برنامه‌ریزی برخط مسیر موشک در یک محیط پویا با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری

رضا بیات تاجور*[۱]، مصطفی کافی مقدم[۲]، علیرضا قنبری[۳]

۱- دکتری ریاضی، گروه ریاضی دانشکده علوم پایه، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران
۲- دکتری ریاضی، گروه ریاضی دانشکده علوم پایه، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران
۳- دانشجوی دکتری ریاضی، گروه ریاضی دانشکده علوم پایه، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران
(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۰۲/۲۱)

چکیده

در این پژوهش هدف یافتن کوتاه‌ترین مسیر، بدون برخورد با موانع موجود برای هدایت یک موشک به صورت برخط از بین موانع ثابت و متحرک به سمت یک هدف متحرک می‌باشد. حرکت‌های موانع و هدف در وهله اول ناشناخته‌اند ولی پس از کشف و یافتن هدف و موانع، روش پیشنهادی در این مقاله می‌تواند دستوراتی را برای موشک جهت رهگیری هدف تا رسیدن به آن، تولید کند. الگوریتم پیشنهادی این مقاله به‌گونه‌ای طراحی شده که می‌توان اطمینان کرد که موشک با اجتناب کامل از موانع، کوتاه‌ترین مسیر ممکن را یافته و طبق آن به هدف نزدیک شود. از طرفی با توجه به اینکه الگوریتم ارائه شده از همه اطلاعات موجود در محیط استفاده نمی‌کند و جهت کنترل حجم محاسبات در چرخه‌های بعدی، عملیات اصلاحی در الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا الگوریتم پیشنهادی در زمان خیلی کم، به جواب بهینه و دقیق‌تر می‌رسد. همچنین برخی سناریوهای پیچیده‌ای را جهت آزمایش الگوریتم در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی نموده‌ایم که نتایج آن همگرایی الگوریتم در یافتن مسیر بهینه منتهی به هدف متحرک یا ثابت ضمن اجتناب از موانع متحرک یا ثابت، در بازه زمانی مناسب را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: *برنامه‌ریزی مسیربه‌صورت برخط، هدایت قرار ملاقات، محیط پویا، اجتناب از مانع.*

Online path planning for missile in dynamic environment using a heuristic algorithm

Reza Bayat Tajvar*, Mostafa Kafimoghadam , Alireza Ghanbari

Abstract

In this research, the aim is to find the shortest path, without encountering the existing obstacles, to guide a missile in a linear way through fixed and moving obstacles towards a moving target. The movements of the obstacles and the target are unknown in the first place, but after discovering and finding the target and obstacles, the method proposed in this article can generate commands for the missile to track the target until it is reached. The proposed algorithm of this article is designed in such a way that it can be ensured that the missile finds the shortest possible path and approaches the target by avoiding the obstacles completely. On the other hand, considering that the presented algorithm does not use all the information available in the environment and in order to control the volume of calculations in the next cycles, corrective operations are used in the algorithm, so it is expected that the proposed algorithm will reach the optimal solution in a very short time. Also, we have simulated some complex scenarios to test the algorithm in MATLAB software, the results of which show the convergence of the algorithm in finding the optimal path leading to the moving or stationary target while avoiding moving or stationary obstacles in the appropriate time frame.

Key words: Path planning, Rendezvous-guidance, Dynamic environment, Obstacle avoidance.

* نویسنده پاسخگو: رضا بیات ناجور ، تلفن: ۰۲۱۳۳۲۲۸۵۲۵ ، پست الکترونیک: r.bayat.tajvar@gmail.com
این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس از آدرس https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمایید.

مقدمه

امروزه یکی از مهمترین راهبردهای مقابله کشورها علیه یکدیگر استفاده از سامانه‌های موشکی دوربرد است. استفاده از موشک‌های دوربرد همواره کم‌هزینه‌ترین راه برای مقابله محسوب می‌شد اما به‌کارگیری این روش چندان ساده نیست زیرا مقابله تنها با این روش با کشورهایی که پدافند موشکی قدرتمندی دارند به شکست منجر خواهد شد. در این راستا مقابله با تهدید دشمنان در صورتی که بر پایه توانایی موشکی استوار باشد، نیازمند قدرت پرتاب انبوه، سیستم‌های راداری قدرتمند و دقت بالا در پرتاب و مسیریابی بهینه موشک و اصابت به هدف است. اما بخشی از توانایی موشکی کشورها که برگ برنده در لحظات حساس محسوب می‌شود، به کارگیری موشک‌های هدایت‌شونده یا کروز است. دقت در برخورد و اصابت به هدف و عبور از سامانه‌های پیشرفته پدافندی توسط موشک‌ها نیازمند توانایی فنی بالایی برای موشک است که این قابلیت در موشک‌های کروز وجود دارد. در هواگردهای کروز که موشک یکی از آنهاست؛ همه چیز برای مسیریابی و حرکت قابل کنترل است و این از مهم‌ترین مزایای موشک‌های هدایت شونده است. قابلیت حرکت و پرواز در ارتفاع‌های متفاوت و تغییر مسیر از بزرگ‌ترین ویژگی‌های موشک‌های هدایت‌شونده است که موجب می‌شود اهداف متحرک و متغیر را با تغییر مسیر حرکت نابود کند. از برتری‌های موشک‌های کروز نسبت به موشک‌های بالستیک در هدایت‌پذیری این نوع موشک‌ها در کل طول مسیر است و در این راستا با موشک‌های بالستیک که تنها پرتاب و اصابت آنها قابل کنترل است تفاوت دارد. موشک‌های کروز نه تنها از جو خارج نمی‌شوند بلکه قادرند در کل مسیر دائم حرکت و خط سیر خود را تغییر دهند. این تغییر مسیر از سوی موشک‌های کروز توسط سامانه‌های ردیابی، موقعیت‌یاب و جهت‌یاب جغرافیایی انجام می‌شود. نکته مهم در مورد موشک کروز این است که این موشک به ساعت‌ها پرواز نیاز دارد. با این وضعیت با توجه به هدایت اینرسی اولیه این امکان وجود دارد که موشک صدها متر از مسیر منحرف شود زیرا اگرچه با هدایت از این نوع اینرسی امکان انحراف برای موشکی که ده‌ها دقیقه پرواز می‌کند کم است، اما برای موشکی که ساعت‌ها باید ادامه طریق دهد مناسب نیست. برای رفع عیب باید نوعی تصحیح در مسیر انجام شود تا در عمل مکمل هدایت اصلی آن باشد. بنابراین برای رساندن یک موشک به یک نقطه مشخص و یا یک نقطه و سرعت مشخص، باید مسیر حرکت آن کنترل شود. هدایت موشک به معنای تولید فرامین لازم جهت کنترل مسیر آن است. وظیفه سیستم هدایت، تعیین یا اندازه‌گیری موقعیت و گاهی سرعت نهایی که موشک باید به آن برسد، و تصمیم‌گیری در مورد اقداماتی است که باید به این منظور انجام شود. پس از تعیین یا اندازه‌گیری موقعیت و سرعت نهایی، که موشک باید به آن برسد، لازم است راهکار یا فرامین هدایتی مناسب برای دستیابی به آن موقعیت و سرعت مشخص شود. قوانین هدایت به‌صورت یک الگوریتم در پردازنده هدایت پیاده‌سازی می‌شوند. جهت مطالعه بیشتر، خواننده را به [۱] ارجاع می‌دهیم. در ادامه، به مطالعات مربوط به برنامه‌ریزی مسیر موشکی می‌پردازیم و همچنین برخی مطالعات مربوط به روش‌های پیشنهادی اجتناب از مانع و مسیریابی برای هواپیماهای بدون سرنشین[۱] را نیز بررسی کرده‌ایم، زیرا اغلب موشک‌ها و هواپیماهای بدون سرنشین دارای ویژگی‌های دینامیکی مشابهی هستند.

روش وورونوی[۲]، یکی از نام‌آشناترین روش‌های طراحی مسیر برای اجتناب از تهدیدها است. در این روش و نیز در روش میدان پتانسیل [۳و۲] فرض بر این است که محیط کاملا معلوم بوده و طراحی مسیر با فرض معلوم بودن موقعیت تهدیدها صورت می‌پذیرد. بی‌تردید چنین روش‌هایی نمی‌توانند در همه انواع مختلف سناریوها از عملکرد رضایت‌بخشی برخوردار باشند. در مراجع [۵و۴] از الگوریتم ژنتیک، در [۶] از روش الگوریتم هوشمند ازدحام[۳]، در [۷] از روش آنیل شبیه‌سازی‌شده[۴] و همچنین در [۸-۱۰] از روش کلونی مورچگان برای اجتناب از تهدیدها استفاده شده است. روش‌های مبتنی بر کنترل پیش‌بینی[۵] [۱۴-۱۱]، روش‌های موجود دیگری هستند که از آن‌ها برای طراحی مسیر با هدف اجتناب از تهدید استفاده شده است. در عموم روش‌های بهینه‌سازی رایج، لازم است که تابع هزینه، یک تابع خوش‌رفتار باشد. به‌عنوان مثال اگر قرار باشد تأثیر خط دید[۶] (LOS) بین پرنده و تهدید در محاسبات لحاظ شود، این تأثیر نمی‌تواند به‌صورت تحلیلی و به‌عنوان تابعی از متغیرهای حالت و یا کنترل بیان شود. بسیاری از روش‌هایی که

تاکنون برای طرح‌ریزی مسیر پرنده‌های بی‌سرنشین ارائه شده است، به‌دلیل، عدم قابلیت کاربرد به‌صورت برخط ناشی از نیاز اساسی به اطلاعات کامل محیط قبل از آغاز مأموریت و یا ناشی از نیاز به حجم پردازش زیاد و محاسبات سنگین، با ضعف قابل ملاحظه‌ای همراه هستند. در این مقاله، با هدف بسط الگوریتمی برخط و البته کارآمد جهت اجتناب از تهدیدها و با انگیزه رفع کاستی‌های مذکور، روشی نوین در قالب یک الگوریتم مسیریابی به‌صورت برخط پیشنهاد شده است.

