

Path Planning of Mobile Robots Using the Artificial Potential Field Method and the Harris Hawks Metaheuristic Algorithm

Hossein Saeedi Masine^{1,2}, M.Sc, Mohammad Saadat^{1,2}, Assistant Professor

¹ Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

² Modern Manufacturing Technologies Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

h.saeedi.iaun@gmail.com, saadat@pmc.iaun.ac.ir

Abstract:

Path planning of mobile robots is one of the important issues in the field of robotics. Also, optimizing the path length and crossing the local minima traps are the basic and up-to-date challenges in this field. One of the important methods in path planning of these robots is the artificial potential field method. Because it is based on simple mathematical calculations. One of the most important disadvantages of this method is getting trapped in local minima situations. One approach for solving the problem of local minima is to use optimization methods to find suitable coefficients (attractive and repulsive) and step length that can solve local minima and optimize the path length. The Harris Hawks algorithm is a powerful and new meta-heuristic algorithm in the field of optimization that is based on population and inspired by the life of Harris Hawks in nature. This algorithm has been able to prove its superiority over similar optimization methods in finding the optimal solution, faster convergence, lower computational time and not trapping in local minima. This method has not been used in the path planning of mobile robots. In order to eliminate the disadvantages of the artificial potential field method and to optimize the path length, the Harris Hawks algorithm has been used in this paper. The simulation results showed that the combination of the artificial potential field method and the Harris Hawks algorithm can solve the local minima problem and optimize the path length, increase the path efficiency and reduce the convergence time.

Keywords: path planning, mobile robots, path length optimization, local minimum, artificial potential field method, Harris Hawk's algorithm.

Received: 15 December 2018

Revised: 10 April 2019

Accepted: 11 May 2019

Corresponding Author: Dr. Mohammad Saadat

Citation: H. Saeedi-Masine, M. Saadat, "Path planning of mobile robots using the artificial potential field method and the harris hawks metaheuristic algorithm", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 12, no. 46, pp. 1-13, September 2021 (in Persian).

طراحی مسیر ربات‌های متحرک با ترکیب روش میدان پتانسیل مصنوعی و الگوریتم فراابتکاری شاهین

حسین سعیدی مسینه^{۱،۲}، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، محمد سعادت^{۱،۲}، استادیار

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
۲- مرکز تحقیقات فناوری‌های نوین ساخت و تولید، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
h.saeedi.iaun@gmail.com, saadat@pmc.iaun.ac.ir

چکیده: طراحی مسیر ربات‌های متحرک یکی از مسائل مهم در حوزه رباتیک است. همچنین امروزه بهینه‌سازی طول مسیر حرکت و عبور از تله‌های حداقل محلی یکی از مشکلات اساسی و به روز در ربات‌های متحرک است. یکی از روش‌های مهم در طراحی مسیر این‌گونه ربات‌ها، روش میدان پتانسیل مصنوعی است زیرا مبتنی بر محاسبات ساده ریاضی است. از مهم‌ترین معایب این روش می‌توان به گیرکردن در تله‌های حداقل محلی اشاره نمود. یک رویکرد برای رفع مشکل حداقل‌های محلی، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای یافتن ضرایب مناسب جذب، دفع و طول گام است که بتواند هم از حداقل‌های محلی عبور کند و هم طول مسیر را نیز در بهینه‌سازی لحاظ نماید. الگوریتم شاهین یک الگوریتم فراابتکاری قوی و جدید در حوزه بهینه‌سازی است که مبتنی بر جمعیت و الهام گرفته شده از زندگی شاهین‌ها در طبیعت است. این الگوریتم توانسته است برتری خود را بر روش‌های بهینه‌سازی مشابه در یافتن جواب بهینه، همگرایی سریعتر، زمان حل کمتر و دوری از حداقل‌های محلی اثبات نماید. از آنجایی که این روش تاکنون در طراحی مسیر ربات‌های متحرک مورد استفاده قرار نگرفته است، در این مقاله به منظور رفع معایب روش میدان پتانسیل مصنوعی و همچنین بهینه‌سازی طول مسیر، بازده مسیریابی و زمان همگرایی از الگوریتم شاهین استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از رفع معایب روش میدان پتانسیل مصنوعی و بهینه‌شدن طول مسیر حرکت، افزایش بازده مسیریابی و کاهش زمان همگرایی است.

کلمات کلیدی: طراحی مسیر، ربات متحرک، بهینه‌سازی طول مسیر، حداقل محلی، روش میدان پتانسیل مصنوعی، الگوریتم شاهین.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۸/۱۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۲/۳۰

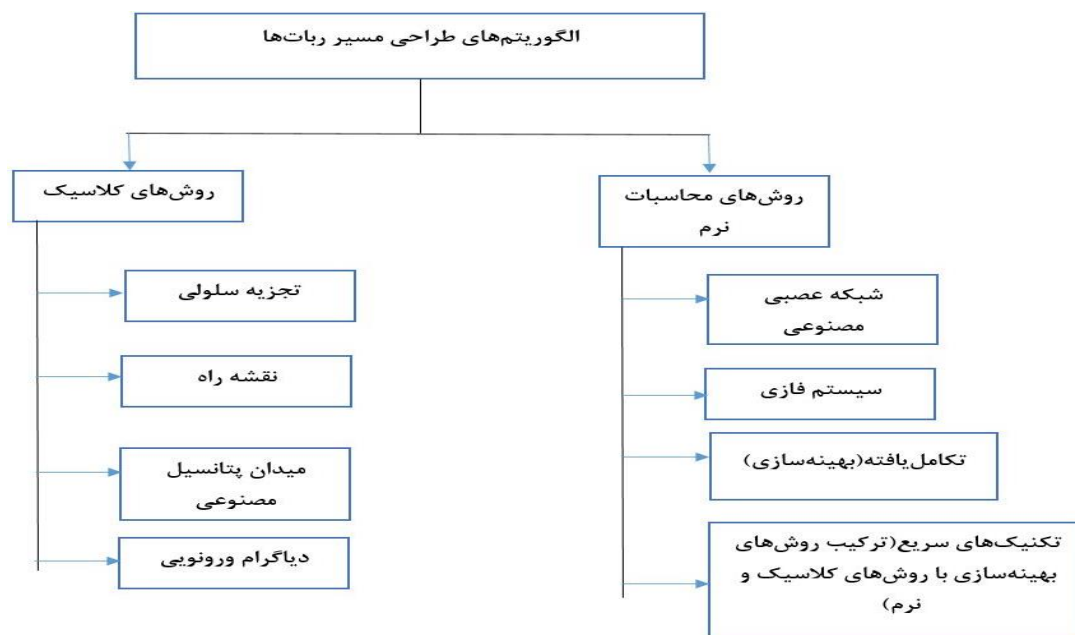
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد سعادت

