

طراحی سیستم هدایت جمعی ربات‌های کروی هوایی با هوش اجتماعی الهام گرفته از حرکت بهینه ملخ‌ها و منطق فازی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰

ایمان شفیعی نژاد^۱

۱- هیات علمی پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران. shafieenejad@ari.ac.ir

چکیده

در این مقاله، یک سیستم هدایت هوشمند و خودران برای ربات‌های کروی هوایی بر اساس آنالوژی از حرکت دسته جمعی ملخ‌ها و استفاده از منطق فازی ارائه شده است. این سیستم با الهام از رفتار بهینه اجتماعی ملخ‌ها طراحی شده، که منجر به توسعه الگوریتمی برای بهینه‌سازی مسیر حرکت گروهی ربات‌ها می‌شود. این الگوریتم نه تنها قادر به هماهنگی دقیق ربات‌ها در حرکت دسته جمعی است، بلکه از منطق فازی برای افزایش قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری سیستم در مواجهه با شرایط محیطی و نویزهای ارتباطی بهره می‌برد. در این روش، علاوه بر قابلیت هدایت هوشمند ربات‌ها، عوارض زمین به عنوان قیود مسیریابی در نظر گرفته شده است. این طراحی با قابلیت حرکت ربات‌ها در محیط‌های مختلف مانند هوا و زمین، پایداری حرکت آنها را تضمین می‌کند. از طرف دیگر، الهام‌گیری از رفتار هوشمند ملخ‌ها نه تنها یک روش هدایت برخط را فراهم کرده است، بلکه باعث شده تا ربات‌ها به صورت آبی و برخط مسیرهای بهینه‌تری را پیدا کنند. رفتار اجتماعی ملخ‌ها که منجر به ایجاد روش‌های بهینه‌سازی شده است، نشان دهنده طراحی بهینه مسیر برای گروهی از ربات‌ها است، که در عملیات نجات و مأموریت‌های پیچیده عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. در نهایت، این سیستم به عنوان یک راهکار جامع و کارآمد برای بهبود هماهنگی و حرکت دسته‌جمعی ربات‌های هوایی با دقت بالایی در مقایسه با سایر روش‌ها ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: هوش اجتماعی، ملخ، منطق فازی، هدایت خودران، بهینه‌سازی مسیر، ربات کروی هوایی

۱۹۳

سال ۱۴ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۴

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

طراحی سیستم هدایت جمعی ربات‌های کروی هوایی با هوش اجتماعی الهام گرفته از حرکت بهینه ملخ‌ها و منطق فازی

Design of swarm guidance for aerial spherical robots with social intelligence inspired by grasshopper' optimal motion and fuzzy logic

Iman Shafieenejad¹

1- Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science Research & Technology, Iran.

Abstract

In this paper, an intelligent and autonomous guidance system for aerial spherical robots is presented, based on an analogy to the swarm motion of grasshoppers and the application of fuzzy logic. The system is inspired by the optimal social behavior of grasshoppers, leading to the development of an algorithm for optimizing the swarm path planning of the robots. This algorithm not only ensures precise coordination of robots in swarm motion but also leverages fuzzy logic to enhance the system's reliability and flexibility in dealing with environmental conditions and communication noise. The integration of fuzzy logic enables adaptive and intelligent decision-making, allowing the system to perform effectively in complex environments. Furthermore, drawing inspiration from the intelligent behavior of grasshoppers not only facilitates real-time guidance but also enables the robots to discover optimized path dynamically and adaptively. The social behavior of grasshoppers, which forms the foundation for optimization methods, demonstrates an effective design for swarm path planning of robots, particularly in rescue operations and complex missions. Ultimately, this system is proposed as a comprehensive and efficient solution to improve coordination and swarm movement of aerial robots precisely in compare with the last conventional methods.

Keywords: social intelligence, grasshoppers, fuzzy logic, autonomous guidance, path optimization, spherical aerial robots.

۱- مقدمه

ربات‌های هوایی، به ویژه ربات‌های هوایی کروی، در سال‌های اخیر به یکی از ابزارهای کارآمد در زمینه‌های مختلف تبدیل شده‌اند. این ربات‌ها به دلیل طراحی خاص و قابلیت‌های منحصر به فرد خود، می‌توانند در محیط‌های پیچیده و متنوعی عمل کنند. برای مثال، در حوزه‌های جستجو و نجات، این ربات‌ها می‌توانند به سرعت به محل وقوع حوادث طبیعی، مانند زلزله یا سیل، دسترسی پیدا کرده و اطلاعات حیاتی را جمع‌آوری کنند. همچنین، در عملیات‌های نظامی، ربات‌های هوایی به عنوان ابزارهای نظارتی و شناسایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که قادر به ارائه تصاویر و اطلاعات به‌روز از مناطق تحت نظر هستند [۱، ۲].

هدایت و کنترل هوشمند در سیستم‌های خودران به معنای ایجاد قابلیت تصمیم‌گیری مستقل و تطبیق‌پذیری در ربات‌ها برای مواجهه با شرایط متغیر و غیر قابل پیش‌بینی محیطی است. این مفهوم بر پایه استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته‌ای بنا شده است که توانایی پردازش داده‌های محیطی، شناسایی موانع، و انتخاب بهترین مسیر را در زمان واقعی برای ربات‌ها فراهم می‌کند. این سیستم‌ها از فناوری‌های نوین مانند یادگیری ماشینی، بینایی کامپیوتری، و شبکه‌های عصبی بهره می‌برند که امکان تحلیل سریع داده‌های حجیم و استخراج اطلاعات مفید را ایجاد می‌کند. در نتیجه، هدایت هوشمند می‌تواند ربات‌ها را به تصمیم‌گیری‌هایی با دقت بالا در محیط‌های پویا و نویز دار قادر سازد [۳-۵]. از سوی دیگر، الگوریتم‌های مبتنی بر قوانین و سیستم‌های خبره نیز در هدایت هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند تا رفتارهای پیچیده‌ای

مانند اجتناب از موانع، حفظ پایداری، و مدیریت تعادل در حرکت را امکان‌پذیر کنند. این ویژگی‌ها به ویژه در ربات‌های کروی هوایی، که در محیط‌های سه بعدی و پیچیده عمل می‌کنند، اهمیت ویژه‌ای دارند [۶-۸].

در سیستم‌های چندعاملی، هوشمند سازی به هماهنگی دقیق و کارآمد میان عوامل مختلف کمک می‌کند. این هماهنگی شامل تبادل اطلاعات میان عوامل، و تصمیم‌گیری همزمان برای دستیابی به اهداف مشترک است [۹]. برای مثال، در یک دسته از ربات‌های کروی هوایی، هدایت هوشمند نه تنها از برخورد میان آن‌ها جلوگیری می‌کند، بلکه حرکت گروهی آن‌ها را بهینه می‌سازد. این سیستم‌ها با استفاده از ترکیب اطلاعات موقعیتی، سرعت، و مسیرهای پیشنهادی، ربات‌ها را قادر می‌سازند تا به صورت همزمان به موانع پاسخ داده و مسیرهای ایمن و کارآمدی را انتخاب کنند. در مجموع، هدایت هوشمند نقش حیاتی در عملکرد پایدار و کارآمد ربات‌های خودران دارد و توانایی آن‌ها را در انجام مأموریت‌های پیچیده و متنوع به میزان چشمگیری افزایش می‌دهد [۱۰، ۱۱].

حرکت بهینه در طبیعت، به ویژه رفتارهای اجتماعی ملخ‌ها، الهام‌بخش طراحی الگوریتم‌های پیشرفته بهینه‌سازی مسیر در سیستم‌های خودران است. ملخ‌ها به طور طبیعی از ساز و کارهای پیچیده‌ای برای هماهنگی گروهی و تصمیم‌گیری جمعی استفاده می‌کنند که به آن‌ها اجازه می‌دهد در دسته‌های بزرگ و با صرف کمترین انرژی ممکن در مسافت‌های طولانی حرکت کنند. این رفتار شامل پیش‌بینی و اجتناب از برخورد، تنظیم فاصله بین اعضا گروه، و تغییر مسیر هماهنگ در واکنش به موانع محیطی است.



این ویژگی‌ها در کنار کارایی حرکتی بالای ملخ‌ها، الهام بخش توسعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر طبیعت شده است که در سیستم‌های خودران مورد استفاده قرار می‌گیرند. الگوریتم‌های الهام‌گرفته از ملخ با شبیه‌سازی رفتارهای اجتماعی آن‌ها، توانایی سیستم‌های رباتیک را در یافتن مسیرهای کوتاه‌تر، اجتناب از موانع و انطباق با شرایط متغیر محیطی افزایش می‌دهند [۱۲-۱۴].

در سیستم‌های رباتیک، روش‌های هوشمند به طراحی مسیرهایی منجر می‌شوند که علاوه بر بهره‌وری انرژی، زمان رسیدن به مقصد را نیز بهینه می‌کنند. الگوریتم‌های الهام‌گرفته از حرکت ملخ‌ها به سیستم‌های خودران هوایی کمک می‌کنند تا داده‌های محیطی مانند موقعیت موانع، مسیرهای مطلوب، و تراکم دسته را تحلیل کرده و رفتارهای جمعی را برای دستیابی به اهداف مأموریتی شبیه‌سازی کنند. در طراحی مسیر برای ربات‌های کروی هوایی، این روش نه تنها قابلیت تطبیق‌پذیری با محیط‌های پیچیده و دینامیک را افزایش می‌دهد، بلکه امکان مدیریت بهینه منابع انرژی و زمان را در مأموریت‌هایی مانند جستجو و نجات فراهم می‌سازد. ترکیب این الگوریتم‌ها با سیستم‌های هدایت هوشمند، به کاهش زمان پردازش و افزایش کارایی کلی در محیط‌های متنوع منجر می‌شود و یک راهکار عملی و الهام‌گرفته از طبیعت برای مأموریت‌های پیچیده ارائه می‌دهد [۱۵].

از طرف دیگر، منطق فازی یکی از ابزارهای کلیدی در سیستم‌های هدایت هوشمند است که به ربات‌ها امکان تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت و پیچیدگی محیطی را می‌دهد. برخلاف سیستم‌های کلاسیک که مبتنی بر قوانین پیچیده

و قطعی عمل می‌کنند، منطق فازی توانایی تحلیل داده‌هایی را دارد که دارای ابهام یا عدم قطعیت هستند. این ویژگی باعث می‌شود سیستم‌های مجهز به منطق فازی قادر به عملکرد موثر در محیط‌هایی با تغییرات سریع، داده‌های ناقص، و نویزهای ارتباطی باشند. منطق فازی با تعریف مجموعه‌ای از قوانین قابل فهم و انعطاف‌پذیر، به ربات‌ها کمک می‌کند تا رفتارهایی تطبیقی و متناسب با شرایط محیطی از خود نشان دهند. این سیستم با استفاده از توابع عضویت و قواعد منطقی طراحی شده، قادر است ورودی‌هایی همچون موقعیت موانع، سرعت باد، و وضعیت جغرافیایی را تحلیل کرده و تصمیماتی را ارائه دهد که بهینه‌ترین مسیر ممکن را مشخص کنند [۱۶، ۱۷].

در طراحی مسیر برای ربات‌های کروی هوایی، منطق فازی نقش کلیدی در مدیریت چالش‌هایی مانند برخورد احتمالی، ناپایداری حرکتی، و تغییرات ناگهانی محیطی ایفا می‌کند. با استفاده از این روش، سیستم می‌تواند به صورت بلادرنگ تصمیم‌گیری کرده و به تغییرات محیطی واکنش نشان دهد. یکی از مزایای منطق فازی در این کاربرد، توانایی آن در ترکیب داده‌های متنوع و ایجاد پاسخ‌هایی است که همزمان بهینه و منعطف هستند. برای مثال، در شرایطی که اطلاعات دقیقی از محیط در دسترس نیست، منطق فازی می‌تواند با تحلیل تقریبی داده‌ها مسیرهایی ایمن و کارآمد را برای ربات‌ها انتخاب کند. این قابلیت نه تنها به بهبود پایداری و هماهنگی در حرکت گروهی ربات‌ها کمک می‌کند، بلکه بهره‌وری انرژی و زمان را نیز افزایش می‌دهد. در نتیجه، استفاده از منطق فازی در طراحی مسیر، امکان عملکرد بهتر ربات‌ها در





مأموریت‌های پیچیده‌ای مانند جستجو و نجات یا عملیات در محیط‌های شهری و طبیعی را فراهم می‌آورد [۲۰-۱۸].