چندین الگوریتم برای اجتناب از مانع قبلاً پیشنهاد شده است تا موشک را به سمت هدف در محیط‌های پیچیده شامل مناطق کوهستانی، جزایر و کشتی‌ها هدایت کند. آن‌ها با دنبال کردن مسیر از پیش تعریف شده، که نیاز به نقشه کامل میدان عملیات دارد، به‌دست آمدند. رویکردهای آن‌ها بدیهی است که محیط عملیات را محدود می‌کند و به اطلاعات قبلی بیش از حد، نیاز دارد. در [۱۶و۱۵]، قوانین جدید هدایت موشک با استفاده از یادگیری‌تقویتی[۷] پیشنهاد می‌شود، که می‌تواند به‌طور مستقل از موانع و زمین‌ها در محیط‌های پیچیده با اطلاعات قبلی محدود و حتی بدون نیاز به مسیر خارج از خط یا تولید ایستگاه‌های بین راهی اجتناب کند.

یک الگوریتم اکتشافی مبتنی بر مفاهیم هندسی برای مسئله یافتن مسیری متشکل از قطعات خط از یک مبدأ معین به یک مقصد معین در حضور موانع چند ضلعی در [۱۷] ارائه می‌شود. ایده اصلی شامل ساختن مثلث‌هایی در اطراف موانعی است که باید از آن‌ها اجتناب کرد. الگوریتم اکتشافی، مسیرهایی را درنظر می‌گیرد که عمدتاً از بخش‌های خط مربوط به لبه‌های جزئی این مثلث‌های محدودکننده تشکیل شده‌اند، و از یک روش شاخه و کران ساده برای یافتن یک مسیر نسبتاً کوتاه از این نوع استفاده می‌کند.

وجود تهدیدهای گوناگون در منطقه عملیاتی، می‌تواند با به خطر انداختن ایمنی موشک، موفقیت مأموریت را با چالش روبرو سازد. حتی در عمل، میزان خطرآفرینی این تهدیدها می‌تواند با به اشتراک گذاشته شدن اطلاعات پرنده بین آن‌ها، دو چندان شود. مهمترین نیازمندی در این سناریو این است که باید تمام بخش‌های مأموریت مثل طرح‌ریزی مسیر و مسیریابی، تخصیص پرنده‌ها به اهداف، تعیین امکان‌پذیری حمله و بازگشت ایمن به پایگاه، به‌طور کاملاً خودکار و مستقل صورت پذیرد. نظر به اهمیت بسیار زیاد توانایی موشک کروز در طرح‌ریزی و تولید مسیر به‌منظور اجتناب از تهدیدها، این مقاله روشی پیشنهاد می‌کند که به‌موجب آن موشک قادر خواهد بود به‌طور کاملا مستقل و به‌صورت برخط و ضمن پرهیز از مناطق تهدیدآمیز که تا قبل از رویارویی با آن‌ها ناشناخته بوده‌اند، به هدف با موقعیت از پیش‌تعیین شده، دست یابد.

جهت رهگیری هدف متحرک در حضور موانع متحرک و ایستا، کونوار و همکارانش [۱۸] نیز یک روش بدیع هدایت قرار ملاقات[۸] (RG) بیان کرده‌اند. قرار ملاقات به‌عنوان تطبیق هم‌زمان بردارهای مکان و سرعت وسیله نقلیه مستقل با اهداف تعیین شده آن‌ها تعریف شده است. روش پیشنهادی، هم رهگیری موقعیتی، هم زمان و هم انطباق سرعت هدف را فراهم می‌کند. در میان تکنیک‌های موجود هدایت موشک، ناوبری موازی منجر به رهگیری هدف با صرف زمان بهینه، با یک سرعت ثابت می‌شود که بر اساس آن، روش هدایت قرار ملاقات در [۱۸] پیشنهاد شده است.

بررسی تحقیقات گذشته نشان دادند که روش‌های مبتنی بر هدایت می‌تواند زمان‌های رهگیری کوتاه‌تری را در مقایسه با سایر تکنیک‌های موجود دیگر نتیجه دهد که همه محدود به محیط‌های بدون موانع ایستا یا پویا می‌باشند. بنابراین، این پژوهش روش جدید مبتنی بر هدایت را پیشنهاد می‌کند که این محدودیت را با اصلاح قانون RG و بهینه‌سازی آن برای مقابله با موانع برطرف می‌کند. اگرچه، روش‌های مبتنی بر هدایت می‌توانند از لحاظ تئوری، یک روش با رویکرد بهینه‌سازی زمان را تحقق بخشند، اما ممکن است به‌علت اشتباهات حسگرها و محرک‌ها یک مسیر نوسان‌دار در اطراف هدف منجر شود. به‌علاوه، با توجه به محدودیت‌های تشخیص حسگرهای دید، ردیابی سه بعدی نمی‌تواند به‌سادگی از حالت مسطح توسیع یابد.

یک رویکرد برنامه‌ریزی حرکت برخط برای رهگیری اهداف متحرک در محیط‌های پویا با موانع ایستا یا متحرک در [۱۹] پیشنهاد شده است. تحت پیش‌شرط کامل و با توجه به عملکرد مانور موشک، این روش به‌طور هم‌زمان مسئله تهدیدات متحرک و اهداف متحرک را پاسخ می‌دهد. روش طراحی این مقاله، انگیزه‌ای برای روش اصلی مرجع الگوریتم ارائه شده می‌باشد.

تمرکز بیشتر در این مقاله، بر دو جنبه یک موشک هدایت شونده است. اول، رهگیری و زمان ملاقات بر اساس زمان بهینه مطلوب با یک هدف متحرک (هدایت به سمت هدف) و دوم، اجتناب از موانع، چه موانع متحرک و چه موانع ثابت. برخورداری این الگوریتم از یک ساختار ماژولار، به سادگی افزودن ماژول‌های جدید به سیستم که بیانگر رفتارهای جدید هستند را مقدور می‌سازد. در این استراتژی حل مسأله، رفتارهای مستقل چندگانه که هر کدام بر روی یک وظیفه خاص متمرکز هستند، می‌توانند هم‌زمان با یکدیگر فعال باشند. هر یک از رفتارها متناسب با معیاری که بر آن تمرکز دارند، فرامینی تولید می‌کنند. پس از اعمال ضرایب وزنی که خود متناسب با شرایط لحظه‌ای تنظیم می‌شوند، این فرامین تجمیع شده و به سیستم کنترل پرواز پرنده خودگردان ارسال می‌شود.

در این مقاله، هم به موانع متحرک و هم به مسئله هدف متحرک پرداخته می‌شود. فرض بر این است که سرعت هدف مشخص است در حالی‌که قرار است سرعت موانع دینامیکی و همچنین مکان موانع استاتیک به صورت برخط محاسبه شود. در بخش بعدی به بیان روش تحقیق و مفروضات مسئله می‌پردازیم، سپس به توصیف تئوری الگوریتم پرداخته و نحوه اجتناب از موانع و رسیدن به هدف توسط موشک را شرح می‌دهیم. در نهایت، برخی از نتایج شبیه‌سازی را در سناریوهای مختلف و پیچیده جهت سنجش الگوریتم و نرم‌افزار ارائه می‌نماییم.

روش تحقیق

در این مقاله، شرایط محیطی به‌گونه‌ای فرض شده است که در آن موشک، در خصوص محیطی که در آن قرار دارد، شناخت قبلی ندارد و از طریق حسگرهای تعبیه شده در آن، که دارای محدودیت ناحیه کاوش می‌باشند، به شناخت محیط اطراف خود می‌پردازد. موانع موجود می‌توانند ثابت یا متحرک درنظر گرفته شوند و حرکت‌های آن‌ها نیز برای موشک ناشناخته باشد و همچنین می‌توانند به اشکال مختلف هندسی باشند. نهایتا، موشک باید به هدفی برسد که آن نیز می‌تواند ثابت و یا متحرک باشد و نوع حرکت آن نیز برای موشک ناشناخته باشد. موارد پیش فرضی که در این مقاله درنظر گرفته می‌شوند، به شرح زیر بیان می‌شوند:

۱. موانع و هدف مورد نظر در یک فضای دو بعدی که موشک در آن قرار دارد، متحرک با نوع حرکت ناشناخته و غیرقابل پیش‌بینی، در نظر گرفته می‌شوند.

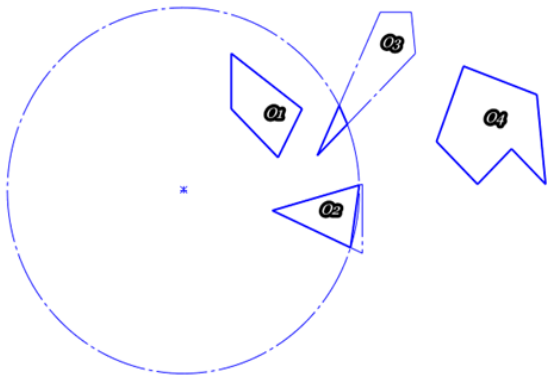
۲. نقطه هدف، واحد است و همانند موانع متحرک می‌باشد و نوع حرکت آن نیز ناشناخته و غیرقابل پیش‌بینی است.

۳. نقطه هدف در هر کجا باشد، قابلیت شناسایی توسط موشک را دارد، هر چند که در ناحیه دید موشک قرار نداشته باشد.

۴. موشک با استفاده از حسگرهای خود به شناسایی محیط می‌پردازد. بنابراین حوزه دید محدودی دارد و تنها در همان حوزه قابلیت رصد موانع و هدف را دارد.