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده فنی مهندسی

۱- مقدمه

مسئله اصلی در طراحی مسیر ربات‌های متحرک، محاسبه مسیری است که به ربات اجازه حرکت از نقطه شروع به سمت نقطه هدف دهد، در حالی که در طول مسیر حرکت از برخورد به موانع جلوگیری شود [۱]. آماده‌شدن ربات برای کار در زندگی واقعی انسان‌ها، نیازمند پیدا نمودن مسیری ایمن و بهینه است. ربات‌ها باید با توجه به نصب انواع سنسورها، بردهای کامپیوتری و سیستم‌های حرکتی، توانایی مسیریابی موفق در طول مسیر حرکت را داشته باشند [۲]. کاربرد گسترده و چشم‌انداز روشن ربات‌های متحرک، برنامه‌ریزی مسیر حرکت این ربات‌ها را به یک زمینه تحقیقاتی مهم تبدیل کرده است.

در چند دهه گذشته، محققان در زمینه برنامه‌ریزی مسیر ربات‌های متحرک، الگوریتم‌های بسیاری را ارائه داده‌اند [۳]. این الگوریتم‌ها به دو دسته کلاسیک و محاسبات نرم تقسیم می‌گردند. این تقسیم‌بندی در شکل (۱) نشان داده شده است. رویکردهای کلاسیک شامل نقشه راه^۱، تجزیه سلول^۲، میدان پتانسیل مصنوعی^۳ (APF) و دیاگرام ورونویی^۴ است. شاخصه اصلی رویکردهای نقشه راه، نمودار قابلیت مشاهده بوده که خود مجموعه‌ای از خطوط در فضای آزاد است که گوشه‌های یک شی را به دیگری متصل می‌کند. ایده الگوریتم تجزیه سلولی، تجزیه فضای مساله به مجموعه‌ای از سلول‌های ساده و سپس محاسبه مجاورت به هدف در میان سلول‌ها است [۴]. در روش میدان پتانسیل مصنوعی، با تعریف توابع پتانسیل جاذبه و دافعه مصنوعی، ربات به سمت هدف جذب و از موانع دفع می‌شود. نمودار ورونویی برای مجموعه‌ای از اشیا هندسی، تقسیم فضای مساله به سلول‌هایی است که هریک از آن‌ها شامل نقاطی است که به یک شی خاص نزدیک‌تر هستند. همچنین از روش‌های معروف محاسبات نرم می‌توان به روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، سیستم فازی، الگوریتم‌های تکاملی (بهینه‌سازی) اشاره کرد. تمام روش‌های ذکر شده نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارند و در بسیاری از برنامه‌ها، برخی از آن‌ها با هم ترکیب شده‌اند تا موثرترین و کارآمدترین روش را در کنترل رباتیک مورد نظر را ارائه دهند [۴].



شکل (۱): انواع الگوریتم‌های مسیریابی ربات‌ها

Figure (1): Types of path planning algorithms for robots

روش میدان پتانسیل مصنوعی برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسط محققى به نام ختیب^۵ معرفی گردید [۵]. APF در ابتدا، در ربات‌های صنعتی و برای جلوگیری از برخورد با موانع استفاده گردید. به مرور زمان، این روش برای برنامه‌ریزی مسیر ربات‌های متحرک به کار برده شد. ایده اصلی APF، ساخت یک میدان گرانشی به سمت هدف و دافعه از موانع در فضای کاری ربات است تا اینکه ربات بتواند هدف را پیدا کند. به دلیل اجرای ساده این روش و همچنین نیاز پردازشی کم، الگوریتم‌های محلی

معمولاً مبتنی بر APF هستند اما دارای مشکل گیرکردن در حداقل محلی^۶ است [۵]. منظور از حداقل محلی شرایطی است که اگر ربات در آن شرایط قرار بگیرد قادر به ادامه مسیر خود نیست [۶].

محققان برای از بین بردن مشکل حداقل محلی در روش میدان پتانسیل مصنوعی، دو رویکرد را در پیش گرفته‌اند. در رویکرد اول، هنگام بروز مشکل حداقل محلی، روش حل به روش حل دیگری مانند دور زدن مرز مانع^۷ (BUG) تغییر می‌یابد [۷]. این روش کمکی می‌تواند مشکلات حداقل محلی را به‌طور موثری حل کند، اما در این روش کمکی، طول مسیر در نظر گرفته نمی‌شود و معمولاً مسیر طولانی‌تری نسبت به بهترین جواب خواهیم داشت. رویکرد دوم در حل مشکلات حداقل محلی روش APF، بهبود APF با رویکردهای بهینه‌سازی است که یکی از آنها بهینه‌سازی تکاملی^۸ (EAPF) است [۴] که در آن، روش APF با روش ژنتیک ترکیب می‌شود تا توابع پتانسیل بهینه را بدست آورد. طول مسیر به عنوان یک تابع هزینه^۹ استفاده شده و تلاش می‌شود راهی برای رسیدن به هدف پیدا شود که این تابع هزینه را به حداقل رساند. مسیری که در حداقل محلی گیر کند و به هدف نرسد به عنوان جواب با تابع هزینه خیلی بالا در نظر گرفته می‌شود.

این دو رویکرد پیشنهادی برای حل مشکل حداقل محلی، می‌توانند اشکال روش APF را تا حدی برطرف کند اما هر دو معایبی دارند. روش دور زدن مرز مانع (BUG) برای جلوگیری از حداقل محلی، طول مسیر را فدا می‌کند. رویکردهای ترکیب APF با روش‌های بهینه‌سازی می‌توانند مسیر کوتاه‌تری پیدا کنند، اما زمان همگرایی^{۱۰} آن‌ها به خصوص برای برخی از مسائل دارای حداقل محلی زیاد است. در نتیجه، هدف کلی مقاله حاضر بهبود زمان همگرایی روش APF ترکیب شده با الگوریتم‌های بهینه‌سازی خواهد بود.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی^{۱۱} به الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک متغیره و چند متغیره تقسیم‌بندی می‌شوند. از جدیدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توان به الگوریتم‌های فراابتکاری^{۱۲} اشاره کرد. الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم‌هایی هستند که در زمینه هوش مصنوعی بسیار کاربرد داشته و اخیراً در مقالات و منابع مختلف علمی مورد تاکید قرار گرفته‌اند [۸]. این الگوریتم‌ها که برای حل مسائل مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند متعدد بوده و دارای ویژگی‌های خاص خود هستند.