ربات‌های هوایی گروهی به دلیل شکل خاص و ساختار فیزیکی آنها، مزایای منحصر به فردی را ارائه می‌دهند. طراحی گروهی این ربات‌ها به آنها این امکان را می‌دهد که با برخورد با موانع در محیط‌های داخلی و باریک، آسیب نبینند و از اجزای داخلی خود محافظت کنند. این ویژگی به ویژه در کاربردهایی مانند بازرسی لوله‌های نفتی، بررسی ساختمان‌ها و حتی پرواز درون معابر تنگ و پیچیده اهمیت دارد. به علاوه، ربات‌های گروهی قادر به انجام پروازهای خودکار و دستی هستند و می‌توانند به راحتی در محیط‌های مختلف حرکت کنند. با پیشرفت فناوری، ربات‌های هوایی به ویژه گروهی در زمینه‌های تجاری نیز به کار گرفته می‌شوند [۲۴-۲۱].

ربات‌های هوایی گروهی با قابلیت ارائه نظارت نزدیک در فضاهای باریک یا مناطق شهری، مورد توجه بسیاری از محققان و دانشمندان قرار گرفته‌اند. ربات‌های هوایی گروهی نسبت به ربات‌های هوایی کوچک متعارف، مزایای طراحی قابل توجهی را ارائه می‌دهند. در مرجع [۲۵]، به معرفی ربات‌های هوایی گروهی به عنوان نوعی جدید از ربات‌های هوایی کوچک پرداخته می‌شود. ابتدا، ساختار منحصر به فرد ربات‌های هوایی گروهی به تفصیل ارائه می‌شود. سپس، دینامیک آن بر اساس ساختار این وسیله تحلیل شده و معادلات نیرو و گشتاورهای اعمال شده بر روی ربات به دست می‌آید. بر اساس این اطلاعات، مدل دینامیکی ربات‌های هوایی گروهی استخراج و معادله حالت غیرخطی آن برقرار می‌شود. سیستم کنترلی حرکت پروازی ربات‌های هوایی گروهی، شامل

بخش‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، به طور مشخص ارائه می‌گردد. برای دستیابی به پایداری حرکت ربات‌های هوایی گروهی، از روش کنترل پس‌گام^۱ در معادله حالت استفاده می‌شود. در نهایت، نتایج تجربی و تحلیل‌های شبیه‌سازی ارائه شده است تا قابلیت پرواز ربات‌های هوایی گروهی در فضا تأیید گردد.

مرجع [۲۶] به طراحی یک هدایت هوشمند برای کوادکوپتر بر پایه یادگیری تقویتی پرداخته شده است. هدایت هوشمند فوق‌وظیفه کنترل کامل عملیات فرود و برخاست را حتی در شرایط باد متغیر، به عهده دارد. برای تسهیل آموزش یادگیری تقویتی، یک مدل باد طراحی شده و دو الگوریتم، گرادیانی و بهینه‌ساز تکاملی مقایسه می‌شوند. در مرجع [۲۷] طراحی و یکپارچه‌سازی سیستم یک ربات‌های هوایی گروهی جدید با محورهای موازی و عملگرهای لبه‌ای را برای عملیات در محیط‌های پیچیده مانند ساختمان‌ها، غارها یا تونل‌ها ارائه می‌شود. طراحی گروهی به حفاظت از اجزای داخلی وسیله کمک می‌کند و به ربات اجازه می‌دهد در صورت امکان به راحتی بر روی زمین بچرخد. علاوه بر این، این ربات می‌تواند از هر جهت فرود و برخاست نماید و با اشیاء تماس داشته باشد بدون آنکه پروانه‌ها در معرض خطر برخورد قرار گیرند. لبه‌های موجود در پایین کره، گشتاورهای چرخش تولید می‌کنند که در مقابل طراحی‌های سنتی صفحه‌ای لغزشی عمل می‌کند. این لبه‌ها که در زیر پروانه‌ها قرار دارند، امکان کنترل جداگانه چرخش و شیب را به صورت تغییرات رانش فراهم می‌آورند. نتیجه نهایی این طراحی، یک ربات‌های هوایی محافظت شده، آسان برای کنترل، انعطاف‌پذیر و چابک برای عملیات در محیط‌های پیچیده است. این ربات‌های هوایی

کروی در چندین مورد با سیستم‌های کنترل PD و کنترل‌های غیر خطی با موفقیت آزمایش شده و مشاهده شد که به راحتی پایدار می‌شود و تا حدی در برابر اختلالات خارجی مقاوم است [۲۷].

بیشتر ربات‌های هوایی کروی^۲ از سطوح کنترلی استفاده می‌کنند که شامل عملگرهای بال و دم هستند تا گشتاور کنترلی تولید کنند. لذا یک طراحی مفهومی جدید برای سیستم فوق ارائه شده است که از طریق تغییرات مرکز جرم می‌شود و قانون کنترل مسیر آن برای سیستم طراحی شده است. در مقایسه با طراحی‌هایی که از سطوح کنترلی استفاده می‌کنند، این مفهوم به ویژه در زمینه امکان ساخت ربات‌های کروی سبک‌تر و کوچک‌تر مزایای قابل توجهی دارد. اصل تغییر مرکز ثقل با استفاده از یک قسمت متحرک نوع آونگی به عنوان روشی برای کنترل حرکت‌های انتقالی و چرخشی ربات در نظر گرفته شده است. از آنجا که تغییرات در عناصر ممان اینرسی ناشی از حرکت قسمت متحرک بر عملکرد تأثیر می‌گذارد، تجزیه و تحلیل تغییرات آن برای تمام دامنه‌های زاویه‌ای قسمت متحرک انجام شده است [۲۸].

تحلیل سیستم عملیاتی و طراحی هدایت و کنترل‌کننده برای یک سیستم ربات هوایی از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهشی دیگر، سیستم ثانویه یا همان ربات پیرو، به عنوان یک اتصال الحاقی با طناب در حوزه سیستم‌های غیرخطی در نظر گرفته می‌شود. این تحلیل به منظور افزایش ایمنی عملیاتی انجام می‌شود، زیرا این موضوع برای موفقیت مأموریت‌های پروازی اهمیت دارد [۲۹]. همچنین، مرجع فوق به مشکلاتی که هنگام استفاده از ربات‌های هوایی

در عمل، به ویژه در زمینه‌های جستجو و نجات، نظامی و تحقیقات علمی به وجود می‌آید، می‌پردازد. همچنین یک رویکرد هدایت و کنترل مقاوم برای توسعه قانون کنترل در نظر گرفته شده است. کنترل‌کننده به گونه‌ای طراحی شده است که پایداری سیستم ربات را تضمین کرده و امکان انجام موفقیت‌آمیز مأموریت‌ها را فراهم می‌آورد.

مرجع [۳۰] به طراحی مفهومی یک ربات هوایی میکرو با محورهای موازی می‌پردازد که بر اساس دینامیک پروازی و تحلیل آیرودینامیکی ساده با استفاده از دینامیک سیال محاسباتی انجام شده است. همچنین، یک کنترل خطی ساده با استفاده از تکنیک تخصیص قطب‌ها پیشنهاد می‌شود. روش‌شناسی پیشنهادی در این مرجع شامل یک مسیر استاندارد برای طراحی ربات هوایی میکرو با محورهای موازی شبیه ربات هوایی کروی است. در واقع، مدل ریاضی خطی سازی می‌شود تا نیازمندی‌های دینامیکی وسیله را به دست آورد. این نیازمندی‌ها این امکان را می‌دهند که طرح کنترل را با استفاده از تکنیک کنترل خطی طراحی شود.

کنترل ردیابی برای چندین ربات هوایی با تأخیرهای زمانی متغیر در شبکه ارتباطی هدایت و دینامیک غیر خطی موضوع پیچیده‌ای است که در مرجع [۳۱] مورد پژوهش قرار گرفته است. این محدودیت‌های وضعیتی و تأخیرهای زمانی در شبکه ارتباطی هدایت شده چالش‌های زیادی برای طراحی هدایت و کنترل به همراه دارند. به این منظور، طراحی شبیه به ساختار مجازی ارائه می‌شود تا با استفاده از عملکردهای تابع لیاپونوف، پایداری سیستم به دست آید. سپس یک تابع لیاپونوف برای بررسی محدودیت‌های وضعیتی به





منظور طراحی یک الگوریتم جدید ربات گروهی پیشنهاد می‌شود. فرضیات کلی شامل نرخ تغییر تأخیرهای زمانی متغیر و محدوده تنظیمات اولیه موقعیت و سرعت مشخص شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده قابلیت و کارآمدی الگوریتم پیشنهادی است.

هدف این مرجع ارائه یک پیکربندی برای یک وسیله نقلیه رباتیک گروهی چند منظوره طراحی شده برای مأموریت‌های جستجو و نجات است که مزایای پرواز معلق، پرواز افقی و حرکت بر روی زمین را ترکیب می‌کند. قاب گروهی این وسیله به آن اجازه می‌دهد تا با اشیاء برخورد کند بدون آنکه خطر آسیب به پروانه و اجزای داخلی آن وجود داشته باشد، و همچنین می‌تواند بدون نیاز به انجام مانور فرود هماهنگ در هر نقطه فرود بیاید. این ربات گروهی هوایی شامل یک پروانه و هشت تیغه کنترلی است که در یک قاب گروهی تقویت شده قرار دارد. یک مدل دینامیکی دقیق با استفاده از فرمولاسیون نیوتن-اولیئر ایجاد شده و برای برآورد وضعیت در حالت پرواز معلق در شرایط متوازن، خطی‌سازی می‌شود. پایداری موفقیت‌آمیز وضعیت در هنگام برخاستن و حفظ حالت پرواز معلق با استفاده از یک کنترل‌کننده PID بررسی شده است [۳۲]. در حال حاضر، کاربرد ربات‌های هوایی بدون سرنشین در زندگی روزمره به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود، اما اگر این ربات‌ها از کنترل خارج شوند و با محیط پیرامون برخورد کنند، می‌توانند به راحتی موجب تخریب شوند. در پژوهشی دیگر، یک هواگرد سه‌پره‌ای با ظاهری گروهی طراحی شده است. پروانه و سایر اجزای این ربات هوایی مانند اکثر ربات‌های گروهی در داخل پوسته قرار گرفته‌اند

که حفاظت خوبی برای ربات و زیر سیستم‌های آن فراهم می‌کند [۲۴].

حرکت دسته‌جمعی ربات‌های هوایی به عنوان یک حوزه مهم در مهندسی رباتیک، به بررسی نحوه هماهنگی و تعامل ربات‌ها با یکدیگر در انجام وظایف خاص می‌پردازد. الهام‌گیری از رفتار موجودات زنده، به ویژه حشرات اجتماعی مانند ملخ‌ها و زنبورهای عسل، می‌تواند به بهبود عملکرد این ربات‌ها کمک کند. برای مثال، ملخ‌ها به عنوان گروهی از موجودات، دارای رفتارهای هماهنگ و سنجیده‌ای هستند که به آنها این امکان را می‌دهد تا به طور مؤثری به جستجو و تغذیه بپردازند. الگوهای حرکتی آنها شامل جابه‌جایی‌های دقیق و انطباقی است که می‌تواند به ربات‌ها الهام بخشیده و به آنها کمک کند تا در محیط‌های متغیر به راحتی حرکت کنند [۱، ۳۳-۳۶].

زنبورهای عسل نیز از دیگر موجودات الهام بخش در طراحی مسیر ربات‌های هوایی هستند. این زنبورها در هنگام جستجوی منابع غذایی به طور هماهنگ و کارآمد عمل می‌کنند و از الگوهای حرکت خاصی برای انتقال اطلاعات به دیگر زنبورها استفاده می‌کنند. این رفتار اجتماعی باعث بهبود جستجو و کاوش در محیط‌های پیچیده می‌شود. با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی الهام گرفته از این رفتارها، ربات‌های هوایی می‌توانند حرکتی خودران و بهینه‌ای را برای دستیابی به اهداف خود طراحی کنند. این الگوریتم‌ها به ربات‌ها این امکان را می‌دهند که در گروه‌های همزمان و به طور مستقل حرکت کنند و به سرعت به تغییرات محیطی پاسخ دهند [۱۸].

شایان ذکر است که در مرجع فوق، یک روش هدایت آنالین نوآورانه بر اساس آنالوژی با حرکت زنبورهای عسل پیشنهاد شد. الگوریتم زنبور عسل برای بهینه‌سازی حرکت ربات‌های هوایی به کار گرفته شد و هدایت خودکار مؤثری را از طریق شبیه‌سازی‌های سه بعدی انجام داده است.