۵. سرعت حرکت موشک در طول پروژه ثابت در نظر گرفته می‌شود و از طرف دیگر سرعت حرکت موانع و هدف باید کوچکتر از سرعت حرکت موشک باشد تا مسئله جواب داشته باشد.

در این پروژه، فرض می‌کنیم که موشک به شکل یک دیسک باشد که شعاع آن r درنظر گرفته می‌شود. همان‌طور که اشاره شد، هر موشک توانایی کاوش یک محدوده خاصی را دارد و موانع خارج از این محدوده برای موشک قابلیت شناسایی را ندارند. برخی از موانع هستند که تماما داخل این محدوده قرار دارند که موشک آن‌ها را به‌طور کامل شناسایی می‌کند و موانعی نیز هستند که به‌طور کامل خارج از این محدوده‌اند و موشک قادر به شناسایی آن‌ها نیست و همچنان که برخی از موانع وجود دارند که قسمتی از آن‌ها در این محدوده قرار دارد. در شکل **۱** حوزه دید موشک با دایره نقطه‌چین مشخص شده است.



شکل ۱- مفهوم حوزه دید موشک

ملاحظه می‌شود که موانع با چه شکل و اندازه‌ای در محوطه قابل رؤیت موشک قرار دارند که مانع یک، به‌طور کامل داخل حوزه دید و مانع چهار به‌طور کامل خارج از حوزه دید قرار دارد. همچنین قسمتی از مانع شماره دو و شماره سه داخل این حوزه‌اند. برای حل این مشکل، دایره فرضی که محوطه دید موشک را نشان می‌دهد درنظر می‌گیریم. این دایره، این دو مانع را قطع خواهد کرد. نقاط تقاطع را استخراج می‌کنیم و همچنان که در شکل مشخص است، آن‌ها را با یک خط مستقیم به هم وصل می‌کنیم تا یک مانع جدید به‌دست آید. این مانع را در محاسبات طراحی مسیر وارد می‌نماییم. در این مقاله به‌دنبال این هستیم که در هر لحظه مسیری برای هدایت موشک به سمت هدف ارائه دهیم که موانع را با توجه به شعاع درنظر گرفته شده (جهت اطمینان از عبور ایمن از موانع) رد نموده و به هدف متحرک و مشخص برسد ضمن اینکه این مسیر به‌دست آمده، کوتاه‌ترین مسیر ممکن باشد.

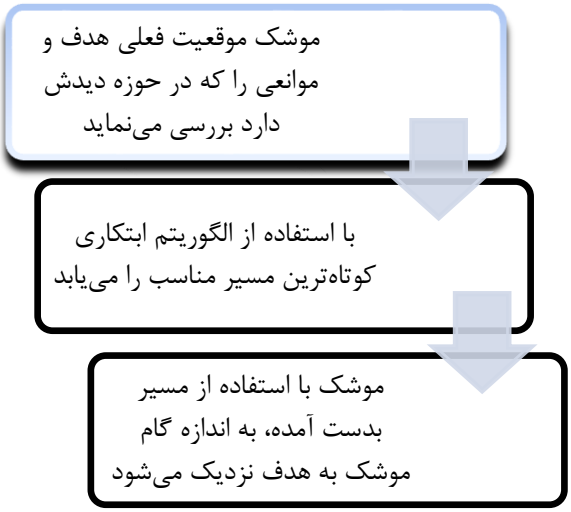
توصیف تئوری الگوریتم

الگوریتم ابتکاری ارائه شده در این مقاله، کوتاه‌ترین مسیر مناسب را برای هدایت موشک به سمت هدف تولید می‌نماید. از آنجا که موشک در محیطی قرار دارد که هیچ شناختی نسبت به آن ندارد و محیط هر لحظه در حال تغییر می‌باشد، بنابراین موشک باید به‌طور مرتب در فاصله‌های زمانی کوتاه محیط را کاوش کند تا تغییرات صورت گرفته در محیط را بروز نموده و تصمیمات لازم را با توجه به تغییرات صورت گرفته در محاسبات خود اعمال کند. این فاصله زمانی را با Δt نشان می‌دهیم. با توجه به اینکه فرض کردیم سرعت موشک در طول برنامه‌ریزی ثابت درنظر گرفته شود و مقدار زمان لازم برای بروزرسانی ثابت باشد، طول گامی که موشک در هر بازه زمانی طی می‌کند، در صورتی‌که δ را طول گامی که موشک در زمان Δt با سرعت $\|\overrightarrow{V_r}\|$ طی خواهد کرد درنظر بگیریم، حاصل طول گام δ از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\delta = \Delta t. \|\overrightarrow{V_r}\| \qquad (۱)$$

برای تعیین میزان Δt باید شرایط محیطی موشک را مد نظر قرار دهیم. اگر سرعت موانع و هدف بالا باشد باید مقدار آن‌را کوچک درنظر بگیریم و اگر سرعت تغییرات محیط کمتر باشد می‌توان Δt را بزرگتر درنظر گرفت. با کاهش میزان Δt دقت مسیر به‌دست آمده بیشتر خواهد شد ولی مقدار آن هم تا یک اندازه‌ای می‌تواند کاهش یابد. سرعت پردازشی سخت افزارها و نرم افزارهای مورد استفاده در ساختار موشک، تعیین‌کننده حد پایین این زمان خواهد بود.

از این‌رو موشک یک روال تکراری را با طول زمان مشخص تا دست‌یابی به هدف تکرار می‌کند. این روال را در حالت کلی می‌توان به‌صورت زیر درنظر گرفت:



شکل۲- روال برنامه‌ریزی مسیر با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

در مرحله اول، موشک اطلاعاتی شامل موقعیت لحظه‌ای موانع، شکل موانع و موقعیت لحظه‌ای هدف در محیط را دریافت می‌کند. باید توجه داشته باشیم که موشک، آن دسته از موانعی را که در حوزه دیدش قرار می‌گیرند می‌تواند شناسایی کرده و دیگر موانع را در محاسباتش وارد نمی‌کند. اما این موضوع را در مورد هدف پیاده نمی‌کنیم و فرض بر این است که هدف در هر فاصله‌ای از موقعیت موشک باشد، قابلیت شناسایی توسط موشک را دارد. پس از جمع‌آوری اطلاعات مذکور، در مرحله بعد، الگوریتم پیشنهادی در این پروژه توسط موشک اجرا شده و از این طریق مسیر مناسب برای حرکت موشک به‌اندازه گامی به طول δ طبق فرمول (۱) به‌دست می‌آید. نهایتا، موشک گام نهایی را که حرکت در مسیر یافته شده است، اتخاذ می‌نماید. در ادامه با استفاده از ایده معرفی شده در مرجع [۱۹]، نقطه بعدی را که موشک باید به آن عزیمت داشته باشد، شرح می‌دهیم.

حال فرض کنیم هدف با سرعت $\|\overrightarrow{V_t}\|$ در حال حرکت باشد. در این حالت در صورتی‌که موانع حضور نداشته باشند، نقطه بعدی

که موشک باید در آن حضور یابد حاصل از برخورد دایره‌ای به مرکز موقعیت فعلی موشک با مختصات (x_r , y_r) با شعاع δ که معادله آن به‌صورت زیر است:

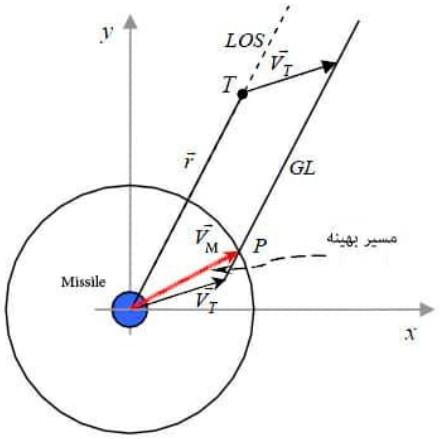
$$(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 = \delta^2 \qquad (۲)$$

و نیم‌خط GL موازی با خط LOS که خط واصل موقعیت فعلی موشک و نقطه هدف می‌باشد.

همان‌طور که در شکل۳ نشان داده شده است، اگر (x_t , y_t) مختصات مکان فعلی موشک باشد، مختصات پارامتریک نیم‌خط GL نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$x = x_r + (x_t - x_r).\theta$$
$$y = y_r + (y_t - y_r).\theta \qquad (۳)$$

که $0 \le \theta \le 1$ می‌باشد. محل تقاطع معادلات (۲) و (۳) موقعیت بعدی را که موشک باید به آن برسد، بیان می‌کند.



شکل۳- یافتن نقطه بعدی حرکت موشک نسبت به موقعیت فعلی آن

θ را از معادلات فوق به‌دست می‌آوریم که به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\theta = \frac{\delta^2}{\sqrt{(x_t - x_r)^2 + (y_t - y_r)^2}} \qquad (۴)$$

با دست آوردن مقدار θ از رابطه (۲) در معادلات پارامتریک (۳) مقادیر مختصات جدید (x'_r, y'_r) مراجعت موشک در مسیر به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$x'_r = x_r + (x_t - x_r).\frac{\delta^2}{\sqrt{(x_t - x_r)^2 + (y_t - y_r)^2}} \qquad (۵)$$

$$y'_r = y_r + (y_t - y_r).\frac{\delta^2}{\sqrt{(x_t - x_r)^2 + (y_t - y_r)^2}}$$

بنابراین با توجه به فرمول هر گام موشک خواهیم داشت:

$$x'_r = x_r + (x_t - x_r).\frac{(\|\vec{V}_r\|)^2}{\sqrt{(x_t - x_r)^2 + (y_t - y_r)^2}} \qquad (۶)$$

$$y'_r = y_r + (y_t - y_r).\frac{(\|\vec{V}_r\|)^2}{\sqrt{(x_t - x_r)^2 + (y_t - y_r)^2}}$$

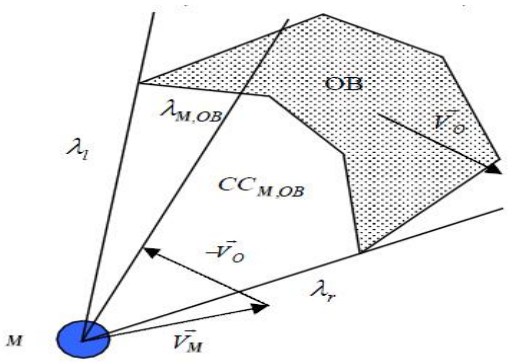
اگرچه، به‌دلیل حضور موانع، همواره این امکان فراهم نیست که موشک خط مستقیم را به‌عنوان مسیر بهینه طی کند. موشک بعد از شناسایی موانع و برای محاسبه بهترین مسیر با استفاده از الگوریتم ابتکاری معرفی شده در این مقاله، باید با توجه به موقعیت فعلی خود، دو نقطه از هر یک از موانع را درنظر بگیرد که همان نقاط کران مانع نامیده می‌شوند. نقاط کران یک مانع، نقاطی هستند که موشک باید از این نقاط عبور کرده تا حداقل فاصله از هدف را حفظ کند. این نقاط در الگوریتم پیشنهادی محاسبه می‌شوند.

