controller," in *Climbing and Walking Robots: From Biology to Industrial Applications (CLAWAR*
- [34] X. Zhao, Y. Zhang, and B. Zhao, "Robust path planning for avoiding obstacles using time-environment dynamic map," *Measurement and Control*, vol. 53, no. 1–2, pp. 214–221, 2020, <https://doi.org/10.1177/0020294019847704>.
- [35] S. Arora, S. Choudhury, and S. Scherer, "Hindsight is only 50/50: Unsuitability of MDP based approximate POMDP solvers for multi-resolution information gathering," *arXiv:1804.02573*, 2018, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02573>.
- [36] T. Gorecki, H. Piet-Lahanier, J. Marzat, and M. Balesdent, "Cooperative guidance of UAVs for area exploration with final target allocation," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 19, pp. 260–265, 2013, <https://doi.org/10.3182/20130902-5-DE-2040.00101>.
- [37] J. Cruz, G. Chen, D. Li, and X. Wang, "Particle swarm optimization for resource allocation in UAV cooperative control," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Providence, Rhode Island, 2004, Paper AIAA 2004-5250, <https://doi.org/10.2514/6.2004-5250>.
- [38] P. Sujit, A. Sinha, and D. Ghose, "Multiple UAV task allocation using negotiation," in *The Fifth International Joint Conference On Autonomous Agents And Multiagent Systems*, Hakodate, Japan, 2006, pp. 471–478, <https://doi.org/10.1145/1160633.1160719>.
- [39] B. Liu, Z. Qin, R. Wang, Y. B. Gao, and L. P. Shao, "A hybrid heuristic ant colony system for coordinated multi-target assignment," *Journal of Information Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 156–64, 2009, <https://doi.org/10.3923/ijtj.2009.156.164>.
- [40] Y. Zhang, W. Feng, G. Shi, F. Jiang, M. Chowdhury, and S. H. Ling, "UAV swarm mission planning in dynamic environment using consensus-based bundle algorithm," *Sensors*, vol. 20, no. 8, 2020, Art. no. 2307, <https://doi.org/10.3390/s20082307>.
- [41] Y. Chen, D. Yang, and J. Yu, "Multi-UAV task assignment with parameter and time-sensitive uncertainties using modified Two-part wolf pack search algorithm," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, no. 6, pp. 2853–72, 2018, <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2831138>.
- [42] G. Wang, Q. Li, and L. Guo, "Multiple UAVs routes planning based on particle swarm optimization algorithm," in *2010 2nd International Symposium on Information Engineering and Electronic Commerce*, Ternopil, Ukraine, 2010, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/IEEC.2010.5533230>.
- [43] V. Roberge, M. Tarbouchi, and G. Labonté, "Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no.

- optimization for Minimum Time Search with communication constraints and collision avoidance," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 85, pp. 357–371, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.06.002>.
- [65] S. Shao, Y. Peng, C. He, and Y. Du, "Efficient path planning for UAV formation via comprehensively improved particle swarm optimization," *ISA Transactions*, vol. 97, pp. 415–430, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.018>.
- [66] M. C. Mah, H. S. Lim, A. W. C. Tan, "Secrecy improvement via joint optimization of UAV relay flight path and transmit power," *Vehicular Communications*, vol. 23, 2020, Art. no. 100217, <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2019.100217>.
- [67] B. Li, X. Qi, B. Yu, and L. Liu, "Trajectory planning for UAV based on improved ACO algorithm," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 2995–3006, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2962340>.
- [68] G. Flores-Caballero, A. Rodríguez-Molina, M. Aldape-Pérez, and M. G. Villarreal-Cervantes, "Optimized path-planning in continuous spaces for unmanned aerial vehicles using meta-heuristics," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 176774–176788, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3026666>.
- [69] Q. Ning, G. Tao, B. Chen, Y. Lei, H. Yan, and C. Zhao, "Multi-UAVs trajectory and mission cooperative planning based on the Markov model," *Physical Communication*, vol. 35, 2019, Art. no. 100717, <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2019.100717>.
- [70] A. K. Pamosoaji, M. Piao, and K. Hong, "PSO-based minimum-time motion planning for multiple vehicles under acceleration and velocity limitations," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 17, pp. 2610–2623, 2019, <https://doi.org/10.1007/s12555-018-0176-9>.