طراحی مسیرهای خودران برای ربات‌های هوایی به طور خاص می‌تواند از طریق شبیه‌سازی و مدل‌سازی رفتار این موجودات زنده انجام شود. با تجزیه و تحلیل الگوهای حرکتی و تعاملات اجتماعی ملخ‌ها و زنبورهای عسل، می‌توان الگوهای جدیدی برای کنترل حرکت دسته‌جمعی ربات‌ها ایجاد کرد. این طراحی می‌تواند شامل الگوریتم‌های بهینه‌سازی مسیر، کنترل توزیع شده و هوش جمعی باشد که به ربات‌ها این امکان را می‌دهد تا به صورت هماهنگ و کارآمد به اهداف خود دست یابند. در نتیجه، الهام‌گیری از رفتار موجودات زنده نه تنها به بهبود حرکت دسته‌جمعی ربات‌های هوایی کمک می‌کند، بلکه به توسعه راهکارهای نوین برای طراحی سیستم‌های خودران و هوشمند منجر می‌شود [۱، ۲، ۳۷-۴۲].

پژوهش حاضر، به ارائه هدایت هوشمند یک ربات هوایی کروی پرداخته است. لذا یک روش نوین هدایت خودران بر اساس الهام از حرکت دسته‌جمعی بهینه ملخ‌ها معرفی شده است. این روش به گونه‌ای طراحی شده است که به ربات امکان می‌دهد در محیط‌های پیچیده به صورت مؤثر و هماهنگ حرکت کند. همچنین، برای افزایش قابلیت اطمینان این روش، از منطق فازی بهره‌برداری شده است. این رویکرد به ربات کمک می‌کند تا بتواند به طور بهینه به تغییرات

محیطی پاسخ دهد و تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه‌ای در حین عملیات خود اتخاذ کند.

نوآوری اصلی این پژوهش در ترکیب رفتار جمعی ملخ‌ها با منطق فازی به منظور طراحی یک سیستم هدایت هوشمند برای ربات‌های کروی هوایی است. الهام‌گیری از رفتار اجتماعی ملخ‌ها که به طور طبیعی برای هماهنگی گروهی و اجتناب از موانع طراحی شده است، منجر به توسعه یک الگوریتم پیشرفته بهینه‌سازی مسیر می‌شود که انرژی مصرفی ربات‌ها را کاهش داده و دقت مسیریابی را در مقایسه با سایر روش‌های کلاسیک بهبود می‌بخشد. استفاده از منطق فازی برای بهینه‌سازی مسیر و مدیریت منابع انرژی در محیط‌های پیچیده و مأموریت‌های جستجو و نجات، امکان تصمیم‌گیری‌های تطبیقی و هوشمندانه را فراهم می‌آورد و به عملکرد بهتر سیستم در مواجهه با شرایط محیطی و نویزهای ارتباطی کمک می‌کند. همچنین، یکی از نوآوری‌های کلیدی این سیستم، در نظر گرفتن عوارض زمین به عنوان قیود مسیریابی است که این ویژگی به ویژه در محیط‌های پیچیده و ناهموار حیاتی است و به بهینه‌سازی حرکت ربات‌ها در چنین شرایطی کمک می‌کند. این پژوهش توانسته است، چالش‌های عمده‌ای که در تحقیقات قبلی وجود داشت، همچون خطاهای مسیریابی و تطبیق با شرایط دینامیک و غیرقطعی محیط، را به طور مؤثر حل کند. الگوریتم ملخ-فازی در مقایسه با دیگر روش‌ها، مانند الگوریتم‌های زنبور عسل، عملکرد بهتری در بهینه‌سازی مسیر، دقت، و صرفه‌جویی در انرژی از خود نشان داده است. این برتری به ویژه در شبیه‌سازی‌هایی با افزایش تعداد ربات‌ها و تکرارهای الگوریتم قابل مشاهده است. همچنین،





سیستم پیشنهادی با توانایی تطبیق با شرایط محیطی پیچیده، به ویژه در مأموریت‌های نجات که نیاز به تصمیم‌گیری‌های سریع و دقیق دارند، از سایر روش‌های موجود برتر است.

۲- ربات کروی هوایی

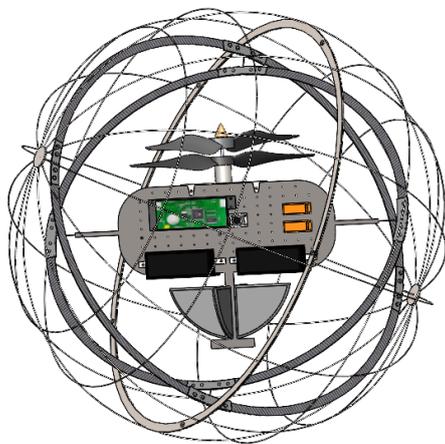
ربات هوایی کروی مطرح در این پژوهش از دو بخش اصلی تشکیل شده است: بخش مرکزی که شامل برد الکترونیکی، باتری، موتور و پره‌های هدایت و کنترل است و بخش دوم که یک قاب بندی ویژه با رفتار ژيروسکوپ را در بر می‌گیرد. این قاب بندی، مشابه ژيروسکوپ‌ها، شامل سه قاب است که محموله روی قاب داخلی قرار دارد و قاب خارجی به صورت یک کره مشبک طراحی شده است. این طراحی موجب می‌شود که محموله هنگام برخورد کره خارجی با محیط اطراف، به طور کامل از رفتار ژيروسکوپ پیروی کند. این ویژگی، برتری قابل توجهی نسبت به سیستم‌های هوافضایی قدیمی به این سامانه می‌بخشد. پیشرانه روی قاب بندی سه محوره داخلی نصب می‌شود که وظیفه حفظ پایداری را بر عهده دارد. سیستم هدایت و کنترل این ربات هوایی کروی نیز با طراحی هوشمند خودران صورت گرفته است.

ساختار سه محوره کروی به ربات این امکان را می‌دهد که بدون برخورد با محیط اطراف حرکت کند، پایداری ذاتی داشته باشد، مداومت پروازی بالاتری فراهم کند و بتواند هم در هوا و هم بر روی زمین حرکت کند.

این سیستم دارای ویژگی‌های متنوعی است که آن را برای انواع مأموریت‌ها حتی در محیط‌های غیر قابل نفوذ ایده آل می‌سازد (شکل ۱)). هدایت هوشمند خودران، به این سامانه

اجازه می‌دهد که به عنوان یک وسیله دوگانه برای حرکت در هوا و زمین نیز به کار رود. ساختار ژيروسکوپ این سیستم همچنین باعث می‌شود موتور و ملخ‌ها به طور خودکار به سمت بالا تنظیم شوند، که به ربات اجازه می‌دهد در برابر موانع محیطی مقاومت کند و پایداری خود را حفظ کند. این ویژگی باعث کاهش نیاز به مانورهای کنترلی پیچیده و صرفه‌جویی در انرژی می‌شود، که در نتیجه آن، ربات هوایی کروی برای مأموریت‌های بازرسی بسیار کارآمد خواهد بود.

ساختار ۳ محوره کروی سبب قابلیت‌های حذف برخورد کوآدراتور با محیط پیرامون، پایداری ذاتی، افزایش مداومت پروازی، حرکت هوایی و بر روی زمین خواهد شد. در شکل (۱) نمای طراحی شده برای این ربات هوایی کروی آورده شده است.



شکل ۱. نمای رو به رو از طرح نهایی ربات کروی

۳- هوش مصنوعی و هوش جمعی

در جانوران، هوش جمعی به عنوان توانایی بقا و موفقیت در گروه‌های اجتماعی تکامل یافته است. بسیاری از گونه‌ها، مانند پستانداران عالی و پرندگان اجتماعی، دارای رفتارهای گروهی پیچیده‌ای هستند که نیاز به درک روابط متقابل و

ساختارهای اجتماعی دارد. این توانایی‌ها به آنها امکان می‌دهد که در شرایط مختلف اجتماعی، از جمله رقابت بر سر منابع یا دفاع در برابر دشمنان، به طور موثری عمل کنند. هوش اجتماعی از طریق یادگیری، مشاهده، و تجربه تقویت می‌شود [۴۳-۴۶].

هوش اجتماعی حیوانات به توانایی‌های گروهی و تعاملات اجتماعی بین اعضای یک گونه اشاره دارد که به آنها امکان می‌دهد به صورت هماهنگ در محیط‌های پیچیده زنده بمانند و موفقیت خود را افزایش دهند. در بسیاری از گونه‌های اجتماعی، مانند ملخ‌ها، این هوش اجتماعی به عنوان یک ابزار کلیدی برای زنده ماندن و بهینه‌سازی رفتارهای گروهی تکامل یافته است. ملخ‌ها به طور خاص، با حرکت‌های دسته‌جمعی و هماهنگ خود، نمونه‌ای از این نوع هوش اجتماعی در طبیعت هستند. این رفتارها، مانند حرکت‌های جمعی برای جستجوی منابع غذایی و مهاجرت، از طریق فرآیندهای اجتماعی و تعاملات ساده بین اعضا گروه صورت می‌گیرد، اما در نهایت به نتایج بهینه و کارآمد منجر می‌شود [۴۰, ۴۷-۴۹].

ملخ‌ها با رفتارهای اجتماعی هماهنگ خود توانایی عبور از موانع طبیعی و جستجوی منابع جدید در محیط‌های متغیر را دارند. به عنوان مثال، زمانی که یک گروه بزرگ ملخ‌ها شروع به حرکت می‌کند، نیروی جاذبه و دافعه بین آنها باعث می‌شود که گروه به طور هماهنگ و با حداقل انرژی به سمت منابع جدید حرکت کند. این رفتار جمعی، که از قوانین ساده طبیعت پیروی می‌کند، به عنوان مدلی برای توسعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم بهینه‌سازی ملخ^۴ مورد استفاده قرار گرفته است.

این الگوریتم‌ها با الهام از حرکت‌های اجتماعی ملخ‌ها به حل مسائل پیچیده در حوزه‌های مختلف مانند مهندسی، بهینه‌سازی مسیر، و حتی طراحی ربات‌های خودران می‌پردازند. هوش اجتماعی ملخ‌ها در علوم مهندسی و کاربردی، به توسعه الگوریتم‌هایی منجر شده است که می‌توانند در بهینه‌سازی فرآیندها و تصمیم‌گیری‌های خودکار موثر باشند. الگوریتم‌های فوق از رفتارهای اجتماعی حیوانات الهام گرفته شده‌اند تا مسائلی نظیر بهینه‌سازی چند هدفه، مسیریابی خودکار و حل مسائل پیچیده محاسباتی را به صورت کارآمدتر و سریع‌تر حل کنند. این کاربردها به خصوص در زمینه‌های رباتیک، هوش مصنوعی، و مهندسی سیستم‌های پیچیده کاربرد دارند [۵۰-۵۲].

از آنجا که هوش مصنوعی^۵ نیز به دنبال ایجاد الگوریتم‌هایی است که بتوانند مانند ذهن انسان به تصمیم‌گیری و حل مسائل پردازند، الگوریتم‌هایی که از هوش اجتماعی حیوانات مانند ملخ‌ها الهام گرفته‌اند، یک شاخه از هوش مصنوعی محسوب می‌شوند. این الگوریتم‌ها به جای تحلیل داده‌های صرفاً عددی یا محاسبات پیچیده ریاضی، از قوانین اجتماعی و رفتارهای بهینه‌سازی طبیعی استفاده می‌کنند تا به بهترین راه‌حل‌ها دست یابند. به عنوان مثال، در الگوریتم‌های الهام‌گرفته از ملخ‌ها، از همان قوانین ساده‌ای که در طبیعت موجب حرکت دسته‌جمعی ملخ‌ها می‌شود، برای بهینه‌سازی سیستم‌های مهندسی استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها مانند هوش مصنوعی، توانایی تصمیم‌گیری و حل مسائل پیچیده را دارند، اما منبع الهام آنها رفتارهای اجتماعی طبیعی است [۵۳-۵۷].