حال برای موانع در حوزه دید موشک، مفهوم دایره راهنما[۹] را ارائه می‌نماییم. این دایره مسیرهای ممنوعه و قابل قبول را پیشنهاد می‌دهد. در هر لحظه، فرض بر این است که موشک، سرعت موانع را تشخیص می‌دهد. موشک M و مانع OB را درنظر بگیرید که مقعر است. سرعت مانع V_O می‌باشد. حال

مجموعه مخروط برخورد[۱۰] $\mathrm{CC_{M,OB}}$ را مجموعه‌ای از بردارهای سرعت‌های نسبی برخورد M و OB در نظر می‌گیریم:

$$\mathrm{CC_{M,OB}} = \{\mathrm{v_{M,OB}} | \lambda_{M,OB} \cap \mathrm{OB} \neq \emptyset\} \quad (۷)$$

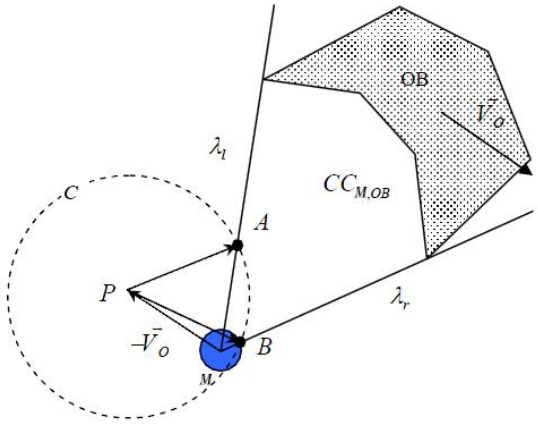
که در آن $\vec{\mathrm{V}}_{\mathrm{M,OB}} = \vec{\mathrm{V}}_{\mathrm{M}} - \vec{\mathrm{V}}_{\mathrm{OB}}$ بردار سرعت نسبی بین موشک و مانع است و $\lambda_{M,OB}$ جهت بردار $\vec{\mathrm{V}}_{\mathrm{M,OB}}$ می‌باشد. λ_r و λ_l دو بردار مماس بر مانع در نقاط کران مانع هستند. به‌عنوان مثال، در شکل **۴** دستورالعمل ایجاد دایره راهنما نمایش داده شده است.



شکل۴- تشکیل مخروط برخورد $\mathrm{CC_{M,OB}}$

برای هر جفت بین موشک و مانع یک مخروط برخورد منحصر به‌فرد وجود دارد. در مجموعه DC، جهات ممنوعه را به‌عنوان مجموعه‌ای از جهات $\lambda_{M,OB}$ متعلق به $\mathrm{CC_{M,OB}}$ قرار می‌دهیم. برای تشکیل DC، موقعیت موشک در امتداد $\overrightarrow{-\mathrm{V}}_{\mathrm{OB}}$ باید جابه‌جا گردد. سپس یک دایره C به دور موشک با شعاع حداکثر سرعت موشک رسم می‌کنیم.

به‌طور هندسی، یکی از چهار حالت زیر رخ می‌دهد: ۱) دایره λ_r را قطع می‌کند، ۲) دایره λ_l را قطع می‌کند، ۳) دایره هر دو λ_r و λ_l را قطع می‌کند و ۴) دایره هیچ یک از آن‌ها را قطع نمی‌کند. همان‌طور که در شکل **۵** نشان داده شده است، در این نمونه، دایره C با λ_l در نقطه A و با λ_r در نقطه B تقاطع دارد. بنابراین، اگر شیب $\lambda_{M,OB}$ بین شیب‌های بردارهای PA و PB بیفتد، موشک با مانع برخورد دارد. دایره راهنما - خط چین- با استفاده از این محاسبه تشکیل می‌شود.



شکل۵- یافتن مناطق ممنوعه و دایره راهنما

اگر دایره C هیچ نقطه تلاقی با مماس‌های λ_r و λ_l نداشته باشد، DC هیچ منطقه ممنوعه‌ای ندارد و موشک می‌تواند آزادانه در جهت بهینه محاسبه شده به سمت هدف حرکت کند. اگر کل دایره C در $\mathrm{CC_{M,OB}}$ بیفتد، تمام جهات ممکن، ممنوعه است و موشک باید متوقف شود. این حالت معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که موشک در یک فضای به‌هم ریخته و شلوغ قرار داشته باشد و یا موانع به شدت اطراف موشک را احاطه کرده باشند. DC باید برای همه موانع متحرک یا استاتیک ساخته شود. فرض کنیم $\mathrm{F_i}$ مناطق ممنوعه برای هر مانع را نشان دهد. سپس کل DC برای همه موانع (یعنی کل مسیرهای ممنوعه و بدون برخورد) با موقعیت سوپریمم از همه DC های جزئی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F = \cup_{i=1}^{m} \mathrm{F_i} \quad (۸)$$

حال باید معادله مسیر موشک محاسبه گردد. برای یافتن نقطه بعدی در مسیر حرکت موشک به مختصات (x'_m, y'_m) به روش زیر عمل می‌کنیم:

مسیر مناسب به دایره ای با شعاع r (شعاع موشک که به شکل دیسک فرض می‌شود) و به مرکزیت نقاط کران (x_0, y_0) که به طریق فوق بیان شد، مماس می‌باشد و نقطه دیگر این مسیر بر موقعیت فعلی موشک (x_m, y_m) می‌باشد. با توجه به محاسبات هندسی (در مختصات قطبی)، معادله مسیر به شکل زیر به‌دست می‌آید:

$$\Big((x_m - x_0)(y_m - y_0) \pm r\sqrt{r^2 + (y_m - y_0)^2 - r^2} \Big).(x - x_0) + (r^2 - (x_m - x_0)^2)(y - y_0) = 0 \quad (۹)$$

همچنان که مشاهده می‌شود- با توجه به اینکه از یک خط خارج از دایره، دو مماس بر آن وجود دارد- دو معادله در مسیر بالا وجود دارد که یکی از این دو مسیر نامناسب است و مانع را قطع می‌کند و لذا باید حذف گردد. پس از انتخاب مسیر مناسب به روش بیان شده در بخش قبل، این معادله را باید با دایره‌ای به شعاع گام موشک δ و مرکز موقعیت فعلی موشک (x_m, y_m) قطع داد تا نقطه مسیر بعدی موشک یعنی (x'_m, y'_m) به‌دست آید.

به‌طور خلاصه با در نظر گرفتن موارد فوق و با این فرض که نقطه M موقعیت فعلی موشک و نقطه T موقعیت بعدی موشک را نمایش دهند، الگوریتم پیشنهادی جهت یافتن کوتاه‌ترین مسیر مناسب را به شرح زیر بیان می‌کنیم:

۱. خط MT را رسم کنید. این خط موقعیت‌های فعلی موشک و هدف را به هم وصل می‌کند.

۲. تعداد موانعی را که توسط خط فرضی MT قطع می‌شوند در مجموعه $C_{M,O}$ قرار دهید. اگر $C_{M,O}$ تهی باشد که خط MT مسیر بهینه خواهد بود در غیر اینصورت به مرحله سوم بروید.

۳. خط واصلی از M به هر یک از نقاط کران موانعی که در مجموعه $C_{M,O}$ قرار دارند رسم کنید. مسیرهای به‌دست آمده را در مجموعه L قرار دهید.

۴. اولین مسیر موجود در مجموعه $C_{M,O}$ را بررسی کنید. اگر آخرین خط از مسیر جاری مانعی را قطع نکند، مسیر مناسب است، آن‌را از L حذف کنید و در F قرار دهید و به مرحله ششم بروید و در غیر اینصورت به مرحله پنجم بروید.

۵. آخرین گره از مسیر را با نقاط کران مانع قطع شده جایگزین نمایید. مسیر به‌دست آمده را در L جایگزین کنید. باید دقت داشت که دو مسیر به‌دست خواهد آمد.

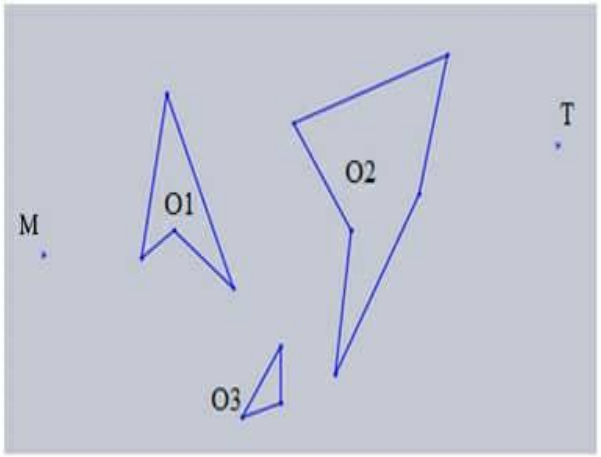
۶. اگر L تهی باشد به مرحله هفتم بروید و در غیر اینصورت به مرحله چهارم بروید.