از الگوریتم‌های فراابتکاری بسیار معروف می‌توان به الگوریتم ژنتیک اشاره کرد [۹]. از الگوریتم‌های جدید مبتنی بر طبیعت می‌توان به الگوریتم‌های بهینه‌سازی پنگوئن^{۱۳} [۱۰]، گرگ خاکستری^{۱۴} [۱۱]، ملخ^{۱۵} [۱۲] و کلاغ^{۱۶} [۱۳] اشاره نمود. این الگوریتم‌ها به ترتیب براساس هوش ازدحامی و گله‌ای پنگوئن‌ها، گرگ‌ها، ملخ‌ها و کلاغ‌ها در طبیعت هستند. بسیاری از این الگوریتم‌ها در طراحی مسیر ربات‌های متحرک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از مهم‌ترین آن‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آب و هوا^{۱۷} [۱۴]، کلونی مورچگان^{۱۸} [۱۵، ۱۶]، ازدحام ذرات^{۱۹} [۱۷، ۱۸] و کلونی زنبورها^{۲۰} [۱۹، ۲۰] و محاسبات غشایی^{۲۱} [۲۱] است. جدیدترین الگوریتم فراابتکاری الهام گرفته شده از طبیعت، روش شاهین^{۲۲} [۲۲] است که در سال ۲۰۱۹ و بر اساس زندگی شاهین‌ها ارائه شده که توانسته است برتری خود را بر روش‌های بهینه‌سازی مشابه در یافتن جواب بهینه، همگرایی سریعتر، زمان حل کمتر و دوری از حداقل‌های محلی اثبات نماید. از آنجایی که روش شاهین تاکنون در حوزه طراحی مسیر ربات‌های متحرک مورد استفاده قرار نگرفته است، در این مقاله با استفاده از این روش سعی در ارتقای عملکرد روش‌های ترکیبی APF با رویکردهای بهینه‌سازی داریم. در ادامه، ابتدا روش میدان پتانسیل مصنوعی به‌صورت مختصر معرفی و سپس روش بهینه‌سازی شاهین مرور شده است. ترکیب این دو روش در طراحی مسیر ربات متحرک در چند مساله نمونه و برتری روش پیشنهادی بر روش‌های مشابه با مقایسه شاخص‌های طول مسیر، بازده مسیر و زمان همگرایی نشان داده شده است.

۲- روش میدان پتانسیل مصنوعی

همان‌طور که بیان شد، اولین روش برنامه‌ریزی مسیر ربات به وسیله میدان پتانسیل مصنوعی یا همان (APF) در مقاله ختیب در سال ۱۹۸۶ معرفی گردید [۴]. بیان این روش انقلابی در زمینه طراحی مسیر ربات‌ها در آن زمان بود، زیرا تا قبل از آن تمامی دانشمندان رباتیک و مکاترونیک و همچنین علم رباتیک از کمبود برنامه‌ای مدون و دقیق برای طراحی مسیر ربات‌ها رنج می‌بردند. این روش (الگوریتم) دارای دو تابع پتانسیل مصنوعی جذب‌کننده و دفع‌کننده است. تابع پتانسیل جذب‌کننده

دارای قابلیت است که ربات را به سمت هدف سوق می‌دهد و تابع پتانسیل دفع‌کننده باعث دفع شدن ربات توسط موانع موجود می‌شود. تابع پتانسیل مصنوعی جذب کننده U_{att} برای هر نقطه از صفحه دوبعدی با بردار مکان x عبارت است از:

$$U_{att}(x) = \frac{1}{2} k_a (x - x_{tar})^2 \quad (1)$$

که در آن x_{tar} مکان نقطه هدف و k_a ضریب جذب است. از منفی گرادیان تابع پتانسیل فوق، می‌توان در هر نقطه‌ای از مسیر نیروی جذب‌کننده ربات به سمت هدف را بدست آورد که در معادله زیر بیان شده است:

$$F_{att}(x) = -k_a (x - x_{tar}) n_{RT} \quad (2)$$

در اینجا، n_{RT} بردار واحد (یکه) است که در راستای خط مستقیم از ربات به سمت هدف است. تابع پتانسیل مصنوعی دفع‌کننده U_{rep} و در نتیجه تابع نیروی دافعه برای هر نقطه از صفحه دوبعدی با بردار مکان x عبارت است از:

$$U_{rep}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_r \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & \text{if } \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \text{if } \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$F_{rep}(x) = \begin{cases} \frac{k_r}{\rho^2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) n_{OR}, & \text{if } \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \text{if } \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

که در این روابط ρ فاصله ربات تا مانع مدنظر، k_r ضریب دافعه، ρ_0 فاصله ایمنی مانع مدنظر و n_{OR} بردار واحد در راستای خط مستقیم از مانع مدنظر به سمت ربات است. البته به تعداد موانع موجود در مساله، باید تابع پتانسیل مصنوعی دافعه به ازای هر مانع محاسبه و مجموع آنها به عنوان تابع پتانسیل دافعه کل در نظر گرفته شود.

در نهایت نیروی کل (F_{tot}) از برآیند نیروهای جذب‌کننده و دفع‌کننده به‌دست می‌آید و ربات در راستای نیروی کل یک گام بر می‌دارد و به نقطه جدیدی در مسیر خود می‌رسد. سپس محاسبات توابع پتانسیل مصنوعی و نیروها از ابتدا به‌ازای مکان جدید ربات تکرار و دوباره ربات در راستای نیروی کل جدید یک گام بر می‌دارد. طول گام نیز خود یکی از پارامترهای تنظیمی در این روش است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری شاهین

الگوریتم بهینه‌سازی شاهین یک الگوریتم فراابتکاری جدید مبتنی بر جمعیت است. این الگوریتم الهام گرفته از زندگی شاهین‌ها در طبیعت و همچنین نحوه شکار آن‌ها است. این الگوریتم در سال ۲۰۱۹ توسط میرجلیلی و همکاران معرفی گردید [۱۹]. الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس HHO شامل سه مرحله است: ۱- فاز اکتشاف، ۲- انتقال از اکتشاف به بهره‌برداری (استخراج)، ۳- فاز بهره‌برداری (استخراج): محاصره نرم و محاصره سخت [۲۲].