۲۰۱

سال ۱۴ - شماره ۱
بهار و تابستان ۱۴۰۴
نشریه علمی
دانش و فناوری هوا فضا



طراحی سیستم هدایت جمعی ربات‌های گروهی هوایی با هوش اجتماعی الهام گرفته از حرکت بهینه ملخ‌ها و منطق فازی

۴- رفتار جمعی ملخ‌ها

ملخ‌ها به طور معمول به صورت فردی مشاهده می‌شوند، اما رفتارهای جمعی دارند که در شرایط خاص به شکل گروهی^۶ ظاهر می‌شوند. یکی از ویژگی‌های برجسته زندگی اجتماعی ملخ‌ها، حرکت دسته جمعی و مهاجرت گسترده آن‌ها به منظور جستجوی منابع غذایی است. حرکت‌های اجتماعی ملخ‌ها با الگوهای از جاذبه و دافعه میان اعضا گروه همراه است که امکان جابجایی و کشف منابع جدید را برای کل گروه فراهم می‌کند. در این الگوها، ملخ‌ها با حرکات کوتاه و آرام به صورت گروهی حرکت می‌کنند و با مصرف مواد غذایی در مسیر حرکت خود، به دنبال منابع جدید می‌گردند (شکل (۲)). این تغییر در الگوی حرکت باعث می‌شود ملخ‌ها بتوانند از دو ویژگی اکتشاف^۸ و بهره‌برداری^۹ استفاده نمایند که این خود یک رفتار بهینه طبیعی است. به همین دلیل، حرکت‌های گروهی ملخ‌ها به عنوان الگویی برای توسعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی در زمینه‌های مختلف مانند ربات‌های خودران مطرح شده است. در الگوریتم بهینه‌سازی ملخ^۹، از رفتارهای اجتماعی ملخ‌ها به عنوان مدلی ریاضی برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده شده است. این الگوریتم با تقلید از مکانیزم‌های جاذبه و دافعه میان ملخ‌ها، به جستجوی راه‌حل‌های بهینه در مسائل پیچیده می‌پردازد.



شکل ۲. رفتار دسته جمعی ملخ‌ها و هوش اجتماعی

جاذبه ملخ‌ها به یکدیگر، به آنها کمک می‌کند تا به سوی نقاط هدف نزدیک شوند، در حالی که نیروهای دافعه باعث جلوگیری از گیر افتادن در بهینه‌های محلی می‌شود. این ترکیب از نیروهای جاذبه و دافعه باعث می‌شود که ملخ‌ها بتوانند به طور کارآمدتر در محیط‌های پیچیده حرکت کنند و راه‌حل‌های بهتری پیدا کنند. نکته مهم دیگر در زندگی اجتماعی ملخ‌ها، توانایی آنها در سازگاری با محیط‌های متغیر و پیچیده است. آنها در طول حرکت‌های گروهی خود از الگوهای طبیعی برای بهینه استفاده می‌کنند و این توانایی به الگوریتم‌های بهینه‌سازی الهام گرفته از آنها امکان می‌دهد تا به صورت بهینه و خودکار در محیط‌های سه بعدی حرکت کنند.

۵- آنالوژی حرکت بهینه ملخ‌ها با ربات

هوایی

این پژوهش به بررسی آنالوژی رفتار ملخ‌ها با حرکت ربات‌های هوایی پرداخته و از الگوی طبیعی حرکت دسته جمعی ملخ‌ها برای طراحی الگوریتم حرکتی استفاده می‌کند. به دلیل اینکه ملخ‌ها در فضای سه بعدی حرکت می‌کنند و از تعاملات اجتماعی برای بهینه‌سازی مسیر خود بهره می‌برند، در این مدل، هر ربات هوایی نقش یک ملخ را ایفا می‌کند. این آنالوژی به ربات‌های هوایی امکان می‌دهد تا با الهام از رفتار اجتماعی

$$s(r) = fe^{-\frac{r}{T}} - e^{-r} \quad (6)$$

$$G_i = -ge_g \quad (7)$$

از طرف دیگر،

$$A_i = ue_w \quad (8)$$

در این رابطه، g ثابت گرانش و e_g یک بردار واحد به سمت زمین است. معادله (۸) نیز اثر نیروی باد روی ربات هوایی i را نشان می‌دهد. در این رابطه، u یک ثابت و e_w یک بردار واحد در جهت باد است. با جایگذاری S ، G ، و A در معادله (۱)، این معادله به صورت زیر بسط داده می‌شود:

$$X_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N s(|x_j - x_i|) \frac{|x_j - x_i|}{d_{ij}} - ge_g + ue_w \quad (9)$$

در معادله (۹)، s بر اساس معادله (۶) تعیین شده و N بیان کننده تعداد ربات‌ها در حرکت دسته جمعی است. در ادامه برای به روز رسانی حرکت ربات‌ها معادله زیر پیشنهاد می‌شود.

$$X_i^d = c \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N c \frac{ub_d - lb_d}{2} s(|x_j - x_i|) \frac{|x_j - x_i|}{d_{ij}} + T_d \right) \quad (10)$$

که در آن ub_d حد بالایی و lb_d حد پایینی در بعد D است. همچنین T_d بهترین راه حل پیدا شده تا کنون است. c ضریبی کاهنده است که منطقه امن (منطقه دافعه و منطقه جاذبه) را کوچک‌تر می‌کند. اولین ضریب c از سمت چپ باعث کاهش حرکت‌های ربات‌های هوایی i (ملخ‌ها) اطراف هدف می‌شود. به عبارت دیگر، این پارامتر تعادل بین اکتشاف و بهره برداری را برای

ملخ‌ها، به صورت هماهنگ و بهینه در محیط‌های پیچیده حرکت کنند و مأموریت‌های خود را به صورت خودران و با بهره‌گیری از هوش جمعی انجام دهند.

الگوریتم پیشنهادی این پژوهش، حرکت گروهی ربات‌های هوایی i در طبیعت را به صورت ریاضی مدل‌سازی می‌کند تا مسائل طراحی مسیر و هدایت برخط ربات‌های هوایی را حل کند. شکل کلی مدل ریاضی استفاده شده برای شبیه‌سازی رفتار گروهی ربات‌های هوایی i به صورت زیر است [۵۸]:

$$X_i = S_i + G_i + A_i \quad (1)$$

که در آن X_i موقعیت ربات هوایی i که شماره i ، S_i بیانگر تعامل ارتباطی بین ربات‌ها، G_i نیروی گرانش روی ربات هوایی i که شماره i و A_i جریان باد است. برای نمایش رفتار تصادفی ربات‌های هوایی، معادله (۱) با اضافه شدن عوامل تصادفی به معادله (۲) تبدیل می‌شود:

$$X_i = r_1 S_i + r_2 G_i + r_3 A_i \quad (2)$$

r_1 ، r_2 و r_3 اعداد تصادفی در بازه $[0, 1]$ هستند و S_i از طریق معادله (۳) به دست می‌آید:

$$S_i = \sum_{j=1}^N s(d_{ij}) \hat{d}_{ij} \quad (3)$$

که d_{ij} فاصله بین ربات هوایی i و j است و از معادله (۴) محاسبه می‌شود:

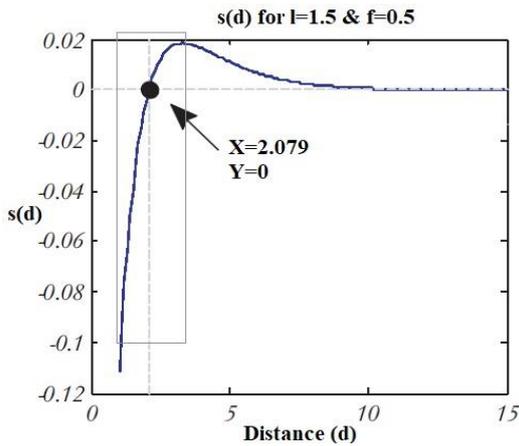
$$d_{ij} = |x_j - x_i| \quad (4)$$

\hat{d}_{ij} بردار واحد از ربات (i) به ربات (j) است و از معادله (۵) به دست می‌آید.

$$\hat{d}_{ij} = \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} \quad (5)$$

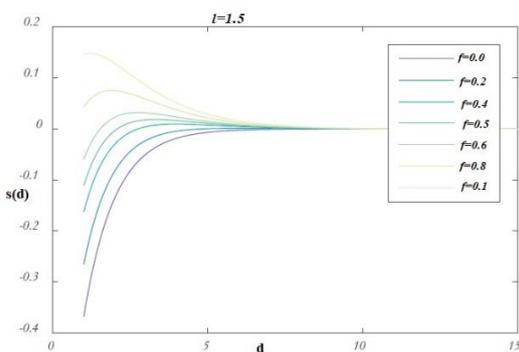
همچنین، s یک تابع است که قدرت کنش ارتباطی بین ربات‌های هوایی برای جاذبه یا دافعه را تعریف می‌کند.





شکل ۳. بررسی رفتار تابع s [۵۸]

تغییر پارامترهای l و f در معادله (۶) منجر به رفتارهای جاذبه و دافعه متفاوتی در ربات‌های هوایی می‌شود. برای مشاهده تأثیرات این دو پارامتر، تابع s دوباره در شکل‌های (۴) و (۵) با تغییر l و f به طور مستقل ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که پارامترهای l و f به طور قابل توجهی منطقه امن، منطقه جاذبه و منطقه دافعه را تغییر می‌دهند. باید توجه داشت که مناطق جاذبه یا دافعه برای برخی از مقادیر به عنوان مثال $l=f=1.0$ خیلی کوچک هستند. لذا از میان همه این مقادیر، $l=1.5$ و $f=0.5$ انتخاب شده‌اند.



شکل ۴. بررسی رفتار متغیر l

کل گروه ربات‌ها در اطراف هدف حفظ می‌کند. دومین ضریب c اندازه مناطق امن بین ربات‌های هوایی کروی را در یک تعادل قرار می‌دهد (معادله (۱۱)). با در نظر گرفتن مولفه c به صورت خطی، فضای مورد نیاز برای اکتشاف و بهره‌برداری ربات‌ها کاهش می‌یابد. مولفه $s(|x_j - x_i|)$ نشان می‌دهد که آیا ربات باید از هدف دور شود (اکتشاف) یا به هدف جذب شود (بهره‌برداری).

$$c = c_{max} - l \frac{c_{max} - c_{min}}{L} \quad (11)$$

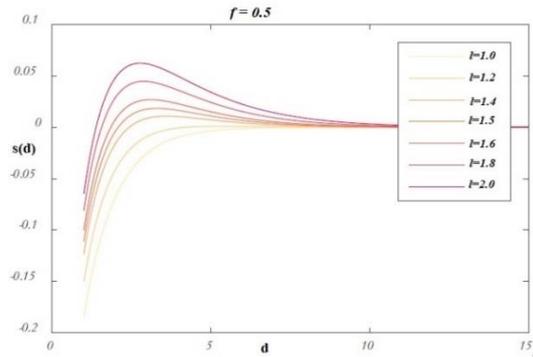
در معادله (۱۱)، c_{max} حداکثر مقدار، c_{min} حداقل مقدار، l نشان دهنده تکرار حلقه هدایت و L حداکثر تعداد تکرارها است. در این تحقیق، از مقادیر 0.00001 برای c_{min} و c_{max} به ترتیب استفاده می‌شود.

تابع s در شکل (۳) نشان می‌دهد چگونه تعامل جاذبه و دافعه ربات‌های هوایی کروی انجام می‌شود. در این شکل، فاصله‌ها از ۰ تا ۱.۵ در نظر گرفته شده است. دافعه در بازه $[0, 2.079]$ رخ می‌دهد. زمانی که یک ربات هوایی کروی به فاصله ۲.۰۷۹ واحد از ربات دیگر قرار گیرد، نه جاذبه و نه دافعه اتفاق می‌افتد. این ناحیه به عنوان منطقه امن یا فاصله امن شناخته می‌شود. همچنین، شکل (۳) نشان می‌دهد که جاذبه از فاصله ۲.۰۷۹ واحد به طور پیوسته افزایش می‌یابد و به طور تقریبی به ۴ واحد نزدیک می‌شود و سپس به تدریج کاهش می‌یابد.

۶- کاربرد منطق فازی در الگوریتم ملخ

منطق فازی به عنوان یکی از روش‌های هوش مصنوعی، ابزاری موثر برای مقاوم سازی سیستم‌های دینامیکی در شرایط عدم قطعیت و تغییرات محیطی محسوب می‌شود. سیستم‌های دینامیکی، مانند ربات‌های هوایی، اغلب در محیط‌هایی با عدم قطعیت و نویز کار می‌کنند که عملکرد آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. منطق فازی با تعریف قوانین اگر-آنگاه به جای مقادیر دقیق، از مقادیر تقریبی و درجه بندی شده استفاده می‌کند. لذا منطق فوق به این سیستم‌ها کمک می‌کند تا بتوانند تصمیم‌گیری‌های انعطاف‌پذیر و تطبیقی داشته باشند. به این ترتیب، به جای وابستگی به مدل‌های ریاضی دقیق که اغلب در شرایط واقعی پاسخگو نیستند، منطق فازی امکان مدیریت بهتر عدم قطعیت‌های محیطی را فراهم می‌آورد [۶۲-۵۹، ۱۸].