۷. مجموعه F را اصلاح نمایید؛ به این شکل که مسیرهای تکراری را حذف نموده و به ازای یک گره مشابه مسیر طولانی‌تر را حذف کنید.

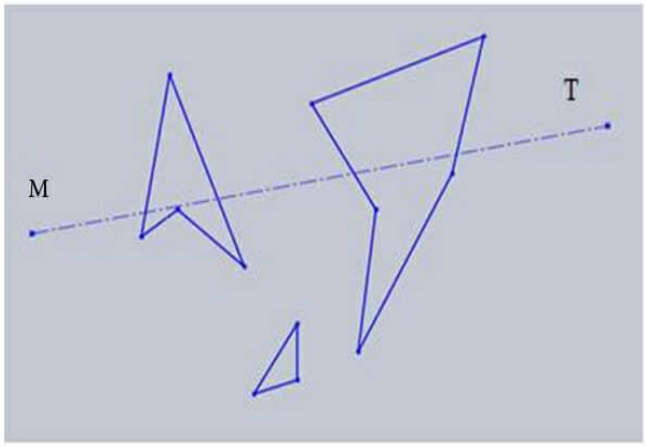
۸. اگر فقط یک مسیر در F وجود داشته باشد و گره نهایی این مسیر به نقطه هدف منتهی شد، همان کوتاه‌ترین مسیر مناسب به‌دست آمده است در غیر اینصورت به مرحله نهم بروید.

۹. نقطه هدف را به انتهای همه مسیرهای موجود در F اضافه نمایید و مسیرهای به‌دست آمده را در L قرار داده و F را خالی نمایید و به مرحله چهارم بروید.

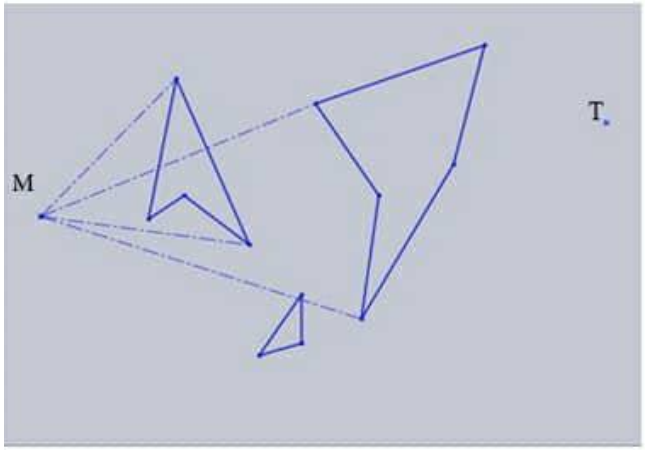
برای تشریح بیشتر این الگوریتم یک موقعیت فرضی مشابه شکل **۶-الف** را درنظر می‌گیریم که در آن سه مانع در حوزه دید موشک قرار داشته باشند. در این شکل، M بیانگر موقعیت موشک و T نشان دهنده موقعیت هدف در آن لحظه می‌باشد. سایر موانع موجود در محیط با توجه به حوزه دید موشک برای موشک ناشناخته هستند و اطلاع خاصی از آن‌ها وجود ندارد لذا در شرایط فعلی فقط همین سه مانع در محاسبات الگوریتم پیشنهادی وارد می‌شوند. در اشکال زیر الگوریتم را به‌صورت مرحله به مرحله نمایش می‌دهیم.



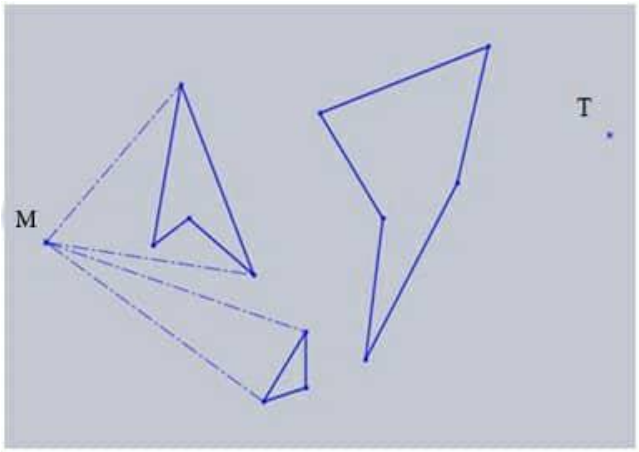
شکل۶-الف. موشک سه مانع را در حوزه دید خود مشاهده می‌کند



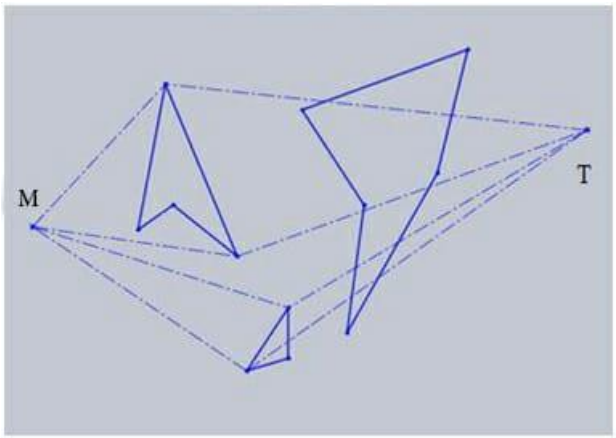
شکل۶-ب. خط MT را با توجه به موقیت موشک و هدف رسم می‌کنیم.



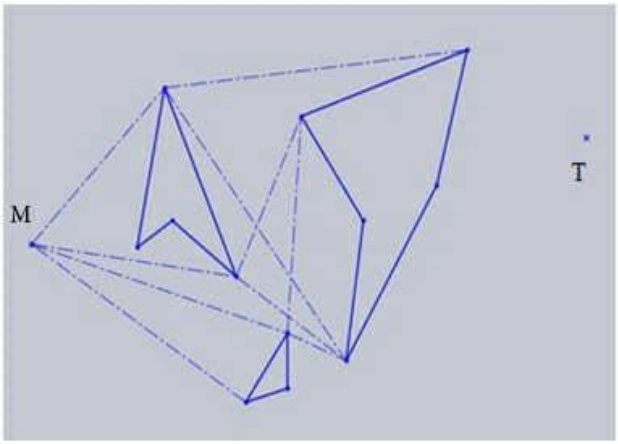
شکل۶-ج. چون خط MT دو مانع شماره ۱ و ۲ را قطع می‌کند لذا مسیر بهینه نمی‌باشد. بر طبق مرحله۳ از موقعیت فعلی موشک به نقاط کران هر یک از موانعی که توسط خط MT قطع شده‌اند یک خط وصل می‌کنیم. به ازای هر مانع دو خط وجود خواهد داشت. حال خط MT را حذف می‌کنیم.



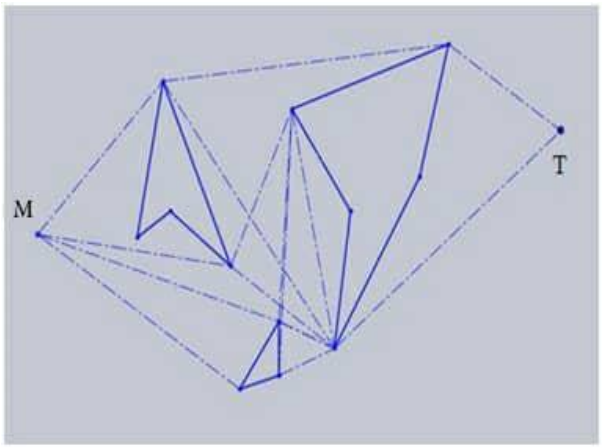
شکل۶-د. مطابق مراحل ۴ و ۵ و ۶ دو تا از خطوط بالا موانعی را قطع کرده‌اند لذا مانع قطع شده توسط هر یک از خطوط را درنظر می‌گیریم و از نقطه ابتدای آن خطی به نقاط کران آن مانع رسم می‌کنیم و با خط قبلی جایگزین می‌نماییم. این کار را برای هر دو خط بالا انجام می‌دهیم. چهار مسیر به‌دست آمده، هیچ مانعی را قطع نمی‌کنند.



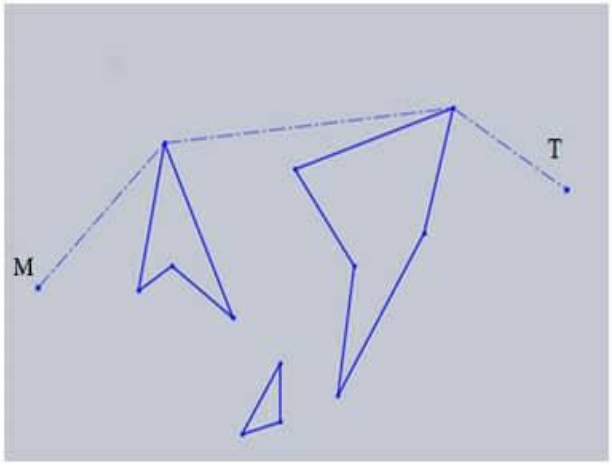
شکل۶-ه. حال که تمام مسیرها مناسب هستند مطابق مرحله۹ از انتهای مسیرهای به‌دست آمده به موقعیت هدف مسیرهایی را اضافه می‌کنیم.



شکل۶-و. برخی از مسیرهای حاصل موانعی را قطع می‌کنند که همانند مراحل بالا مانع قطع شده را درنظر می‌گیریم و بجای خط قطع کننده دو خط به نقاط کران این موانع رسم می‌کنیم و آن خط را حذف می‌نماییم. عملیات اصلاح را مطابق مرحله ۷ اعمال می‌کنیم تا مسیرهای تکراری حذف شوند.