شکل (۲): حیوان شکاری شاهین هریس [۲۲]

Figure (2): The Harris Hawks hunter animal [22]

فاز اکتشاف: شاهین‌ها می‌توانند شکار را به‌وسیله چشمان تیز خود شناسایی کنند بدون آن‌که توسط شکار دیده شوند. آن‌ها برای شکار موفق، شکار خود را چندین ساعت در نظر می‌گیرند و بررسی می‌کنند و در لحظه مناسب حمله می‌کنند. در این الگوریتم، کاندیداهای جواب، شاهین‌ها هستند و بهترین شاهین (جواب) به عنوان نامزد شکار (لیدر) معرفی می‌گردد و ممکن است جواب بهینه اصلی در همسایگی آن باشد. جای‌گیری شاهین‌ها در فاز اکتشاف به دو روش انجام می‌گیرد [۲۲]:
 استراتژی ۱: آن‌ها بر اساس موقعیت سایر اعضای خانواده و موقعیت طعمه، موقعیت خود را تعیین می‌کنند ($q < 0.5$).
 استراتژی ۲: شاهین‌ها بصورت تصادفی در مکان‌های تصادفی در محدوده فضای جستجو پراکنده می‌شوند ($0.5 \leq q$).
 بردار موقعیت شاهین‌ها در مرحله بعد چنین تعیین خواهد شد:

$$X(t+1) = \begin{cases} X_{rand}(t) - r_1 |X_{rand}(t) - 2r_2 X(t)| & q \geq 0.5 \\ (X_{rabbit}(t) - X_m(t)) - r_3 (L_B + r_4 (V_B - L_B)) & q < 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

که در آن $X(t)$ ، $X_m(t)$ ، $X_{rabbit}(t)$ ، $X_{rand}(t)$ و V_B و L_B به ترتیب بیانگر انتخاب رندومی شاهین در جمعیت، موقعیت شکار (خرگوش)، میانگین موقعیت جمعیت کنونی شاهین‌ها، بردار موقعیت کنونی شاهین‌ها، حد پایین و حد بالا هستند. هم‌چنین پارامترهای r_1 ، r_2 ، r_3 ، r_4 و q اعداد انتخابی به‌صورت رندوم بین بازه $(0, 1)$ هستند که در هر مرحله به‌روزرسانی می‌شوند. در این فرمول، مقادیر میانگین موقعیت جمعیت کنونی شاهین‌ها از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

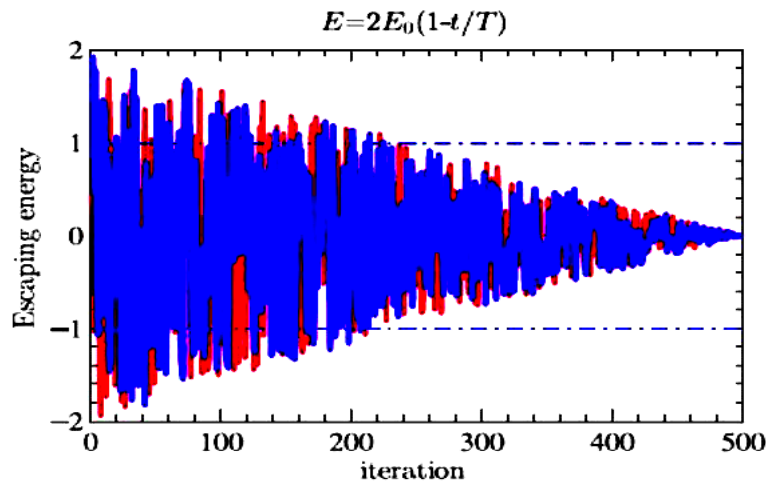
$$X_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t) \quad (6)$$

در این رابطه N و $X_i(t)$ بیانگر جمعیت شاهین‌ها و نمایش‌دهنده موقعیت هر شاهین در مرحله t هستند. انتقال از فاز اکتشاف به استخراج: این الگوریتم می‌تواند از فاز اکتشاف به فاز استخراج برود و در آنجا رفتارهای خود را با توجه به انرژی باقیمانده از شکار تغییر دهد. انرژی شکار در حین فرار، کاهش می‌یابد. فرمول انرژی شکار به‌صورت زیر است [۱۹]:

$$E = 2E_0(1 - \frac{t}{T}) \quad (7)$$

در این رابطه E_0 و T بیانگر انرژی اولیه و بیشترین تعداد مراحل است. در اینجا ممکن است دو حالت رخ دهد:
 ۱- $|E| \geq 1$: در این اتفاق، شاهین‌ها به دنبال مناطق مختلفی هستند تا مکان شکار را بیابند پس باید مرحله اکتشاف به‌روزرسانی و دوباره اجرا شود.

۲- $|E| < 1$: در این مرحله، الگوریتم سعی دارد بهترین جواب را برای بررسی در همسایگی خود پیدا کند، بنابراین الگوریتم به فاز استخراج منتقل خواهد شد.



شکل (۳): رفتار انرژی شکار [۲۲]
 Figure (3): Hunting energy behavior [22]

فاز استخراج: در این فاز، شاهین‌ها باید مرحله یورش ناگهانی را به‌وسیله نامزد شکار که در مرحله قبل تعیین گردید، به مرحله اجرا درآورند. همان‌طور که بیان گردید، این فاز دارای دو حالت محاصره نرم و سخت است. برای تشخیص این‌که در کدام حالت قرار داریم از پارامتر E یا انرژی فرار شکار استفاده می‌شود [۲۲].

الف- محاصره نرم: زمانی که شکار انرژی کافی برای فرار دارد، شاهین‌ها به‌صورت نرم آن را محاصره می‌کنند تا انرژی‌اش تحلیل رود $E \geq 0.5$. بروزرسانی موقعیت شاهین‌ها در این مرحله از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$X(t+1) = \Delta X(t) - E|X_{\text{rabbit}}(t) - X(t)| \quad (8)$$

که در آن:

$$\Delta X(t) = X_{\text{rabbit}}(t) - X(t) \quad (9)$$

$$J = 2(1 - r_5) \quad (10)$$

در اینجا $\Delta X(t)$ ، J و r_5 به ترتیب بیانگر تفاوت بردار موقعیت شکار و موقعیت کنونی، شبیه‌ساز حرکت شکار هستند که r_5 عددی رندوم بین ۰ و ۱ است. در حین محاصره نرم وقتی خرگوش انرژی کافی برای فرار را دارد، شاهین‌ها چندین شیرچه سریع تیمی را در اطراف شکار انجام می‌دهند. سعی می‌کنند با توجه به حرکات فریبنده طعمه، مکان و مسیر خود را به تدریج تصحیح کنند. در اینجا بروزرسانی موقعیت شاهین‌ها از طریق فرمول زیر به‌دست می‌آید:

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (11)$$

که در آن:

$$Y = X_{\text{rabbit}}(t) - E|X_{\text{rabbit}}(t) - X(t)| \quad (12)$$

$$Z = Y + S * LF(D) \quad (13)$$

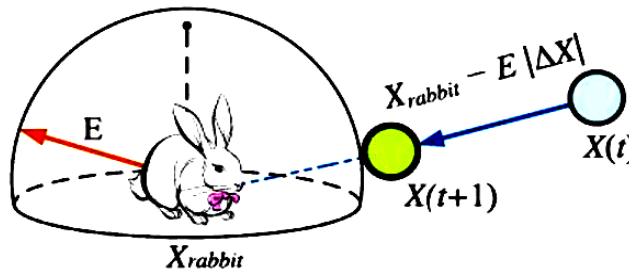
$$LF(D) = 0.01 * \frac{u * \sigma}{|\theta|^{1/\beta}} \quad (14)$$

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1 + \beta) * \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma(1 + \beta/2) * \beta * 2^{(\beta-1/2)}} \right)^{1/\beta} \quad (15)$$

در این جا u ، S ، θ ، D و β به ترتیب بیانگر مقدار رندوم میان ۱ و ۱، بردار رندوم با سایز $D \times 1$ ، ابعاد مسئله، مقدار رندوم میان ۰ و ۱ و پارامتر ثابت با مقدار $1/5$ هستند. همچنین $LF(D)$ به‌منظور شبیه‌سازی حرکت‌های فریبنده شکار در طی فاز فرار تعریف می‌گردد. شاهین‌ها برای مقابله با انواع حرکت فریبنده شکار، موقعیت‌های خود را دائماً تعویض می‌نمایند، بنابراین با توجه به این رفتارها آن‌ها می‌توانند بهترین راه را برای رسیدن به شکار انتخاب کنند.

ب- محاصره سخت: زمانی که طعمه انرژی‌اش را از دست بدهد شاهین‌ها حلقه محاصره را تنگ‌تر می‌کنند. موقعیت جدید شاهین‌ها از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$X(t+1) = X_{\text{rabbit}}(t) - E|\Delta X(t)| \quad (16)$$



شکل (۴): رفتار محاصره سخت [۲۲]
Figure (4): Hard besiege behavior [22]

زمانی که محاصره سخت است و شکار انرژی کافی برای فرار ندارد، شاهین‌ها سعی می‌کنند فاصله محل متوسط خود را با طعمه در حال فرار کاهش دهند. به‌روزرسانی موقعیت جدید شاهین‌ها در این حالت از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (17)$$

$$Y = X_{\text{rabbit}}(t) - E \cdot |X_{\text{rabbit}}(t) - X_m(t)| \quad (18)$$

$$Z = Y + S \cdot LF(D) \quad (19)$$

۴- طراحی مسیر حرکت ربات متحرک با ترکیب روش میدان پتانسیل مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی شاهین

به‌منظور بهینه نمودن طول مسیر حرکت ربات متحرک، بازده مسیر، زمان همگرایی و فرار از تله حداقل محلی الگوریتم شاهین هریس با الگوریتم میدان پتانسیل پایه ترکیب می‌شود. برای بهینه‌نمودن تابع هدف (طول مسیر ربات برای رسیدن به نقطه هدف) بایستی ضرایب معادلات نیروی جذب‌کننده و دفع‌کننده، گام حل و فاصله ایمنی ربات از مانع بهینه گردند. این ضرایب به ترتیب برابر با ضریب جذب‌کننده (k_a)، ضریب دفع‌کننده مانع (k_r)، گام حل (η) و پارامتر فاصله ایمنی ربات از مانع (ρ_0) هستند.

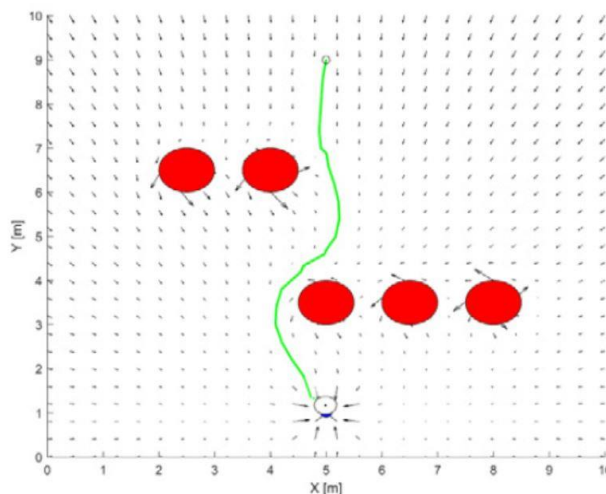
در این مقاله برای شبیه‌سازی از محیط مبنا معرفی شده در مرجع [۲۱] (ترکیب روش محاسبات غشایی و میدان پتانسیل مصنوعی پایه) استفاده خواهد شد. این مبنا در جدول (۱) آمده است. همچنین نتیجه مسیریابی ترکیب میدان پتانسیل مصنوعی پایه و شاهین نیز با این مرجع و همچنین با ترکیب روش میدان پتانسیل مصنوعی و الگوریتم ژنتیک مقایسه خواهد شد.

Table (1): Base (benchmark) environment for robot path planning

جدول (۱): محیط مبنا برای مسیریابی ربات

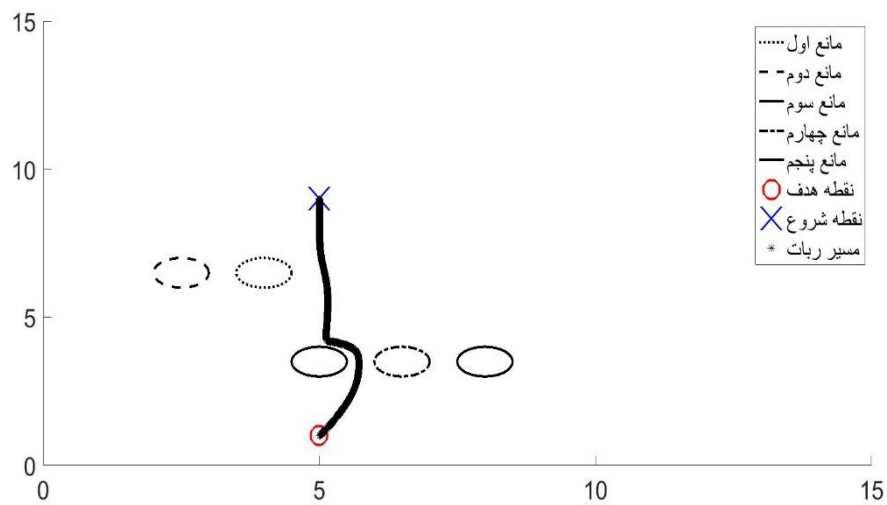
موانع (x,y,r)	نقطه هدف (x,y)	نقطه شروع (x,y)	محیط
(۸ و ۳/۵ و ۰/۵), (۶/۵ و ۳/۵ و ۰/۵), (۵ و ۳/۵ و ۰/۵), (۲/۵ و ۶/۵ و ۰/۵), (۴ و ۶/۵ و ۰/۵)	(۵ و ۱)	(۵ و ۹)	مبنا

شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) به ترتیب مسیریابی ربات با استفاده از ترکیب روش محاسبات غشایی و میدان پتانسیل مصنوعی پایه [۲۱]، ترکیب روش شاهین و میدان پتانسیل مصنوعی پایه و ترکیب روش ژنتیک با میدان پتانسیل مصنوعی پایه در این محیط مبنا را نشان می‌دهند.