در سیستم‌های هدایت ربات‌های هوایی، استفاده از منطق فازی می‌تواند نقش مهمی در افزایش مقاومت و تطبیق‌پذیری آن‌ها در مواجهه با تغییرات ناگهانی شرایط محیطی یا نویزهای ارتباطی ایفا کند. با استفاده از منطق فازی، می‌توان پارامترهای سیستم مانند قدرت ارسال، پهنای باند ارتباطی، یا مسیر حرکتی ربات‌ها را بر اساس ورودی‌ها تنظیم کرد. این تنظیمات تطبیقی به سیستم کمک می‌کند تا در شرایط مختلف بتواند عملکرد خود را بهینه نگه دارد و به سرعت به شرایط جدید واکنش نشان دهد. همچنین، منطق فازی می‌تواند باعث بهبود استراتژی‌های هدایتی شود که به کاهش خطاها و افزایش پایداری سیستم در شرایط پیچیده کمک می‌کند. در نتیجه ربات‌ها قادر خواهند بود



شکل ۵. بررسی رفتار متغیر f

در ادامه الگوریتم هدایتی مسئله آورده شده است.

- مقداردهی X_i برای ربات‌ها در مکان اولیه.
- مقادیر C_{max} ، C_{min} و حداکثر تعداد تکرار برای انجام الگوریتم مقدار دهی می‌شود.
- فاصله هر ربات تا نقطه مقصد محاسبه می‌شود.
- T به عنوان بهترین ربات تا این مرحله از نظر کوتاهی فاصله مستقیم تا مسیر انتخاب می‌شود.
- تا زمان انتهای حلقه تکرار یا رسیدن به دقت تعیین شده:
- مقدار C با استفاده از معادله (۱۰) به روز رسانی می‌شود.
- برای هر ربات در یک حلقه for:
- فاصله‌ها بین ربات‌ها در بازه [۱,۴] بررسی می‌شود.
- موقعیت ربات فعلی با استفاده از معادله (۹) به روز رسانی می‌شود.
- اگر ربات از مرزهای تعیین شده حرکتی خارج شد، فرمان برگشت به داخل صادر می‌شود.
- برای هر ربات که مسیر بهتری پیدا شد، T به روز رسانی می‌شود.
- خروج از حلقه
- پایان الگوریتم.

۲۰۵

سال ۱۴- شماره ۱
بهار و تابستان ۱۴۰۴
نشریه علمی
دانش و فناوری هوا فضا



طراحی سیستم هدایت جمعی ربات‌های گروهی هوایی با هوش اجتماعی الهام گرفته از حرکت بهینه ملخ‌ها و منطق فازی

مأموریت‌های خود را با دقت و اطمینان بیشتری انجام دهند.

منطق فازی بر اساس سه بخش اصلی کار می‌کند:

- فازی‌سازی
- استنتاج فازی
- غیر فازی‌سازی.

در مرحله فازی‌سازی، داده‌های ورودی که به صورت دقیق و قطعی هستند، به مقادیر فازی تبدیل می‌شوند. این تبدیل با استفاده از توابع عضویت انجام می‌شود که به هر ورودی یک درجه عضویت (بین ۰ و ۱) اختصاص می‌دهد. توابع عضویت می‌توانند اشکال مختلفی داشته باشند، از جمله مثلثی، گاوسی، و دوزنقه‌ای، که هر کدام بسته به نوع کاربرد انتخاب می‌شوند. این درجه‌های عضویت نشان می‌دهند که ورودی تا چه حد به دسته‌های مختلف فازی (برای مثال، کم، متوسط، زیاد) تعلق دارد. در مرحله استنتاج فازی، از مجموعه‌ای از قوانین اگر-آنگاه برای تعیین خروجی فازی استفاده می‌شود. این قوانین بر اساس منطق فازی کار می‌کنند و به سیستم کمک می‌کنند تا تصمیم‌گیری‌های تطبیقی داشته باشد. در نهایت، در مرحله غیر فازی‌سازی، مقادیر فازی خروجی دوباره به مقادیر دقیق و قابل استفاده تبدیل می‌شوند. این مرحله معمولاً با استفاده از روش‌های مختلفی مانند مرکز ثقل^{۱۰} انجام می‌شود تا یک مقدار خروجی نهایی به دست آید. به این ترتیب، سیستم می‌تواند ورودی‌های پیچیده و نامطمئن را مدیریت کرده و به تصمیمات بهینه و مقاوم در برابر تغییرات دست یابد.

سیستم فازی مورد استفاده در این مقاله، یک سیستم استنتاج فازی نوع ممدانی^{۱۱} می‌باشد که

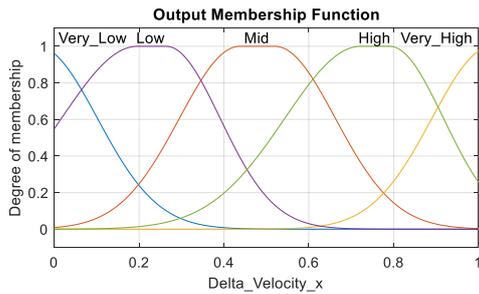
دارای ۳ ورودی و ۳ خروجی است. برای ترکیب مقادیر در شرایط "و" از روش کمینه^{۱۲} و برای شرایط "یا" از روش بیشینه^{۱۳} استفاده شده است. در مرحله تلفیق نیز از روش کمینه و برای تجمیع^{۱۴} خروجی قواعد از روش بیشینه بهره گرفته شده است. نهایتاً، برای ایجاد خروجی^{۱۵} روش مرکز ثقل به کار رفته است که رایج‌ترین روش برای تبدیل خروجی فازی به یک مقدار عددی می‌باشد. این سیستم دارای ۲۵ قاعده فازی است که بر اساس ورودی‌ها و قواعد تعریف شده، خروجی مناسب را استنتاج می‌کند و برای تصمیم‌گیری در ربات‌های پرنده طراحی شده است.

برای طراحی قوانین فازی بر اساس تغییرات Δx ، Δy و Δz که بیان‌کننده فاصله هر ربات است، به عنوان ورودی‌های منطق فازی و تغییرات سرعت ΔV_x ، ΔV_y و ΔV_z در راستاهای x ، y ، z به عنوان خروجی‌ها استفاده شده است. لذا بر اساس موارد تعریف شده می‌توان از مجموعه‌ای از قوانین اگر-آنگاه استفاده کرد. این قوانین بر اساس مقادیر فازی مختلف مانند خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، و خیلی زیاد تنظیم می‌شوند. در ادامه پنج نمونه قانون فازی که برای این سیستم ارائه شده در جدول (۱) آمده است.

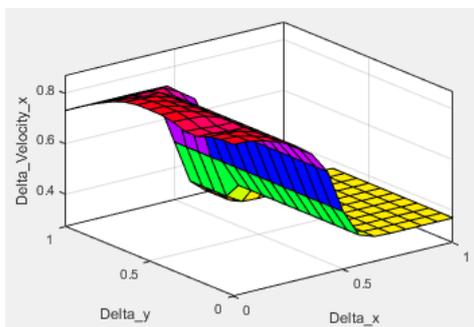
جدول ۱. نمونه قوانین فازی طراحی شده

	خروجی سیستم فازی			ورودی سیستم فازی		
	ΔV_z	ΔV_y	ΔV_x	Δz	Δy	Δx
۱	خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی کم	خیلی کم	خیلی کم
۲	زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	کم	خیلی کم	خیلی کم
۳	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	کم	کم	خیلی کم
۴	زیاد	زیاد	کم	کم	کم	زیاد
۵	زیاد	متوسط	کم	متوسط	کم	زیاد



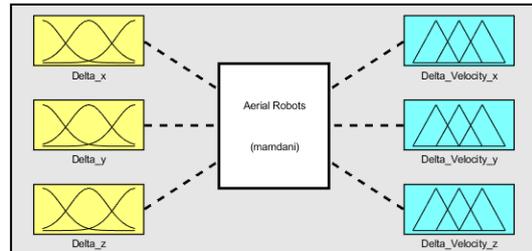


شکل ۸. نمونه‌ای از توابع عضویت خروجی طراحی شده در یک سیستم فازی طراحی شده، تفسیر قوانین نقش بسیار کلیدی در درک منطق تصمیم‌گیری سیستم ایفا می‌کند. برای تحلیل بهتر این قوانین، از نمودار رویه‌های فازی استفاده می‌شود که نمایشی بصری از تأثیر قوانین بر خروجی سیستم ارائه می‌دهند. این گراف‌ها معمولاً به صورت رویه‌هایی سه بعدی، نشان می‌دهند که هر ورودی چگونه و با چه وزنی در تصمیم‌گیری نهایی و یا به عبارتی خروجی سیستم فازی طراحی شده شرکت دارد. با بررسی این نمودارها می‌توان دریافت که تعارضی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها وجود ندارد، و چگونه ورودی‌ها به خروجی‌ها نگاشت می‌شوند. عدم وجود نقاط تکینگی در این رویه‌ها از نکات کلیدی در تفسیر این دست از نمودارهای فازی است که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشهود است.



شکل ۹. اثر قوانین فازی بر حسب ورودی Δy و Δx بر خروجی ΔV_x

این قوانین فازی به ربات‌های هوایی کمک می‌کند تا با استفاده از ورودی‌های مختلف و بر اساس شرایط محیطی، تغییرات سرعت خود را بهینه‌سازی کنند و مسیر حرکت خود را به طور تطبیقی تنظیم کنند.



شکل ۶. شماتیک از ساختار فازی طراحی شده

توابع عضویت برای هر ورودی از ۵ تابع گوسین استفاده شده است که به ترتیب با F_1 الی F_5 با خصوصیات زیر آورده شده است. شایان ذکر است هر تابع عضویت گوسین با چهار مولفه مشخص می‌شود (شکل (۶)-(۸)).

$$F_1: \text{Very} [0.04167 \ 0.1416 \ 0.04167 \ 0.1416]$$

Low =

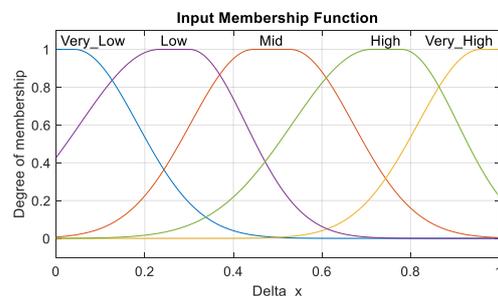
$$F_2: \text{Low} = [0.3011 \ 0.127 \ 0.2331 \ 0.179]$$

$$F_3: \text{Mid} = [0.5285 \ 0.142 \ 0.4451 \ 0.142]$$

$$F_4: \text{High} = [0.7799 \ 0.127 \ 0.7119 \ 0.179]$$

$$F_5: \text{Very High} = [1.042 \ 0.1416 \ 0.9583 \ 0.1416]$$

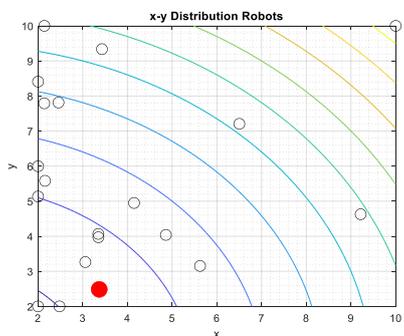
در ادامه در شکل‌های (۷) و (۸) نمونه‌ای از توابع عضویت ورودی و خروجی به ترتیب آورده شده است.



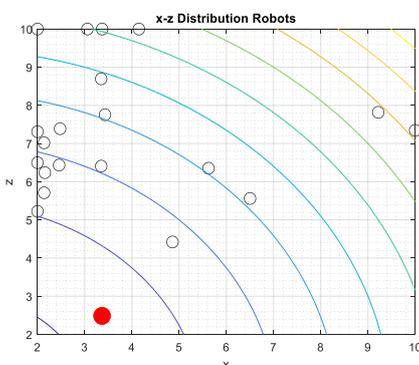
شکل ۷. نمونه‌ای از توابع عضویت ورودی طراحی شده

سیستم شده‌اند و شبیه‌سازی با در نظر گرفتن محیط‌های پیچیده و موانع زمینی صورت گرفته است. این گام به بررسی توانایی الگوریتم در هدایت ربات‌ها در شرایط واقعی‌تر و پیچیده‌تر کمک می‌کند و نشان می‌دهد که سیستم تا چه حد می‌تواند با موانع محیطی انطباق یابد.