شکل۶-ز. همانند مرحله قبل پس از مناسب بودن مسیرهای به‌دست آمده، خطوطی را از انتهای این مسیرها به موقعیت هدف رسم می‌کنیم و عملیات مناسب کردن و اصلاح مسیر را روی آن‌ها انجام می‌دهیم. چون همه مسیرها به هدف رسیدند لذا انتهای الگوریتم خواهد بود و عمل انتخاب از بین این مسیرها که تعدادشان نیز کم است انجام می‌گیرد.



شکل۶-ح. در این مرحله هم ایجاد مسیر به پایان رسیده و مطابق مرحله ۸ تنها یک مسیر باقی مانده است که به هدف نیز می‌رسد. لذا این مسیر کوتاه‌ترین مسیر است که توسط الگوریتم پیشنهادی به‌دست آمده است.

مسیر یافته شده در مرحله نهایی شکل**۶** با استفاده از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر ممکن، بیانگر مسیر بهینه‌ای است که موشک را به سمت هدف هدایت می‌کند بدون اینکه با موانع برخورد داشته باشد. شکل فوق، موقعیت ترسیم شده را در یک لحظه خاص نشان می‌دهد.

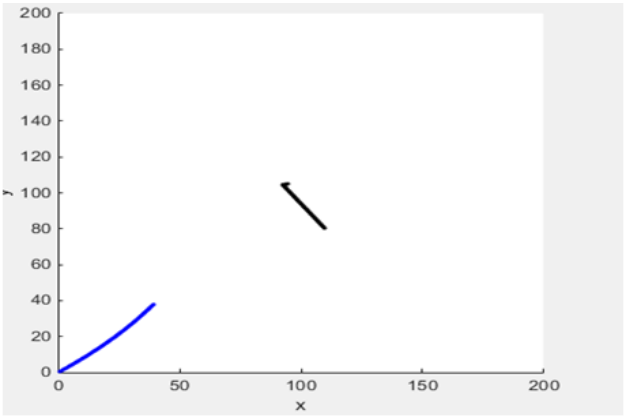
در نهایت این موضوع قابل ذکر است که با توجه به اینکه الگوریتم ارائه شده از همه اطلاعات موجود در محیط استفاده نمی‌کند و جهت کنترل حجم محاسبات در چرخه‌های بعدی، عملیات اصلاحی در الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا الگوریتم پیشنهادی در زمان خیلی کم، به جواب بهینه و دقیق‌تر می‌رسد.

یافته‌های شبیه‌سازی

در ادامه، عملکرد الگوریتم و نرم‌افزار پیشنهادی را در برخی از سناریوهای با محیط‌های پیچیده پویا و ایستا را بررسی می‌نماییم. اجرای الگوریتم در قالب نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی گردیده است. لازم به‌ذکر است که منظور از مقادیر منفی در بردارهای سرعت درنظر گرفته شده، این است که موشک هدف، امکان حرکت زیگزاگی را دارا می‌باشد.

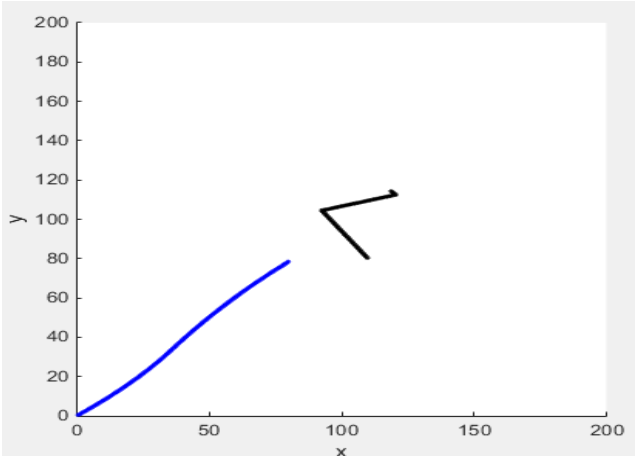
۱. بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در عملیات تعقیبی

در این بخش رفتار الگوریتم پیشنهادی در شرایطی که مانعی در محیط پیش رو، وجود نداشته باشد، نشان داده می‌شود. در اولین سناریو، نقطه شروع هدف به مختصات $(110,80)$ درنظر گرفته می‌شود. هدف در ۷۰ ثانیه اول با بردار سرعت خطی $vt = [-0.25 \;\; 0.35]$ در حال حرکت است. (شکل**۷-الف**)



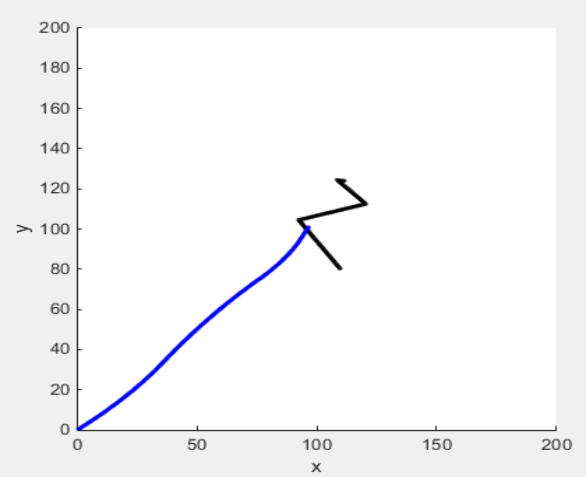
شکل۷-الف

در ۸۰ ثانیه بعد هدف با بردار سرعت $vt = [0.35 \;\; 0.1]$ ادامه مسیر می‌دهد و موشک همچنان در پی رهگیری آن می‌باشد (شکل**۷-ب**)



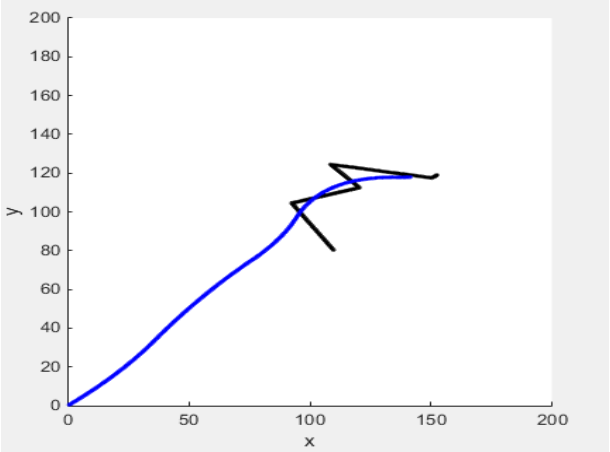
شکل۷-ب

در ۴۰ ثانیه بعد، هدف با یک تغییر مسیر ناگهانی، با بردار سرعت $vt = [-0.3 \;\; 0.3]$ حرکت نموده و همچنان موشک به دنبال آن، در حالت بهترین مسیر می‌باشد. (شکل**۷-ج**)



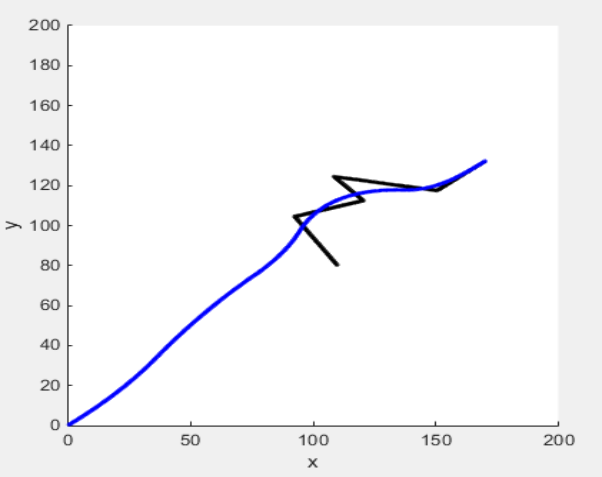
شکل۷-ج

در ادامه، هدف تغییر مسیر داده و در ۷۰ ثانیه بعدی با بردار سرعت $vt = [0.6 \quad -0.1]$ در حال حرکت است. (شکل۷-د)



شکل۷-د

در انتها نیز هدف با بردار سرعت $vt = [0.6 \quad -0.1]$ در حال ادامه مسیر است که موشک در گام ۳۳۱ به آن می‌رسد. (شکل۷-ه)



شکل۷-ه

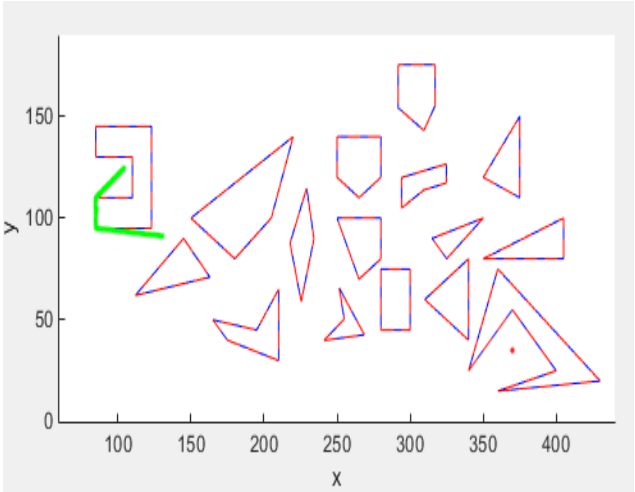
در سناریوی قبل هدف با تغییر مسیرهایی که داده است، رفتار غیرقابل پیش‌بینی را برای موشک داشته است که هر بار موشک از طریق حسگرهایش، داده‌های لازم را به‌دست می‌آورد و الگوریتم پیشنهادی را با استفاده از این داده‌های به‌دست آمده اجرا کرده و بهترین مسیر ممکن و مناسب را در کمترین زمان به سمت هدف مشخص به‌دست می‌آورد. هر بار مسیر تولید شده دارای یک معادله مسیر و یک نقطه هدف میانی و موقتی می‌باشد. موشک در راستای این مسیر به سمت هدف میانی و موقتی هر گام حرکت کرده و سپس هر بار این روند را تکرار می‌کند تا موشک به هدف اصلی و نهایی در آخرین گام برسد.