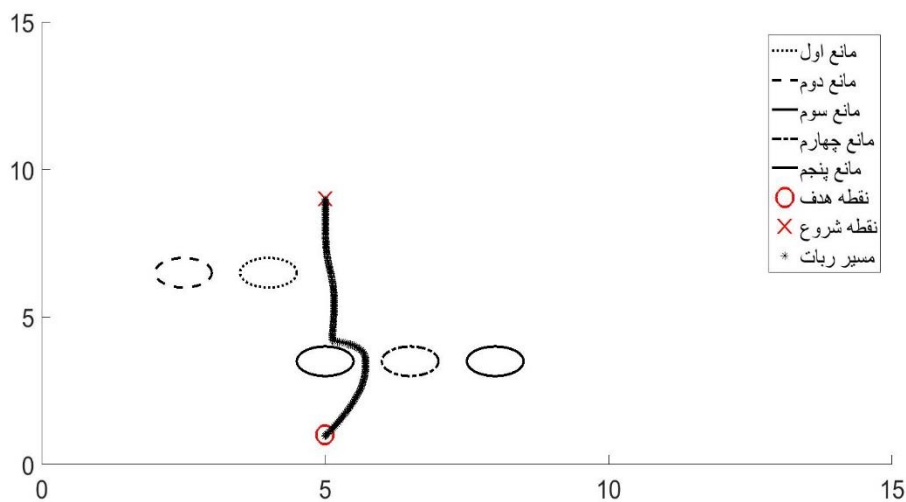


شکل (۵): مسیریابی بهینه ربات با استفاده از روش مرجع [۲۱]

Figure (5): Robot path planning using reference method [21]



شکل (۶): مسیریابی بهینه ربات در روش میدان پتانسیل مصنوعی با استفاده از الگوریتم شاهین
Figure (6): Optimal robot path planning in the artificial potential field method using Harris Hawks algorithm



شکل (۷): مسیریابی ربات در روش میدان پتانسیل مصنوعی با استفاده از الگوریتم ژنتیک
Figure (7): Robot path planning in the artificial potential field method using Genetic algorithm

نتایج مسیریابی (طول مسیر) ربات‌های مستقل با ترکیب الگوریتم جدید و فراابتکاری شاهین هریس با روش میدان پتانسیل مصنوعی و همچنین مقایسه آن با ترکیب ژنتیک بر حسب متر در جدول (۲) آمده است:

Table (2): Comparison of path length in Harris Hawks, Genetic and reference algorithm in base (benchmark) environment

جدول (۲): مقایسه طول مسیر الگوریتم شاهین، ژنتیک و روش مرجع در محیط مبنا

محیط	طول مسیر با ترکیب الگوریتم شاهین و روش محاسبات غشایی	طول مسیر با ترکیب الگوریتم شاهین و روش میدان پتانسیل مصنوعی	طول مسیر با ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش میدان پتانسیل مصنوعی
مبنا	۸/۵۷	۸/۴۱	۸/۷۳

همانگونه که مشاهده می‌شود طول مسیر در محیط مبنا نسبت به الگوریتم معروف ژنتیک و محاسبات غشایی بهینه شده است. در این جا پارامتری به نام بازده مسیریابی تعریف می‌شود که برابر حاصل تقسیم طول خط مستقیم میان نقطه شروع و هدف بر طول مسیر (بدست آمده با الگوریتم) می‌باشد [۲۳].

$$\text{بازده مسیریابی} = \frac{\text{طول خط مستقیم بین نقطه شروع و هدف}}{\text{طول مسیر}} \quad (22)$$

در جدول (۳) بازده مسیریابی سه روش با یکدیگر مقایسه شده اند که بازده مسیریابی رویکرد پیشنهادی بیشتر است. این ترکیب الگوریتم‌ها توانسته است علاوه بر بهینه نمودن طول مسیر، از تله حداقل محلی نیز عبور کند. مقادیر بهینه ضرایب در جدول (۴) آمده است.

Table (3): Comparison of Path Planning Efficiency in Harris Hawks, Genetic and reference algorithm in base (benchmark) environment

جدول (۳): مقایسه بازده مسیریابی الگوریتم شاهین، ژنتیک و روش مرجع در محیط مبنا

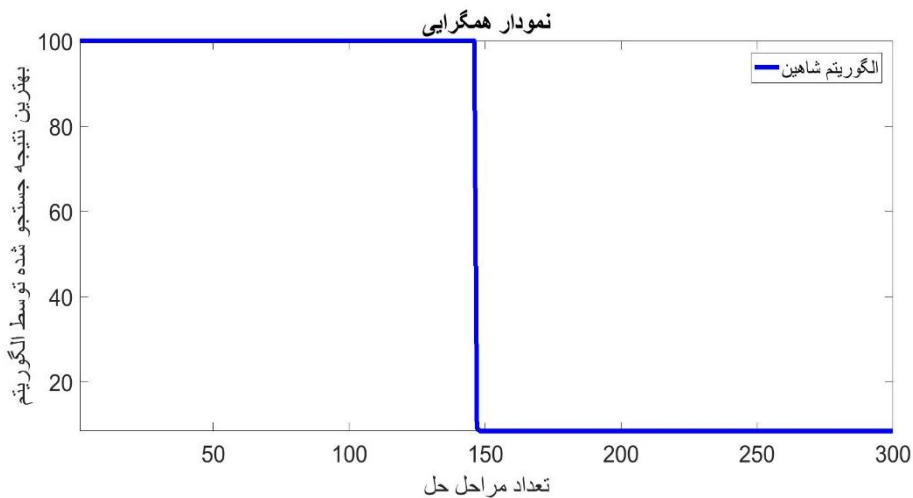
بازده مسیریابی ترکیب الگوریتم محاسبات غشایی و میدان پتانسیل مصنوعی	بازده مسیریابی ترکیب الگوریتم ژنتیک و میدان پتانسیل مصنوعی	بازده مسیریابی ترکیب الگوریتم شاهین و میدان پتانسیل مصنوعی	محیط مبنا
۰/۹۳۳	۰/۹۱۶	۰/۹۵۱	مبنا