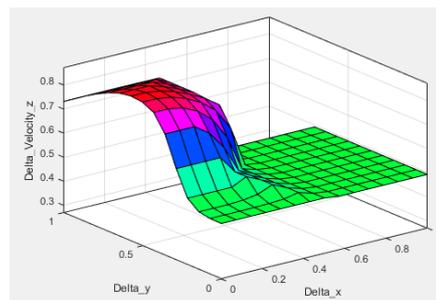
یکی از مزایای اصلی الگوریتم ملخ-فازی این است که به راحتی می‌توان نقشه عوارض زمینی را در فرآیند شبیه‌سازی وارد کرد. این موضوع قابلیت انعطاف‌پذیری بالای الگوریتم را نشان می‌دهد و به ربات‌ها امکان می‌دهد تا با سرعت و دقت بیشتری به تغییرات محیطی پاسخ دهند. توانایی در نظر گرفتن عوارض زمینی در شبیه‌سازی، به خصوص برای مأموریت‌های پیچیده جستجو و نجات در مناطق ناهموار، از اهمیت بالایی برخوردار است و کارایی و دقت این روش را بهبود می‌بخشد.



شکل ۱۱. پخش ربات‌ها در بازه X-Y



شکل ۱۲. پخش ربات‌ها در بازه X-Z



شکل ۱۰. اثر قوانین فازی بر حسب ورودی Δ_x و Δ_y

بر خروجی ΔV_z

از شکل‌های (۹) و (۱۰) مشخص است که قوانین فازی تعریف شده بر اساس رویه‌های ورودی و خروجی رفتار پیوسته‌ای داشته که ورودی‌ها و خروجی‌ها را در بر گرفته‌اند.

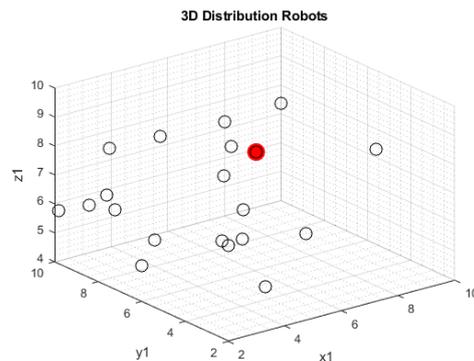
۷- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی الگوریتم ملخ-فازی ارائه‌شده در این پژوهش، هر ربات هوایی کروی به عنوان نماینده‌ای از یک ملخ عمل می‌کند. بر اساس این الگوریتم، رفتار دسته جمعی ملخ‌ها برای هدایت و هماهنگی ربات‌های هوایی در مأموریت‌های پیچیده شبیه‌سازی شده است. این شبیه‌سازی به عنوان یک ابزار اساسی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم در محیط‌های مختلف به کار گرفته شده و به ربات‌ها این امکان را می‌دهد که با استفاده از الگوهای حرکت بهینه، به طور هماهنگ و کارآمد عمل کنند. هدف اصلی از شبیه‌سازی، بررسی توانایی الگوریتم در مدیریت چالش‌های محیطی و انجام مأموریت‌های خودران با دقت بالا است.

شبیه‌سازی الگوریتم در دو بخش انجام شده است: در بخش اول، عوارض زمینی نادیده گرفته شده و تنها حرکت دسته‌جمعی و هماهنگی بین ربات‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. این بخش از شبیه‌سازی به منظور ارزیابی عملکرد پایه‌ای الگوریتم در شرایط ساده‌تر انجام شده است. اما در بخش دوم، عوارض زمینی به عنوان قیود وارد

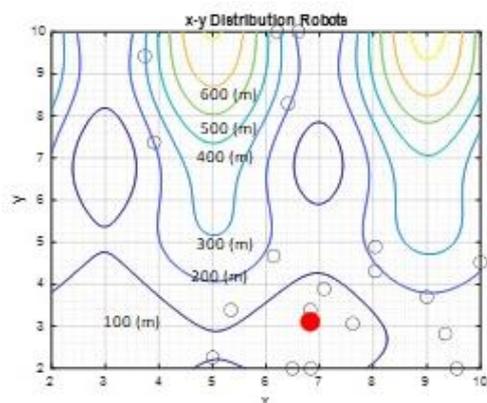
زمینی هستند. این شبیه‌سازی‌ها تنها به بررسی پراکندگی و رفتار ربات‌ها در مسیر رسیدن به هدف پرداخته‌اند، بدون اینکه موانع یا عوارض زمینی در مسیر آن‌ها تأثیری داشته باشد. از سوی دیگر، در شکل (۱۴) مسیر سه بعدی حرکت ربات هوایی کروی به نمایش گذاشته شده است. از آنجا که در این بخش نیز شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن عوارض زمینی انجام شده است، بهترین مسیر برای ربات‌ها یک مسیر خطی است که در شکل (۱۴) نیز به وضوح دیده می‌شود. این مسیر نشان دهنده ساده‌ترین حالت حرکت ربات‌ها به سمت هدف در غیاب موانع محیطی است.

شکل‌های (۱۵) الی (۱۷) به بررسی رفتار الگوریتم پیشنهادی این پژوهش با در نظر گرفتن عوارض زمینی پرداخته است. شکل‌های (۱۵) الی (۱۷) به نحوه پخش دو بعدی و سه بعدی ربات‌ها می‌پردازند. چنانکه مشخص است ربات‌ها قید مسیر که همان عوارض زمینی باشد را به خوبی در نظر گرفته‌اند. همچنین در شکل‌ها، نقاط قرمز توپر، بیان‌کننده مقصد مد نظر در این شبیه‌سازی هستند.

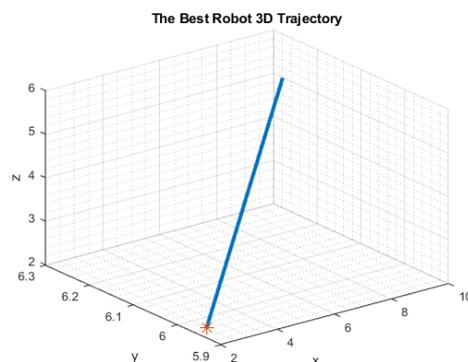


شکل ۱۳. پخش سه بعدی ربات‌ها

شکل‌های (۱۱) الی (۱۳)، به شبیه‌سازی پخش ربات‌های هوایی و رفتار آن‌ها در میل به هدف نمایش داده شده است. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به شبیه‌سازی پراکندگی دو بعدی ربات‌ها پرداخته و نشان می‌دهند که چگونه ربات‌ها در صفحه‌ای افقی به سمت هدف حرکت می‌کنند. در مقابل، شکل (۱۳) پراکندگی سه بعدی ربات‌ها را به تصویر می‌کشد که نشان دهنده تعاملات پیچیده‌تر و دینامیک سه بعدی حرکت ربات‌ها به سمت هدف است. این شبیه‌سازی‌ها به وضوح نشان می‌دهند که الگوریتم ملخ-فازی توانسته است به طور کارآمدی ربات‌ها را به سمت هدف هدایت کرده و پراکندگی آن‌ها را به خوبی مدیریت کند.



شکل ۱۵. پخش ربات‌ها در بازه x-y، با عوارض زمینی

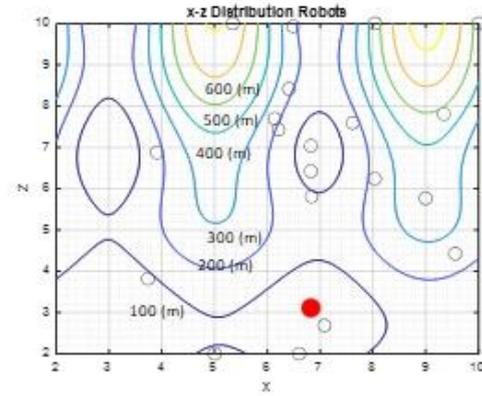


شکل ۱۴. مسیر حرکت یک ربات هوایی

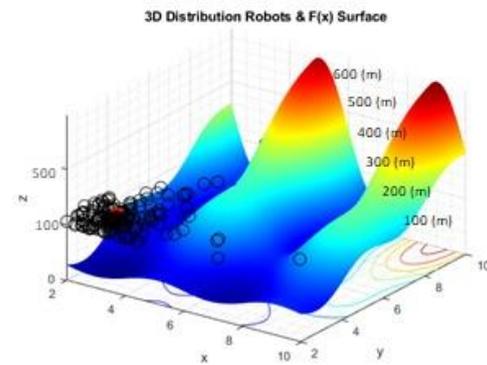
شایان ذکر است که شکل‌های (۱۱) الی (۱۳) مربوط به شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن عوارض

در شکل (۱۹) مسیر حرکت برای چهار ربات با رنگ‌های مختلف رسم شده است. از نقاط قوت این روش آن است که بر اساس فرمول (۶) از برخورد این ربات‌ها جلوگیری می‌شود و در یک فاصله امن به جستجوی خود برای رسیدن به مقصد می‌پردازند. در این تحقیق ربات‌هایی با شباهت حرکتی به کوآدراتور در نظر گرفته شده است. لذا، ربات‌های هوایی می‌توانند دارای رفتاری با مسیر شکسته باشند. بنابراین هر ربات در این الگوریتم دارای یک مسیر حرکتی متشکل از خطوط مستقیم با شکستگی خواهد بود.

روش پیشنهادی مطرح در این مقاله بر اساس پیاده سازی انتخاب مسیر بهینه بر خط است و در هر لحظه با الهام از رفتار حرکتی ملخ‌ها با در نظر گرفتن عوارض زمینی (مانند دسته ملخ‌ها) تصمیم‌گیری برای رسیدن به هدف صورت می‌گیرد. شایان ذکر است که بر اساس فرمول (۶) که از رفتار جمعی ملخ‌ها الهام گرفته شده است، عدم برخورد هر ربات با ربات دیگر به واسطه تعادل برقرار شده جاذبه و دافعه هر ملخ تضمین می‌شود. این موضوع خود از مزیت‌های دیگر این روش است، که می‌توان این رفتار را در نزدیکی رسیدن به هدف در شکل (۱۹) مشاهده کرد. چنانچه در شکل (۱۹) مشخص است، شروع حرکت برای دو عدد از ربات‌ها به همراه مسیر حرکت آن‌ها که با فلش مشخص شده، نمایش داده شده است. همچنین هدف نیز با دایره مشکی رنگ مشخص شده است. در نزدیکی هدف، به واسطه قابلیت الگوریتم که سبب می‌شود ربات‌ها به یکدیگر برخورد نداشته باشند، رفتار پیچیده آن‌ها در نزدیکی هدف مشهود است. این امر سبب خواهد شد که بدون برخورد، دسته ربات‌ها طی

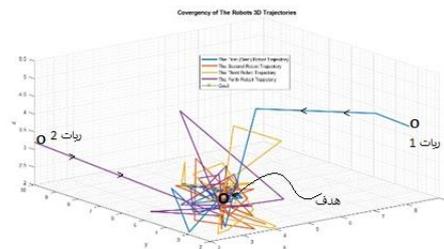


شکل ۱۶. پخش ربات‌ها در بازه X-Z، با عوارض زمینی



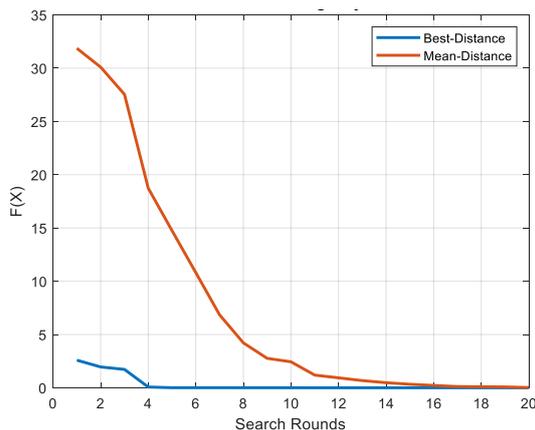
شکل ۱۷. پخش سه بعدی ربات‌ها با عوارض زمینی

در ادامه در شکل (۱۸) مسیر حرکت ربات هوایی که کوتاهترین مسیر را انتخاب کرده آورده شده است. با توجه به آنکه عامل کنترلی و عملگر در این ربات هوایی مانند یک کوآدراتور است، می‌تواند به راحتی دارای حرکتی باشد که به یکباره تغییر مسیر بدهد. شکل فوق نشان می‌دهد که ربات چگونه توانسته است بر عوارض زمینی غلبه نماید و به مقصد تعیین شده برسد.