- [71] Q. Xu, Z. Wang, and Z. Zhen, "Information fusion estimation-based path following control of quadrotor UAVs subjected to Gaussian random disturbance," *ISA Transactions*, vol. 99, pp. 84–94, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.10.003>.
- [72] Y. Hu, Y. Yao, Q. Ren, and X. Zhou, "3D multi-UAV cooperative velocity-aware motion planning," *Future Generation Computer Systems*, vol. 102, pp. 762–774, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.09.030>.
- [73] Y. Gao and D. Li, "Unmanned aerial vehicle swarm distributed cooperation method based on situation awareness consensus and its information processing mechanism," *Knowledge-Based Systems*, vol. 188, 2020, Art. no. 105034, <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2019.105034>.
- [74] Z. Shang, J. Bradley, and Z. Shen, "A co-optimal coverage path planning method for aerial scanning of 2001), K. Berns and R. Dillmann, Eds. John Wiley and Sons, 2001.
- [54] X. Yi, A. Zhu, S. X. Yang, and C. Luo, "A bio-inspired approach to task assignment of swarm robots in 3-D dynamic environments," *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 47, no. 4, pp. 974–983, 2017, <https://doi.org/10.1109/TCYB.2016.2535153>.
- [55] L. Zhong, Q. Luo, D. Wen, S. D. Qiao, J. M. Shi, and W. M. Zhang, "A task assignment algorithm for multiple aerial vehicles to attack targets with dynamic values," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 236–248, 2013, <https://doi.org/10.1109/TITS.2012.2210882>.
- [56] J. Ni and S. X. Yang, "Bioinspired neural network for real-time cooperative hunting by multirobots in unknown environments," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 22, no. 12, pp. 2062–2077, 2011, <https://doi.org/10.1109/TNN.2011.2169808>.
- [57] X. Fu, J. Li, and X. Gao, "Target allocation in multi-UAV cooperative search with communication constraints," *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, vol. 35, no. 5, pp. 1347–1356, 2014.
- [58] M. Khosravi and A. G. Aghdam, "Stability analysis of dynamic decision-making for vehicle heading control," in *American Control Conference (ACC)*, Chicago, IL, U.S.A., 2015, pp. 3076–3081, <https://doi.org/10.1109/ACC.2015.7171805>.
- [59] A. Pierson, Z. Wang, and M. Schwager, "Intercepting rogue robots: An algorithm for capturing multiple evaders with multiple pursuers," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 530–537, 2017, <https://doi.org/10.1109/LRA.2016.2645516>.
- [60] T. M. Shami, A. A. El-Saleh, M. Alswaiti, Q. Al-Tashi, M. A. Summakieh, and S. Mirjalili, "Particle swarm optimization: a comprehensive survey," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 10031–10061, 2022, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142859>.
- [61] L. Abualigah *et al.*, "Meta-heuristic optimization algorithms for solving real-world mechanical engineering design problems: A comprehensive survey, applications, comparative analysis, and results," *Neural Computing and Applications*, vol. 34, no. 6, pp. 4081–4110, <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06747-4>.
- [62] J. Tang, H. Duan, and S. Lao, "Swarm intelligence algorithms for multiple unmanned aerial vehicles collaboration: A comprehensive review," *Artificial Intelligence Review*, vol. 56, pp. 4295–4327, 2023, <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10281-7>.
- [63] G. Jain, G. Yadav, D. Prakash, A. Shukla, and R. Tiwari, "MVO-based path planning scheme with coordination of UAVs in 3-D environment," *Journal of Computational Science*, vol. 37, 2019, Art. No. 101016, <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2019.07.003>.
- [64] S. Pérez-Carabaza, J. Scherer, B. Rinner, J. A. López-Orozco, and E. Besada-Portas, "UAV trajectory

- planning," *Applied Soft Computing*, vol. 89, 2020, Art. no. 106099, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106099>.
- [86] L. Shen *et al.*, "Synergistic path planning of multi-UAVs for air pollution detection of ships in ports," *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 144, 2020, Art. no. 102128, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102128>.
- [87] M. Ghanifar, M. Kamzan, and M. Tayefi, "Different intelligent methods for coefficient tuning of quadrotor feedback-linearization controller," *Journal of Aerospace Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 56-65, 2023, <https://doi.org/10.22034/jast.2023.355914.1123>.