Table (4): Optimal coefficients value of the artificial potential field algorithm

جدول (۴): مقادیر بهینه ضرایب الگوریتم میدان پتانسیل مصنوعی

محیط مبنا	ضریب جذب (k_a)	ضریب دفع (k_r)	گام حل (t)	فاصله ایمنی ربات و موانع (P_0)
مبنا	۹/۵۳	۳/۷۵	۰/۰۱۱	۰/۷

همچنین نمودار همگرایی محیط مبنا در ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی شاهین و روش میدان پتانسیل مصنوعی در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل (۸) مشاهده می‌شود، الگوریتم شاهین دارای همگرایی سریع در محیط مبنا نسبت به روش مرجع معرفی شده و الگوریتم ژنتیک است. زمان همگرایی زمانی است که الگوریتم به مقدار بهینه خود در حین حل مسئله می‌رسد. در جدول (۵) مقایسه زمان همگرایی بر حسب ثانیه در محیط مبنا نشان می‌دهد. طراحی مسیر ربات در سه محیط دیگر نیز بررسی شده که مختصات این سه محیط در جدول (۶) آورده شده است. مسیریابی ترکیب الگوریتم شاهین و روش میدان پتانسیل مصنوعی در سه محیط معرفی شده در جدول ۶ در شکل ۹ نشان داده است. طول مسیر و بازده مسیریابی مربوط به این سه محیط در جدول (۷) نشان داده شده است.



شکل (۸): نمودار همگرایی محیط مبنا

Figure (8): Convergence curve of base environment

Table (5): Comparison of Convergence Time in Harris Hawks, Genetic and reference algorithm in base (benchmark) environment in seconds

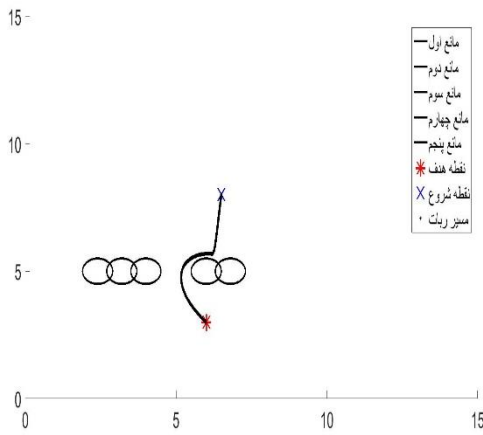
جدول (۵): مقایسه زمان همگرایی الگوریتم شاهین، ژنتیک و روش مرجع در محیط مبنا

محیط	زمان همگرایی ترکیب الگوریتم شاهین و میدان پتانسیل مصنوعی	زمان همگرایی ترکیب الگوریتم ژنتیک و میدان پتانسیل مصنوعی	زمان همگرایی ترکیب الگوریتم محاسبات غشایی و میدان پتانسیل مصنوعی
مبنا	۴۹۱/۰۹ ثانیه	۴۹۴/۰۴ ثانیه	۴۹۵/۰۱ ثانیه

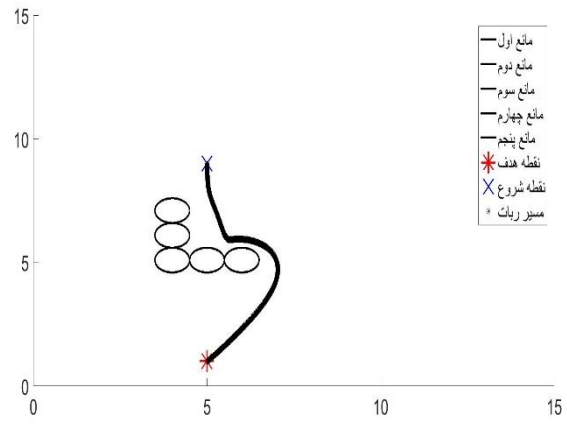
Table (6): Extra environments for robot path planning

جدول (۶): محیط‌های اضافی برای مسیریابی ربات

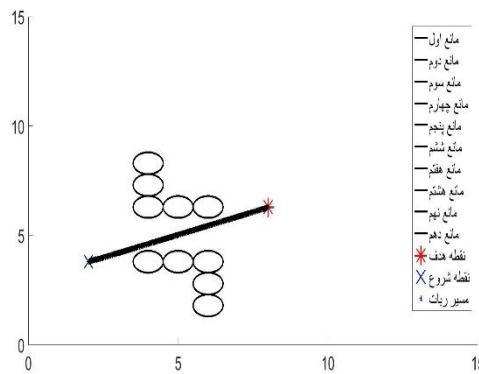
محیط	نقطه شروع (x,y)	نقطه هدف (x,y)	موانع (x,y,z)
۱	(۶/۵ و ۸)	(۶ و ۳)	(۶/۸ و ۵ و ۰/۵), (۲/۴ و ۵ و ۰/۵), (۳/۲ و ۵ و ۰/۵), (۴ و ۵ و ۰/۵), (۶ و ۵ و ۰/۵)
۲	(۵ و ۹)	(۵ و ۱)	(۴ و ۷/۱ و ۰/۵), (۴ و ۶/۱ و ۰/۵), (۶ و ۵/۱ و ۰/۵), (۵ و ۵/۱ و ۰/۵), (۴ و ۵/۱ و ۰/۵)
۳	(۲ و ۳/۸)	(۸ و ۶/۳)	(۶ و ۱/۸ و ۰/۵), (۶ و ۲/۸ و ۰/۵), (۶ و ۳/۸ و ۰/۵), (۵ و ۳/۸ و ۰/۵), (۴ و ۳/۸ و ۰/۵) (۴ و ۸/۳ و ۰/۵), (۴ و ۷/۳ و ۰/۵), (۴ و ۶/۳ و ۰/۵), (۵ و ۶/۳ و ۰/۵), (۶ و ۶/۳ و ۰/۵)



ب: محیط ۲



الف: محیط ۱



ج- محیط ۳

شکل (۹): مسیریابی ربات در روش میدان پتانسیل مصنوعی با استفاده از الگوریتم شاهین در سه محیط اضافی