شکل ۱۹. مسیر حرکت چهار ربات هوایی با عوارض زمینی

یک رفتار حرکتی دسته جمعی با تضمین عدم برخورد با یکدیگر به هدف برسند. این قابلیت الهام گرفته شده از رفتار طبیعی و هوش اجتماعی ملخ‌ها بوده که دارای رویکردی بهینه در حرکت هستند. شایان ذکر است که هدف نهایی ربات‌ها رسیدن به مقصد با این شرط است که بر اساس معادله (۶) و مقدار کاهنده ضریب C که در معادلات (۱۰) و (۱۱) بیان شد، فاصله ربات‌ها تا مقصد به حداقل میزان خود برسد. در شکل (۲۰) روند همگرایی الگوریتم برای رسیدن مقصد و به صفر میل کردن خطای آن پرداخته شده است. در این شکل همچنین مقادیر متوسط که بیان کننده متوسط رفتار ربات‌ها بوده نیز آورده شده است.



شکل ۲۰. همگرایی الگوریتم بر اساس کاهش معیار فاصله تا مقصد و تعداد تکرار

در مرجع [۱۸] بخش مقدمه، که به واسطه مرور پیشینه به آن اشاره شد، یک روش هدایت آنلاین نوآورانه بر اساس آنالوژی با حرکت زنبورهای عسل پیشنهاد شده است. در مرجع فوق الگوریتم زنبور عسل برای بهینه‌سازی حرکت ربات‌های هوایی به کار گرفته شده و هدایت خودران مؤثری را از طریق شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی انجام داده است. در تحقیق حاضر با توجه به قابلیت‌های برتر الگوریتم الهام گرفته از

ملخ‌ها مبنی بر توانایی ایجاد جاذبه و دافعه، تمرکز بر آنالوژی با حرکت سه بعدی ملخ‌ها است، که با استفاده از منطق فازی بر قابلیت اطمینان آن در مواجهه با عوارض زمینی افزوده است. این رویکرد یک سیستم هدایت گروهی کارآمد را فراهم می‌کند که با بهره‌گیری از ویژگی‌های بهینه حرکت ملخ‌ها، دقت و سرعت را در رسیدن به مقصد بهبود می‌بخشد. بنابراین، برای اعتبارسنجی و مقایسه نتایج الگوریتم پیشنهادی با روش پیشین، به مرجع [۱۸] ارجاع داده می‌شود. این مقایسه در جدول (۲) صورت گرفته و بهبودهای به دست آمده در زمینه مسیر بهینه و هدایت گروهی از طریق الگوریتم ملخ-فازی را نشان می‌دهد و برتری آن را نسبت به روش‌های قبلی اثبات می‌کند.

جدول ۲. مقایسه الگوریتم‌های زنبور عسل، ملخ و ملخ-فازی

	زنبور عسل	ملخ	ملخ-فازی
تعداد ربات=۳ و تعداد تکرار=۱۰			
η (km)	۶۸.۳۵۵۹	۴۵.۱۱۵۱	۴۱.۰۲۹۸
δ (km)	۰.۰۱۰۵۱	۰.۰۰۳۰۷	۰.۰۰۱۱۴۰
تعداد ربات=۵ و تعداد تکرار=۱۲			
η (km)	۱۷.۵۳۱۹	۸.۲۵۶۸	۷.۳۰۹۹
δ (km)	۰.۳۴۵۸۸	۰.۰۰۲۰۲	۰.۰۰۱۰۱۵
تعداد ربات=۱۰ و تعداد تکرار=۱۵			
η (km)	۱۳.۸۹۳۹	۹.۵۴۷۴	۶.۴۷۹۱
δ (km)	۰.۰۵۵۰۹	۰.۰۰۰۲۰	۰.۰۰۰۱۶۰

مقایسه بین الگوریتم‌های ملخ، زنبور عسل (در مرجع [۱۸]) و ملخ-فازی این تحقیق در جدول (۲) ارائه شده است. متغیر η بیان کننده کل مسافت طی شده و δ بیان کننده دقت در رسیدن به هدف است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ملخ-فازی از دو روش دیگر برتر عمل می‌کند. برای سناریویی که شامل ۳ ربات و ۱۰ تکرار می‌باشد، ملخ-فازی بهبود ۹.۵۴ درصدی نسبت



به ملخ از نظر فاکتور η که جابجایی بهترین ربات را اندازه‌گیری می‌کند، و بهبود چشمگیر ۴۹.۹۷ درصدی در مقایسه با روش زنبور عسل را نشان می‌دهد. به طور مشابه، در مورد δ که نشان‌دهنده فاصله بهترین ربات تا هدف است، ملخ-فازی نسبت به ملخ به میزان ۹۲.۰۵ درصد دقیق‌تر است و نسبت به روش زنبور عسل ۱۹۵.۷۲ درصد دقیق‌تر عمل می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که ملخ-فازی همگرایی بهتری به سمت هدف دارد و دقت بیشتری در رسیدن به مقصد را فراهم می‌آورد.

با افزایش تعداد ربات‌ها به ۵ و تعداد دورها به ۱۲، الگوریتم ملخ-فازی همچنان برتری خود را نشان می‌دهد. این الگوریتم از نظر فاکتور η بهبود ۸۲.۳۳ درصدی نسبت به ملخ و بهبود ۱۲.۱۵ درصدی نسبت به الگوریتم زنبور عسل را به نمایش می‌گذارد. از نظر فاکتور δ ، الگوریتم ملخ-فازی نسبت به ملخ به میزان ۶۶.۴۱ درصد دقیق‌تر است و ۱۹۸.۸۳ درصد نتیجه بهتری نسبت به روش زنبور عسل به دست می‌آورد. این بهبودهای چشمگیر بر کارایی الگوریتم ملخ-فازی در بهینه‌سازی برخط حرکت ربات‌ها، به ویژه در عملیات نجات پیچیده که تصمیم‌گیری سریع و دقیق در آن حیاتی است، تأکید می‌کند.

در مقایسه نهایی، با استفاده از ۱۰ ربات و ۱۵ تکرار در الگوریتم ملخ-فازی بهبود ۳۸.۳۰ درصدی در η نسبت به ملخ و بهبود ۷۲.۸۰ درصدی نسبت به روش زنبور عسل را نشان می‌دهد. از نظر δ ، الگوریتم ملخ-فازی ۵۵.۲۸ درصد دقیق‌تر از ملخ و ۱۹۸.۸۸ درصد بهتر از روش زنبور عسل عمل می‌کند. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که الگوریتم ملخ-فازی دقیق‌تر و کارآمدتر برای هدایت گروهی ربات‌ها

در مأموریت‌ها است. مأموریت فوق در ناحیه‌ای به ابعاد [۱۰, ۱۰, ۱۰] کیلومتر بوده است. لذا می‌توان این نتیجه‌گیری را به عمل آورد که استفاده از ۵ ربات هوایی و ۱۲ دور تکرار، الگوریتم ملخ-فازی دقت بهینه را فراهم می‌کند و آن را به عنوان بهترین الگوریتم معرفی می‌کند.

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سیستم هدایت هوشمند و خودران برای ربات‌های گروهی هوایی ارائه شد که بر پایه آنالوژی حرکت دسته‌جمعی و هوش اجتماعی ملخ‌ها طراحی شده است. این روش نوین از رفتار اجتماعی بهینه ملخ‌ها الهام گرفته و توانسته است الگوریتمی توسعه دهد که عملکرد ربات‌ها در مأموریت‌های پیچیده و شرایط محیطی مختلف را بهبود دهد. این الگوریتم قادر است ربات‌ها را به طور هماهنگ و دقیق به سوی هدف هدایت کند و مسیرهای بهینه‌ای را برای دستیابی به اهداف مختلف، به ویژه در مأموریت‌های جستجو و نجات، ایجاد نماید. از نقاط قوت این روش می‌توان به استفاده از منطق فازی برای افزایش قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری سیستم در مواجهه با تغییرات محیطی اشاره کرد. منطق فازی به ربات‌ها کمک می‌کند تا تصمیم‌گیری‌های تطبیقی و هوشمندانه‌ای داشته باشند و بتوانند در محیط‌های پیچیده و با موانع مختلف عملکرد بهتری از خود نشان دهند. به کارگیری منطق فازی باعث شده که سیستم بتواند در برابر شرایط نامطلوب به صورت بهینه عمل کند و این یکی از مزیت‌های اصلی این روش نسبت به روش‌های مرسوم هدایت ربات‌ها است.

در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، الگوریتم ملخ-فازی به طور مداوم از سایر روش‌های هدایت

دسته‌جمعی، مانند الگوریتم زنبور عسل، برتری داشت. نتایج نشان داد که الگوریتم ملخ-فازی توانسته است با دقت بیشتر و صرف انرژی کمتر ربات‌ها را به هدف نزدیک‌تر کند. این امر به ویژه در شرایطی که تعداد ربات‌ها و تعداد دورهای تکرار افزایش می‌یابد، بیشتر نمایان شد. دقت بالای این الگوریتم در مسیریابی و رسیدن به هدف، آن را به یکی از بهترین روش‌های موجود برای هدایت ربات‌های هوایی در مأموریت‌های پیچیده تبدیل کرده است. یکی از دیگر مزایای مهم این روش، امکان در نظر گرفتن عوارض زمین به عنوان قيود مسیریابی است. با استفاده از این قابلیت، ربات‌ها توانستند به طور بهینه از موانع و تغییرات جغرافیایی عبور کنند و مسیرهای پیچیده‌ای را با موفقیت طی کنند. این توانایی برای مأموریت‌هایی که نیاز به عبور از محیط‌های ناهموار و پیچیده دارند، بسیار کارآمد است و کارایی سیستم را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

در مقایسه نهایی، نتایج نشان داد که الگوریتم ملخ-فازی، چه در شرایط ساده و چه در شرایط پیچیده، به طور قابل توجهی بهتر از الگوریتم‌های دیگر عمل می‌کند. به ویژه در مواردی که تعداد ربات‌ها و تعداد تکرارهای الگوریتم افزایش یافت، الگوریتم ملخ-فازی عملکرد بهتری در صرفه‌جویی انرژی و دقت در رسیدن به هدف داشت. همچنین، استفاده از الگوریتم ملخ-فازی در مأموریت‌های نجات، که نیاز به تصمیم‌گیری‌های سریع و دقیق دارند، برتری‌های آن را نسبت به روش‌های دیگر اثبات کرد. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که این الگوریتم توانسته است حرکت دسته جمعی ربات‌ها را به گونه‌ای بهینه کند که حتی در حضور موانع و پیچیدگی‌های محیطی، ربات‌ها

با دقت و هماهنگی بیشتری به اهداف خود دست یابند. این موضوع اهمیت بسیاری در مأموریت‌های جستجو و نجات دارد که نیاز به هماهنگی دقیق و سرعت بالا دارند. در مجموع، الگوریتم ملخ-فازی توانست به عنوان یک روش جامع و کارآمد برای بهبود هدایت دسته جمعی ربات‌های هوایی معرفی شود. این سیستم نه تنها توانست پایداری و دقت در حرکت ربات‌ها را تضمین کند، بلکه با استفاده از منطق فازی، انعطاف‌پذیری و قابلیت تطبیق سیستم با شرایط متغیر محیطی را نیز افزایش داد. این ویژگی‌ها، الگوریتم ملخ-فازی را به گزینه‌ای مناسب برای عملیات در شرایط پیچیده و محیط‌های نامطمئن تبدیل کرده است. جهت بررسی محدودیت‌های تحقیق حاضر می‌توان به اجرای فرامین کنترلی در تغییر مسیر یکباره ربات‌های هوایی اشاره کرد که بتواند طیف وسیع‌تری از ربات‌ها را شامل شود. لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، یکپارچه سازی زیر سیستم هدایت و کنترل مد نظر قرار گیرد و با رویکرد اجرای بهینه فرامین کنترلی، الگوریتم پیشنهادی فوق ارتقا یابد.