- [88] M. Ghanifar, M. Kamzan, and M. Tayefi, "Intelligent tuning PID controller, simulation and comparison for a quadrotor," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 23-33, 2023, <https://doi.org/10.30699/jtae.2023.7.4.3>.
- [89] Z. Zhen, Y. Chen, L. Wen, and B. Han, "An intelligent cooperative mission planning scheme of UAV swarm in uncertain dynamic environment," *Aerospace Science and Technology*, vol. 100, 2020, Art. no. 105826, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105826>.
- [90] K. Li, F. Ge, Y. Han, and W. Xu, "Path planning of multiple UAVs with online changing tasks by an ORPFOA algorithm," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 94, 2020, Art. no. 103807, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103807>.
- [91] Z. Shao, F. Yan, Z. Zhou, and X. Zhu, "Path planning for multi-UAV formation rendezvous based on distributed cooperative particle swarm optimization," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 13, 2019, Art. no. 2621, <https://doi.org/10.3390/app9132621>.
- [92] H. S. Ilango and R. Ramanathan, "A performance study of bio-inspired algorithms in autonomous landing of unmanned aerial vehicle," *Procedia Computer Science*, vol. 171, pp. 1449-1458, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.155>.
- [93] S. I. Khan *et al.*, "UAVs path planning architecture for effective medical emergency response in future networks," *Journal of Physics Communications*, vol. 47, 2021, Art. no. 101337, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101337>.
- [94] Z. A. Ali, H. Zhangang, and D. Zhengru, "Path planning of multiple UAVs using MMACO and DE algorithm in dynamic environment," *Measurement and Control*, vol. 56, no. 3-4, pp. 459-469, 2020, <https://doi.org/10.1177/0020294020915727>.
- [95] Y. Wang, T. Zhang, Z. Cai, J. Zhao, and K. Wu, "Multi-UAV coordination control by chaotic grey wolf optimization based distributed MPC with event-triggered strategy," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 33, no. 11, pp. 2877-2897, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.04.028>.
- complex structures," *Expert Systems with Applications*, vol. 158, 2020, Art. no. 113535, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113535>.
- [75] C. Qu, W. Gai, J. Zhang, and M. Zhong, "A novel hybrid grey wolf optimizer algorithm for unmanned aerial vehicle (UAV) path planning," *Knowledge-Based Systems*, vol. 194, 2020, Art. no. 105530, <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.105530>.
- [76] S. Krishnan, G. A. Rajagopalan, S. Kandhasamy, and M. Shanmugavel, "Continuous-time trajectory optimization for decentralized multi-robot navigation," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 1 pp. 494-499, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.06.083>.
- [77] C. Zhang, C. Hu, J. Feng, Z. Liu, Y. Zhou, and Z. Zhang, "A self-heuristic ant-based method for path planning of unmanned aerial vehicle in complex 3-D space with dense U-type obstacles," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 150775-150791, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946448>.
- [78] Y. Zhou, H. Zhao, J. Chen, and Y. Jia, "A novel mission planning method for UAVs' course of action," *Computer Communications*, vol. 152, pp. 345-356, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.006>.
- [79] H. Qiu and H. Duan, "A multi-objective pigeon-inspired optimization approach to UAV distributed flocking among obstacles," *Information Sciences*, vol. 509, pp. 515-529, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.06.061>.
- [80] S. Konatowski and P. Pawłowski, "Application of the ACO algorithm for UAV path planning," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 95, pp. 115-118, 2019, <https://doi.org/10.15199/48.2019.07.24>.
- [81] J. Huang and W. Sun, "A method of feasible trajectory planning for UAV formation based on bi-directional fast search tree," *Optik*, vol. 221, 2020, Art. no. 165213, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165213>.
- [82] R. Radmanesh, M. Kumar, D. French, and D. Casbeer, "Towards a PDE-based large-scale decentralized solution for path planning of UAVS in shared airspace," *Aerospace Science and Technology*, vol. 105, 2020, Art. no. 105965, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105965>.
- [83] C. Xu, M. Xu, and C. Yin, "Optimized multi-UAV cooperative path planning under the complex confrontation environment," *Computer Communications*, vol. 162, pp. 196-203, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.04.050>.