۲. بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در محیط با موانع و هدف ثابت

در این بخش سناریویی در یک فضای با موانع متعدد و شلوغ، جهت رهگیری یک هدف ثابت توسط موشک آزمایش می‌شود. در این سناریو حوزه دید موشک را ثابت فرض کرده و به‌علاوه سرعت موشک را نیز ثابت درنظر می‌گیریم. در این سناریو موانع با پیچیدگی‌های مختلف را در محیط قرار داده و سعی شده با قرار دادن موشک و هدف در میان موانع مختلف، عملکرد الگوریتم پیشنهادی سنجیده شود.

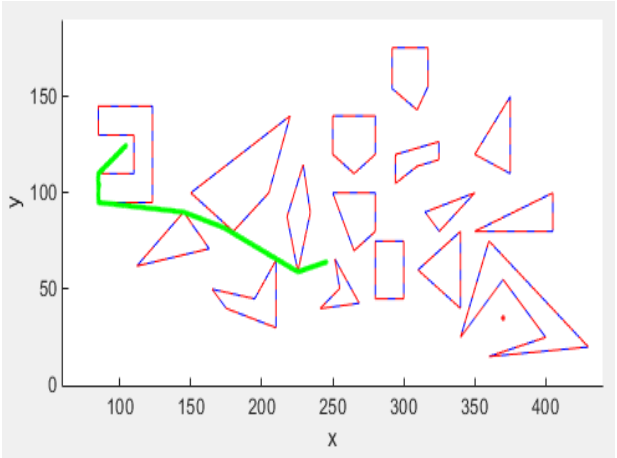
ابتدا موشک از میان یک مانع حرکتش را جهت رسیدن به هدف که آن هم در میان یک مانع پیچیده دیگر قرار دارد، شروع کرده و با موفقیت با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، کوتاه‌ترین مسیر

مناسب و ایمن را جهت رسیدن به هدف، یافته و سپس بر همان مبنا، مسیر یافته شده را می‌پیماید. (شکل**۸-الف**)



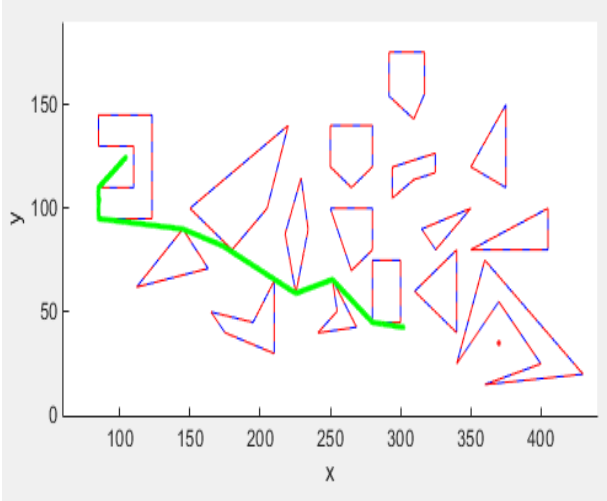
شکل۸-الف

در ادامه نیز موشک با استفاده از الگوریتم پیشنهادی از میان موانع موجود، کوتاه‌ترین مسیر مناسب را که از موانع بر حذر باشد یافته و طبق آن به سمت هدف ادامه مسیر می‌دهد. (شکل**۸-ب**)



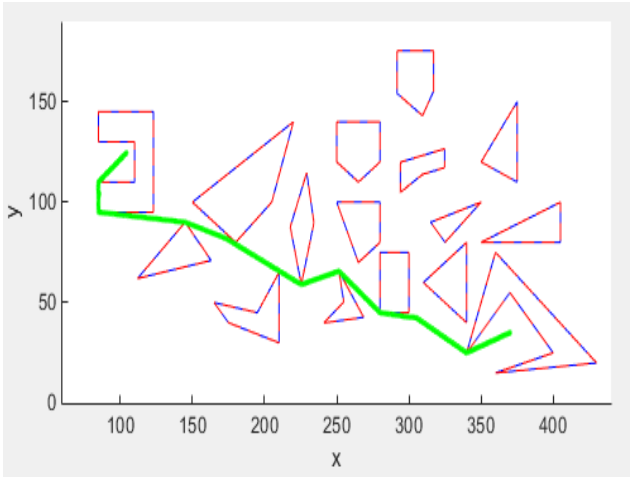
شکل۸-ب

موشک با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، بهترین مسیر مناسب که از موانع بر حذر باشد را به‌دست آورده و طبق آن به هدف ثابت نزدیک می‌شود. (شکل**۸-ج**)



شکل۸-ج

در انتها، موشک طبق مسیر یافته شده توسط الگوریتم پیشنهادی، ضمن اینکه کوتاه‌ترین مسیر ممکن است، از تمامی موانع بر حذر بوده و به هدف می‌رسد. (شکل**۸-د**)

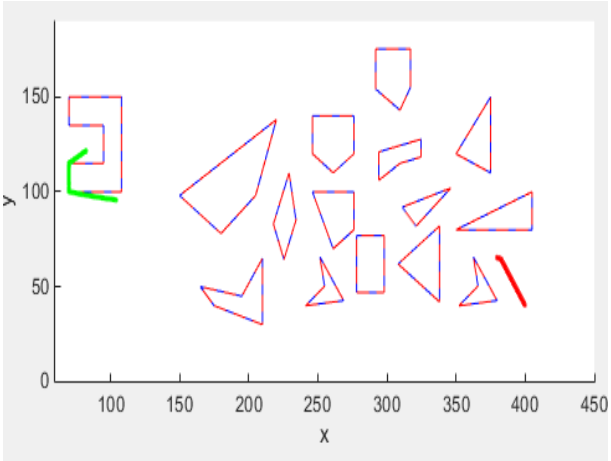


شکل۸-د

۳. بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در محیط با موانع و هدف متحرک

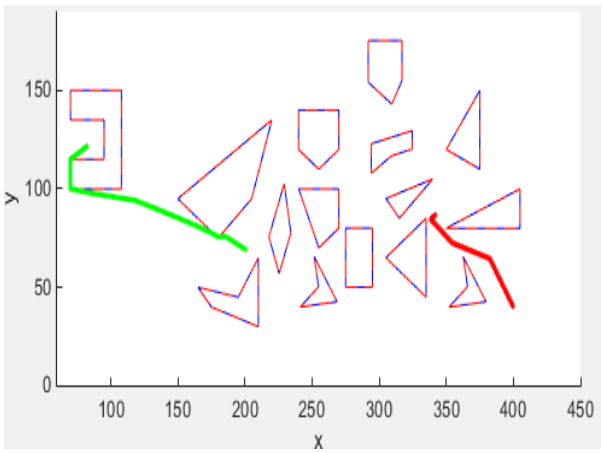
در آخرین سناریو در محیط پیچیده‌ای از موانع و هدف متحرک، نقطه شروع موشک به مختصات $M = [83\ \ 122]$ و شروع هدف نقطه به مختصات $T = [400\ \ 40]$ در نظر گرفته می‌شود. ابتدا هدف در ۷۰ واحد زمانی اول با بردار سرعت $vt = [-0.25\ \ 0.35]$ شروع به حرکت و ادامه مسیر می‌کند. ضمن اینکه موشک هم از داخل یک مانع با موفقیت و به صورت

ایمن و با یک مسیر مناسب و کوتاه، خارج شده و در رهگیری هدف، کار خود را ادامه می‌دهد. (شکل**۹-الف**)



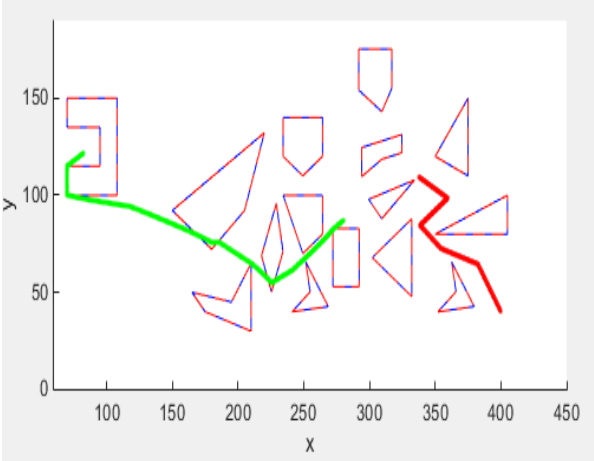
شکل۹-الف

در ادامه مسیر، هدف در ۸۰ واحد زمانی بعدی با بردار سرعت $vt = [-0.35 \;\; 0.1]$ و بعد از آن نیز با بردار سرعت $vt = [-0.4 \;\; 0.3]$ در ۴۰ واحد زمانی بعدی ادامه مسیر می‌دهد. همچنان که موشک در قسمتی از محیط با موانع کمتر با یک مسیر مناسب کوتاه، در پی آن با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ادامه مسیر می‌دهد. (شکل**۹-ب**)