۹- مآخذ

- [1] T. Lei, T. Sellers, C. Luo, D.W. Carruth and Z. Bi, Graph-based robot optimal path planning with bio-inspired algorithms, *Biomimetic Intelligence and Robotics*, Vol. 3, No. 3, p. 100119, 2023.
- [2] J. Kim, Three-dimensional formation control for robot swarms, *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 16, 2021.
- [3] M. Zarourati, M. Mirshams and M. Tayefi, Attitude path design and adaptive robust tracking control of a remote sensing satellite in various imaging modes, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 237, No. 9, pp. 2166-2184, 2023.
- [4] M. Zarourati, M. Mirshams and M. Tayefi, Designing an adaptive robust observer for underactuation fault diagnosis of a remote



- [15] S. Si-Ma, X. Liu, Y. Zhang, Q. Wu and J. Gao, Efficient maximum iterations for swarm intelligence algorithms: A comparative study, *Artificial Intelligence Review*, Vol. 58, No. 3, p. 87, 2025.
- [16] P. Duraisamy, M.N. Santhanakrishnan and R. Amirtharajan, Genetic algorithm optimized grey-box modelling and fuzzy logic controller for tail-actuated robotic fish, *Neural Processing Letters*, Vol. 55, No. 8, pp. 11577-11594, 2023.
- [17] Z. Jiang, Optimal design of fuzzy controller for underwater robot (UR) based on improved PSO algorithm, *Proceedings of the 2nd International Conference on Cognitive Based Information Processing and Applications (CIPA 2022)*, Singapore, B.J. Jansen, Q. Zhou and J. Ye, Eds., Springer Nature Singapore, pp. 577-586, 2022.
- [18] I. Shafieenejad, E.D. Rouzi, J. Sardari, M.S. Araghi, A. Esmaeili and S. Zahedi, Fuzzy logic, neural-fuzzy network and honey bees algorithm to develop the swarm motion of aerial robots, *Evolving Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 319-330, 2022.
- [19] I. Shafieenejad, A. Cheraghi and M. Tafreshi, Rescue mission designing for lifesaving based on a new aerial vehicle using imperialist competition algorithm, *International Journal of Swarm Intelligence and Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 153, p. 2, 2017.
- [20] M. Samani, M. Tafreshi, I. Shafieenejad and A.A. Nikkhah, Minimum-time open-loop and closed-loop optimal guidance with GA-PSO and neural fuzzy for Samarai MAV flight, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 30, No. 5, pp. 28-37, 2015.
- [21] E.C. Ozkat, Vibration data-driven anomaly detection in UAVs: A deep learning approach, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 54, p. 101702, 2024.
- [22] M. Hosseini, M. Nosratollahi and H. Sadati, Multidisciplinary design optimization of unmanned aerial vehicle under uncertainty, *Journal of Aerospace Technology and Management*, Vol. 9, No. 2, pp. 169-178, 2017.
- [23] A. Maitra, S.R. Prasath and R. Padhi, A brief survey on bio-inspired algorithms for autonomous landing, Vol. 49, No. 1, pp. 407-412, 2016.
- [24] K. Hou, H. Sun, Q. Jia, Y. Zhang, N. Wei and L. Meng, Analysis and design of spherical aerial vehicle's motion modes, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 411-414, pp. 1836-1839, 2013.
- sensing satellite, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 37, No. 11, pp. 2812-2834, 2023.
- [5] M. Zarourati, M. Mirshams and M. Tayefi, Active underactuation fault-tolerant backstepping attitude tracking control of a satellite with interval error constraints, *Advanced Control for Applications*, Vol. 6, No. 3, p. 215, 2024.
- [6] S.K. Baduge, S. Jayasuriya, R.K. Pandey, M.K. Hettiarachchi, D. Amaratunga and C.A. Hewage, Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications, *Automation in Construction*, Vol. 141, p. 104440, 2022.
- [7] H. Sharma, A. Haque and F. Blaabjerg, Machine learning in wireless sensor networks for smart cities: A survey, *Electronics*, Vol. 10, p. 1012, 2021.
- [8] R. Ke, Y. Zhuang, Z. Pu and Y. Wang, A smart, efficient, and reliable parking surveillance system with edge artificial intelligence on IoT devices, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. PP, pp. 1-13, 2020.
- [9] J. Pirkandi, M.S. Abdollahpour, H. Parhizkar and M. Mahmoodi, Numerical modeling of air distribution in the air conditioning system of a manned aircraft, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 12, No. 1, pp. 239-253, 2023. (In Persian).
- [10] P. Guo, R. Zhang and B. Xu, Safety separation distance design for UAV formation based on system performance, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, pp. 1-16, 2025.
- [11] M.E. Elshaar, M.R. Elbalshy, A. Hussien and M. Abido, Path planning in a dynamic environment using spherical particle swarm optimization, *2024 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pp. 1-8, 2024.
- [12] S. Lin, J. Wang, B. Huang, X. Kong and H. Yang, Bio particle swarm optimization and reinforcement learning algorithm for path planning of automated guided vehicles in dynamic industrial environments, *Scientific Reports*, Vol. 15, No. 1, p. 463, 2025.
- [13] S. Poudel, M.Y. Arafat and S. Moh, Bio-inspired optimization-based path planning algorithms in unmanned aerial vehicles: A survey, *Sensors*, Vol. 23, No. 6, 2021.
- [14] W. Harris, S. Tseng, T. Viso, M. Weissman and C.-K. Ngan, Swarm intelligence path-planning pipeline and algorithms for UAVs: Simulation, analysis, and recommendation, 2024.



- multiple mobile robots, *Machines*, Vol. 10, No. 9, 2019.
- [37] F. Wang, D.F. Araújo and Y.-F. Li, Reliability assessment of autonomous vehicles based on the safety control structure, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, Vol. 237, No. 2, pp. 389-404, 2023.
- [38] A.A. Golroudbari and M.H. Sabour, Recent advancements in deep learning applications and methods for autonomous navigation: A comprehensive review, *arXiv preprint arXiv:2302.11089*, 2023.
- [39] L. Yang, X. Liu, S. Zhang and Y. Chen, Path planning technique for mobile robots: A review, *Machines*, Vol. 11, No. 10, 2020.
- [40] Y. Huang, Y. Li, Z. Zhang and Q. Sun, A novel path planning approach for AUV based on improved whale optimization algorithm using segment learning and adaptive operator selection, *Ocean Engineering*, Vol. 280, p. 114591, 2023.
- [41] M. Shahbaz and A. Khan, Autonomous navigation of swarms in 3D environments using deep reinforcement learning, 2020 *International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering & Computer Sciences (RAEE & CS)*, Vol. 5, pp. 1-6, 2020.
- [42] H. Xiangwang and S. Xiaofeng, Trajectory optimization of connected and autonomous vehicles at a multilane freeway merging area, *ResearchGate*, 2019.
- [43] N. Haefner, J. Wincent, V. Parida and O. Gassmann, Artificial intelligence and innovation management: A review, framework, and research agenda, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 162, p. 120392, 2021.
- [44] H. Buchbinder and J. Newson, Social knowledge and market knowledge: universities in the information age, in *Higher education in the information age*: Routledge, pp. 21-31, 2021.
- [45] S. Satapathy and A. Naik, Social group optimization (SGO): A new population evolutionary optimization technique, Vol. 2, pp. 203, 2016.
- [46] N. SinghPal and S. Sharma, Robot path planning using swarm intelligence: A survey, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 83, pp. 5-12, 2013.
- [47] Y. Weng, J. Cao and Z. Chen, Global optimization of optimal Delaunay triangulation with modified whale optimization algorithm, *Engineering with Computers*, 2024.
- [48] I.Y. Fister Jr., Xin-She Fister, Dušan Fister, Janez Brest and Iztok Fister, A
- [25] H. Sun, K. Hou and Q. Jia, Development, analysis and control of a spherical aerial vehicle, *Journal of Vibroengineering*, Vol. 15, pp. 1069-1080, 2013.
- [26] X. Olaz, D. Alaez, M. Prieto, J. Villadangos and J.J. Astrain, Quadcopter neural controller for take-off and landing in windy environments, *Expert Systems with Applications*, Vol. 225, p. 120146, 2023.
- [27] K. Malandrakis, R. Dixon, A. Savvaris and A. Tsourdos, Design and development of a novel spherical UAV, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49, No. 17, pp. 320-325, 2016.
- [28] D. Kim and S. Yang, Center-of-gravity variation-driven spherical UAV system and its control law, *International Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 2020, No. 1, p. 5754205, 2020.
- [29] M. Bowkett, K. Thanapalan and E. Constant, Operational safety analysis and controller design of a dual drones system, in 2017 *International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC)*, 20-22 Oct. 2017.
- [30] V.H. Dominguez, O. Garcia-Salazar, L. Amezcua-Brooks, L.A. Reyes-Osorio, C. Santana-Delgado and E.G. Rojo-Rodriguez, Micro coaxial drone: Flight dynamics, simulation and ground testing, *Aerospace*, Vol. 9, No. 5, 2021.
- [31] X. Ai, Y. Zhang and Y.-Y. Chen, Spherical formation tracking control of non-holonomic UAVs with state constraints and time delays, *Aerospace*, Vol. 10, No. 2, 2018.
- [32] W.K. Loh and J. Jacob, Modeling and attitude control analysis of a spherical VTOL aerial vehicle, in 51st *AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, *Aerospace Sciences Meetings: American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2013.
- [33] S. Das and V. Kumar, Navigating the swarm: Bio-inspired robotics, intelligent algorithms, and applications, 2024.
- [34] A. Juarez-Lora and A. Rodriguez-Angeles, Bio-inspired autonomous navigation and formation controller for differential mobile robots, *Entropy*, Vol. 25, No. 4, 2023.
- [35] M.H. Roni, M. Rana, H. Pota, M.M. Hasan and M.S. Hussain, Recent trends in bio-inspired meta-heuristic optimization techniques in control applications for electrical systems: A review, *International Journal of Dynamics and Control*, pp. 1-13, 2022.
- [36] S. Lin, A. Liu, J. Wang and X. Kong, A review of path-planning approaches for



- [58] S. Saremi, S. Mirjalili and A. Lewis, Grasshopper optimisation algorithm: Theory and application, *Advances in Engineering Software*, Vol. 105, pp. 30-47, 2017.
- [59] J. Dong, J. Shi, Z. Ma and T. Yu, Research of the FLC + PID switching control strategy based on real-time error for the pneumatic polishing force regulating system, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 51, p. 101659, 2024.
- [60] S.R. Das, P. Kumar, M. Patel, R. Singh and A. Verma, Fuzzy controller designed based multilevel inverter for power quality enhancement, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, pp. 1-1, 2024, doi: 10.1109/TCE.2024.3389687.
- [61] C. Ardil, Fighter aircraft selection using fuzzy preference optimization programming (POP), *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 279-290, 2022.
- [62] J.M. Sánchez-Lozano and O.N. Rodríguez, Application of fuzzy reference ideal method (FRIM) to the military advanced training aircraft selection, *Applied Soft Computing*, Vol. 88, p. 106061, 2020.
- comprehensive review of whale optimization algorithms: Variants, hybrids, and applications, *Artificial Intelligence Review*, 2023.
- [49] T. Wang, Z. Xin, H. Miao, H. Zhang, Z. Chen and Y. Du, Optimal trajectory planning of grinding robot based on improved whale optimization algorithm, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2020, No. 1, p. 3424313, 2020.
- [50] M.I. Khaleel, M. Safran, S. Alfarhood and M. Zhu, Energy-latency trade-off analysis for scientific workflow in cloud environments: The role of processor utilization ratio and mean grey wolf optimizer, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 50, p. 101611, 2024.
- [51] L. Ratnabala, R. Peter and E.Y.A. Charles, Evolutionary swarm robotics: Dynamic subgoal-based path formation and task allocation for exploration and navigation in unknown environments, *Journal of Swarm Robotics Research*, Vol. 11, No. 7, pp. 635-643, 2024.
- [52] E. Hancer, Artificial bee colony: Theory, literature review, and application in image segmentation, in *Recent Advances on Memetic Algorithms and its Applications in Image Processing*, D.J. Hemanth, B.V. Kumar and G.R.K. Manavalan, Eds., Singapore: Springer Singapore, pp. 47-67, 2020.
- [53] K.M. Werner, H. Haslob, A.F. Reichel, A. Gimpel and V. Stelzenmüller, Offshore wind farm foundations as artificial reefs: The devil is in the detail, *Fisheries Research*, Vol. 272, p. 106937, 2024.
- [54] J. Wang, W.C. Wang, X.X. Hu, L. Qiu and H.F. Zang, Black-winged kite algorithm: A nature-inspired meta-heuristic for solving benchmark functions and engineering problems, *Artificial Intelligence Review*, Vol. 57, p. 98, 2024.
- [55] W. Li, The application of artificial intelligence in aerospace engineering, *Applied and Computational Engineering*, Vol. 35, pp. 17-25, 2024.
- [56] H. Zhang, S. Yao, S. Zhang, J. Leng, L. Wei and Q. Liu, A block-based heuristic search algorithm for the two-dimensional guillotine strip packing problem, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 134, p. 108624, 2024.
- [57] J. Smith and E. Davis, AI-based multi-objective optimization for aircraft wing design, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 106, No. 3, pp. 345-367, 2023.

۱۰- پی نوشت

1. Backstepping
2. SUAV
3. Swarm Intelligence
4. Grasshopper Optimization Algorithm (GOA)
5. Artificial Intelligence
6. Swarm
7. Exploration
8. Exploitation
9. GOA
10. Centroid Method
11. Mamdani
12. Min
13. Max
14. Aggregation
15. Defuzzification