- [84] X. Yu, C. Li, and J. Zhou, "A constrained differential evolution algorithm to solve UAV path planning in disaster scenarios," *Knowledge-Based Systems*, vol. 204, 2020, Art. no. 106209, <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.106209>.
- [85] C. Qu, W. Gai, M. Zhong, and J. Zhang, "A novel reinforcement learning based grey wolf optimizer algorithm for unmanned aerial vehicles (UAVs) path

- pp. 2540-2554, 2022, <https://doi.org/10.1109/TSMC.2021.3049681>.
- [103] Y. Jiang, Q. Wu, G. Zhang, S. Zhu, and W. Xing, "A diversified group teaching optimization algorithm with segment-based fitness strategy for unmanned aerial vehicle route planning," *Expert Systems with Applications*, vol. 185, 2021, Art. no. 115690, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115690>.
- [104] S. W. Cho, H. J. Park, H. Lee, D. H. Shim, and S. Y. Kim, "Coverage path planning for multiple unmanned aerial vehicles in maritime search and rescue operations," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 161, 2021, Art. no. 107612, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107612>.
- [105] X. Zhang, S. Xia, T. Zhang, and X. Li, "Hybrid FWPS cooperation algorithm based unmanned aerial vehicle constrained path planning," *Aerospace Science and Technology*, vol. 118, 2021, Art. no. 107004, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107004>.
- [106] M. D. Phung and Q. P. Ha, "Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 107, 2021, Art. no. 107376, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107376>.
- [107] W. Suo, M. Wang, D. Zhang, Z. Qu, and L. Yu, "Formation control technology of fixed-wing UAV swarm based on distributed ad HOC network," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 2, 2022, Art. no. 535, <https://doi.org/10.3390/app12020535>.
- [108] X. Zhang, S. Xia, T. Zhang, and X. Li, "Hybrid FWPS cooperation algorithm based unmanned aerial vehicle constrained path planning," *Aerospace Science and Technology*, vol. 118, 2021, Art. no. 107004, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107004>.
- [109] L. Ambroziak, M. Ci, ezkowski, "Virtual electric dipole field applied to autonomous formation flight control of unmanned aerial vehicles," *Sensors*, vol. 21, no. 13, 2021, Art. no. 4540, 2021, <https://doi.org/10.3390/s21134540>.
- [96] Z. A. Ali, Z. Han, and R. J. Masood, "Collective motion and self-organization of a swarm of UAVS: A cluster-based architecture," *Sensors*, vol. 21, no. 11, 2021, Art. no. 3820, <https://doi.org/10.3390/s21113820>.
- [97] M. Shafiq, Z. A. Ali, and E. H. Alkhamash, "A cluster-based hierarchical-approach for the path planning of swarm," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 15, 2021, Art. no. 6864, <https://doi.org/10.3390/app11156864>.
- [98] Z. A. Ali, H. Zhangang, and W. B. Hang, "Cooperative path planning of multiple UAVs by using max-min ant colony optimization along with cauchy mutant operator," *fluctuation and noise letters*, vol. 20, no. 1, 2021, Art. no. 2150002, <https://doi.org/10.1142/S0219477521500024>.
- [99] H. He and H. Duan, "A multi-strategy pigeon-inspired optimization approach to active disturbance rejection control parameters tuning for vertical take-off and landing fixed-wing UAV," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 35, no. 1, pp. 19–30, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.05.010>.
- [100] S. Liang, B. Song, and D. Xue, "Landing route planning method for micro drones based on hybrid optimization algorithm," *Biomimetic Intelligence and Robotics*, vol. 1, 2021, Art. no. 100003, <https://doi.org/10.1016/j.birob.2021.100003>.
- [101] I. V. Pustokhina, D. A. Pustokhin, E. L. Lydia, M. Elhoseny, and K. Shankar, "Energy Efficient Neuro-Fuzzy Cluster based Topology Construction with Metaheuristic Route Planning Algorithm for Unmanned Aerial Vehicles," *Computer Networks*, vol. 196, 2021, Art. no. 108214, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108214>.
- [102] H. Chen, Y. Cong, X. Wang, X. Xu, and L. Shen, "Coordinated path-following control of fixed-wing unmanned aerial vehicles," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 52, no. 4,