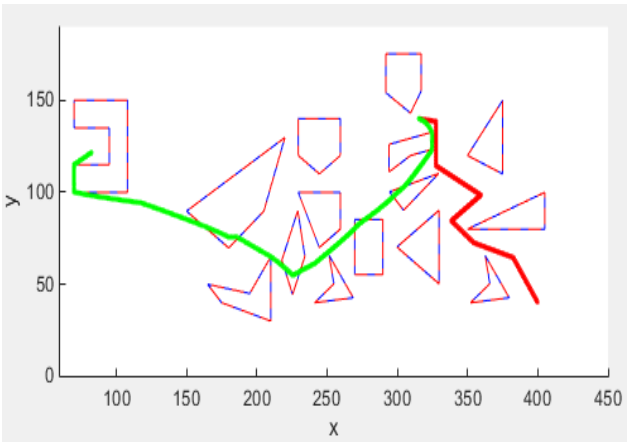
شکل۹-ب

در محیطی که شلوغی موانع متحرک و ایستا در آن موجود است، موشک علی‌رغم تغییر مسیرهای هدف که طی ۷۰ واحد زمانی با سرعت $vt = [0.3 \;\; 0.2]$ و در ۸۰ واحد زمانی بعدی نیز با بردار سرعت $vt = [-0.4 \;\; 0.2]$ ادامه مسیر می‌دهد، با موفقیت از بین موانع با بهترین مسیر ممکن و مناسب، آن‌را رهگیری می‌نماید. (شکل**۹-ج**)



شکل۹-ج

نهایتا هدف که در حال ادامه دادن مسیر خود با بردار سرعت $vt = [0 \;\; 0.6]$ در ۴۰ واحد زمانی و در ادامه هم با بردار سرعت $vt = [-0.4 \;\; 0.05]$ می‌باشد، موشک با موفقیت و طی کردن کوتاه‌ترین مسیر مناسب و در مدت زمان کمتر، پس از یک دور تعقیب آن، موفق به رسیدن به هدف می‌شود. (شکل**۹-د**)



شکل۹-د

در این سناریو، کارایی الگوریتم در حالتی‌که موشک داخل یک فضای امنیتی و به‌عبارتی داخل یک مانع باشد نیز سنجیده شد و موشک توانست با موفقیت مسیر خود را با بهترین مسیر ممکن با توجه به محل هدف و حرکت آن با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، پیدا کرده و به سمت هدف در حرکت شود. همچنین در این سناریو موانع هم اغلب با سرعت‌های متفاوت و البته کمتر از موشک در محیط، متحرک بودند و هدف نیز تغییر مسیرهای غیرقابل پیش‌بینی انجام می‌دهد که توانایی برآورد مسیر آن

وجود ندارد. ملاحظه شد که مسیر تولید شده توسط الگوریتم پیشنهادی، کوتاه‌ترین مسیر ممکن و مناسب و کاملا ایمن بوده که با استفاده از اطلاعاتی که موشک به صورت برخط اطلاعات آن را از محیط توسط حسگرهایش دریافت کرده، به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک محیط دو بعدی که موشک و موانع و هدف در آن قرار دارند، درنظر گرفته شده است. در این محیط، موانعی وجود دارند که می‌توانند محدب و یا مقعر و نیز ثابت و یا متحرک باشند. سرعت حرکت و جهت حرکت این موانع برای موشک ناشناخته است. مسئله در حالتی‌که یک شی هدف در محیط وجود داشته باشد و بتواند مثل موانع، مقدار سرعت و جهت حرکت آن نیز ناشناخته باشد جواب داده می‌شود. مهم‌ترین موضوع در این باره، این است که هدف در هر نقطه‌ای باید توسط موشک قابلیت شناسایی داشته باشد اگر چه در حوزه دید موشک قرار نداشته باشد. ضمن اینکه مسئله تنها در حالتی جواب دارد که سرعت هدف و موانع از سرعت موشک کمتر باشند تا هم موشک بتواند از موانع به شکل ایمن رد شود و هم اینکه موشک بتواند به هدف برسد. نوع حرکت موانع و هدف نیز می‌توانند روی یک خط مستقیم قرار داشته باشد و یا می‌توانند در طول اجرای برنامه در چندین جهت متفاوت حرکت داشته باشد. بدین معنا که درصدی از زمان را در یک مسیر و درصدی را در مسیر دیگر حرکت نماید. برای حل این مسئله، الگوریتم ابتکاری دقیقی ارائه شده است که بهترین مسیر بدون برخورد ممکن با موانع موجود در محیط را جهت رسیدن موشک به هدف ارائه می‌کند. کارایی الگوریتم پیشنهادی را طی چند مسئله متفاوت در فضاهای پیچیده، بررسی نمودیم و ملاحظه شد موشک شرایط موجود را رصد نموده و با توجه به آن، مسیر کوتاه بدون برخورد با موانع را تجربه می‌نماید. همان‌طور که بیان شد، روش پیشنهاد شده در این تحقیق، یک روش ابتکاری است. در این الگوریتم و البته در هر الگوریتم ابتکاری دیگر، هیچ تضمینی برای بهینگی مطلق مسیرهای حاصله وجود ندارد. به‌رغم این واقعیت، مسیرهای حاصل از الگوریتم پیشنهادی در اینجا، زیر- بهینه هستند. چرا که در این روش، الگوریتم پیشنهادی به‌گونه‌ای تدوین یافته است که پرنده همواره تمایل دارد به ایمن‌ترین و در عین حال نزدیک‌ترین مسیر به سمت پروازی جاری، تغییر جهت دهد. بنابراین ضمن پرهیز از گردش‌های غیر ضروری، اهداف برنامه‌ریزی مسیر اجابت خواهد شد. نظر به عدم وجود هرگونه حلقه تکرار در این روش و نیز عدم وجود هرگونه تابع ریاضی که بهینه‌سازی آن بر اساس گرادیان‌گیری مد نظر باشد، هیچ نگرانی از بابت وقوع مینیمم محلی وجود ندارد.

قطعا می‌توان در کارهای آتی، فضای الگوریتم را سه بعدی درنظر گرفت و سناریوهایی در فضای سه بعدی را شبیه‌سازی نمود. ضمن این‌که می‌توان الگوریتم پیشنهادی را برای بیش از یک موشک، جهت دست‌یابی به یک یا چند هدف متحرک توسعه داد.

پی‌نوشت‌ها

۱ Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
۲ Voronoi
۳ Swarm Intelligence Algorithm
۴ Simulated Annealing (SA)
۵ Predictive Control
٦ Line Of Sight (LOS)
۷ Reinforcement Learning
۸ Rendezvous Guidance (RG)
۹ Directive Circle
۱۰ Collision cone (CC)

منابع و مراجع

[1] H. Nobahari and A. Sharifi, "*An introduction to the guidance of flying devices*", 3th Ed. Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, 2014.

[2] Y. Eun and H. Bang, "*Cooperative control of multiple unmanned aerial vehicles using the potential field theory*", Journal of Aircraft, Vol. 43, No. 6, pp. 1805-1814, 2006.

[3] Y. Eun and H. Bang, "*Cooperative task assignment and path planning of multiple uavs using genetic algorithm*", AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit, Rohnert Park, California, May 7-10, 2007.

[4] R. Tarighi, MH. Kazemi, and M.H., Khalesi, "*Optimal Routing of Rocket Motion using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization*", Int J Advanced Design and Manufacturing Technology, 15, 3, 2022.

[5] M. B. Anderson, J. E. Burkhalter, and R. M. Jenkins, "*Design of a Guided Missile Interceptor Using a Genetic Algorithm*", J. Spacer. Rockets, 38, 1, 2001.

[6] Y. He, K. Qu, and X. Xia, "*Simulation Verification of Cruise Missile Route Planning Based on Swarm Intelligence Algorithm*." Methods and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems. AsiaSim 2022. Communications in Computer and Information Science, vol 1713.

[7] T. Turker, O. K. Sahingoz, and G. Yilmaz, "*2D path planning for UAVs in radar threatening environment using simulated annealing algorithm*" 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Denver, Colorado, USA, June 9-12, 2015.

[8] C. S. Ie and Z. Y. Liu, "*Research on path planning of land cruise missile based on improved V-ACO algorithm*" Tactical Missile Technology, (05), 122–131, 2021.

[9] S. Yan, Z. Lihua, D. Shouquan, and W. Jue, "*Cruise Missile Path Planning Based on ACO Algorithm and Bezier Curve Optimization*" Journal of System Simulation, 32 (1): 122-129, 2020.

[10] L. Hao, C. Guo, and L. Wu, "*A study on route planning of helicopter in low altitude area*" 2016 IEEE First International Conference on Data Science in Cyberspace, pp. 484-488, 2016.

[11] D. Bhattacharjee, A. Chakravarthy, K. Subbarao, "*Nonlinear Model Predictive Control-Based Missile Guidance for Target*" Interception, in AIAA Sci.tech. 2020 Forum, Vol. 1, Part. F, 2020.

[12] U. N. Optimization, "*Brief Papers Missile Guidance Law Based on Robust Model Predictive Control*", 26, 8, 1803–1809, 2015.

[13] B. Zhang and D. Zhou, "*Optimal Predictive Sliding-Mode Guidance Law for Intercepting Near-Space Hypersonic Maneuvering Target*", Chinese J. Aeronaut., 35, 4, 320-331, 2022.

[14] P. T. Jardine and S. Givigi "*A predictive motion planner for guidance of autonomous UAV systems*", 2016 Annual IEEE Systems Conference, Orlando, FL, USA, April 18-21, 2016.

[15] D. Hong and S. Park "*Avoiding Obstacles via Missile Real-Time Inference by Reinforcement Learning*", Appl. Sci., 12, 2022.

[16] D. Hong, M. Kim and S. Park, "*Study on Reinforcement Learning-Based Missile Guidance Law*", Appl. Sci. 10, 6567, 2020.

[17] R. Helgason, J. Kennington, and K. Lewis, "*Cruise Missile Mission Planning: A Heuristic Algorithm for Automatic Path Generation*", Journal of Heuristics 7, 473–494, 2001.

[18] F. Kunwar, F. Wong, and R. B. Mrad, "*Time-optimal rendezvous with moving objects in dynamic cluttered environments using a guidance based technique*", in Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 283-288, 2005.

[19] E. Masehian and Y. Katebi, "*Robot Motion Planning in Dynamic Environments with Moving Obstacles and Target*", World academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Computer and Information Engineering, 1, 5, 2007.