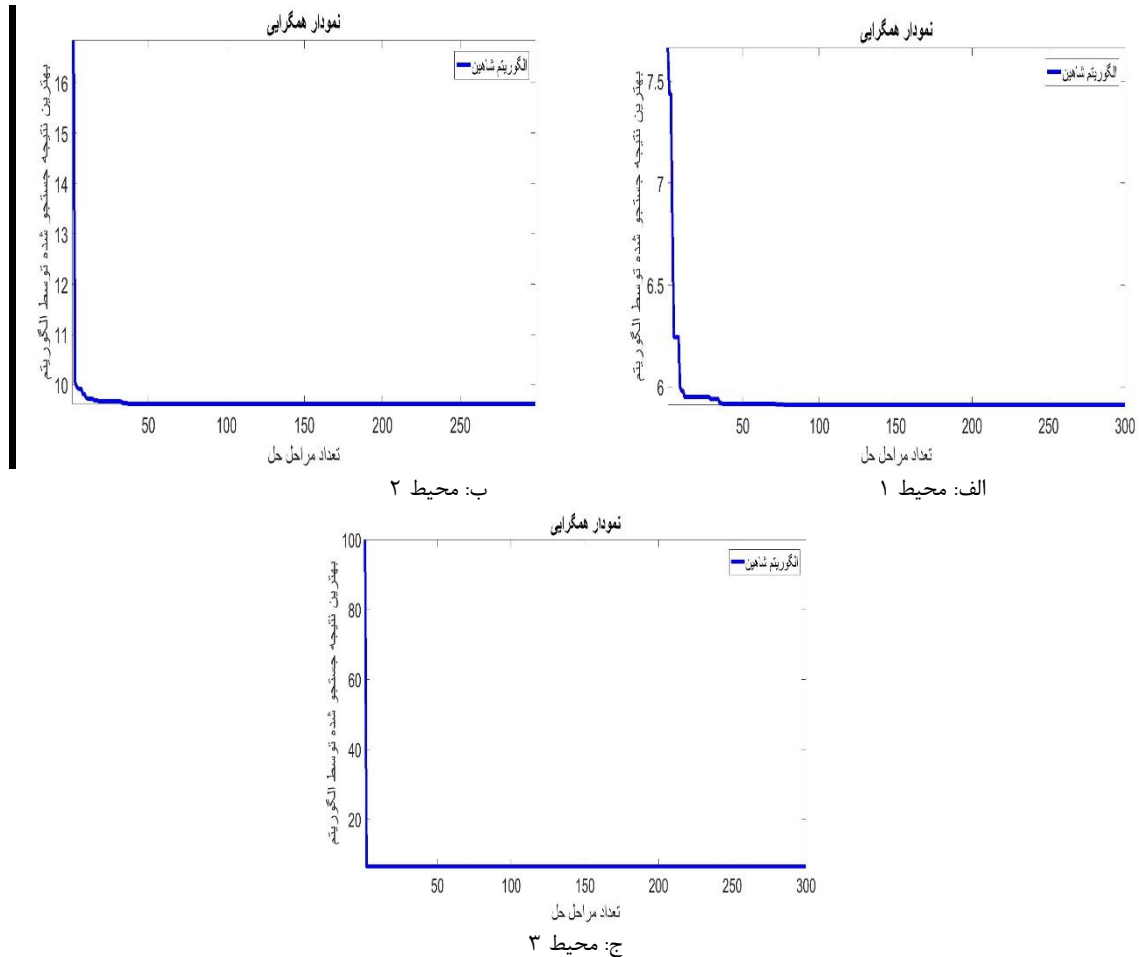
Figure (9): Optimal robot path planning in the artificial potential field method using Harris Hawks algorithm in three extra environments

Table (7): Path length and path Efficiency in three different environments

جدول (۷): طول مسیر و بازده مسیریابی در سه محیط مختلف

محیط	طول مسیر (متر)	بازده مسیریابی
۱	۵/۹۱	۰/۸۵
۲	۹/۶۱	۰/۸۴
۳	۶/۵	۱

نمودارهای همگرایی این سه محیط در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها پیداست، الگوریتم شاهین روشی با همگرایی سریع است. همچنین نتایج مربوط به بازده مسیریابی و زمان همگرایی در این سه محیط در جدول (۸) آورده شده است.



شکل (۱۰): نمودار همگرایی سه محیط

Figure (10): Convergence Curve of three extra Environments

Table (8): Comparison of convergence time in three different environments

جدول (۸): زمان همگرایی سه محیط مختلف

محیط	زمان همگرایی (بر حسب ثانیه)
۱	۶۴۸/۵۸
۲	۲۳۶۷/۸۲
۳	۲۶۸۹/۱۵

۵- نتیجه‌گیری

طراحی مسیر ربات‌های متحرک یکی از موضوعات تحقیقاتی فعال در زمینه علم رباتیک است. روش میدان پتانسیل مصنوعی یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین روش در طراحی مسیر ربات‌های هوشمند است. در این مقاله از ترکیب روش میدان پتانسیل مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی شاهین به منظور رفع مشکل حداقل‌های محلی و هم‌چنین بهینه‌نمودن طول مسیر حرکت و از طرف دیگر کاهش زمان همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده است. به منظور بررسی عملکرد رویکرد پیشنهادی، مساله بیان شده در مرجع [۲۱]، با سه روش محاسبات غشایی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شاهین شبیه‌سازی و

مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که علاوه بر حل مشکلات نوسان نمودن در نقطه هدف و فرار از تله حداقل محلی، طول مسیر حرکت و بازده مسیریابی نسبت به مرجع [۲۱] حدود دو درصد و نسبت به الگوریتم ژنتیک حدود چهار درصد بهبود داشته است. همچنین زمان همگرایی نسبت به مرجع [۲۱] حدود یک درصد و نسبت به الگوریتم ژنتیک حدود دو درصد کاهش یافته است.

References

مراجع

- [1] J. Han, Y. Seo, "Mobile robot path planning with surrounding point set and path improvement", *Applied Soft Computing*, vol. 57, pp. 35–47, Aug. 2017 (doi: 10.1016/j.asoc.2017.03.035).
- [2] A. Hidalgo-Paniagua, M.A. Vega-Rodríguez, J. Ferruz, "Applying the MOVNS (multi-objective variable neighborhood search) algorithm to solve the path planning problem in mobile robotics", *Expert Systems with Applications*, vol. 58, pp. 20–35, Oct. 2016 (doi: 10.1016/j.eswa.2016.03.035).
- [3] E. Abbas-Nejad, A. Harifi, "Design of a sliding mode controller for two-wheeled balancing robot", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 5, no. 19, pp. 45-54, Autumn 2014 (in Persian).
- [4] P. K. Das, P.K. Jena, "Multi-robot path planning using improved particle swarm optimization algorithm through novel evolutionary operators", *Applied Soft Computing*, vol. 92, pp.1-24, Jul. 2020 (doi: 10.1016/j.asoc.2020.106312).
- [5] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, MO, USA, 1985, pp. 500-505, 1985 (doi: 10.1109/ROBOT.1985.1087247).
- [6] B. Kovacs, "Path planning of autonomous service robots", PhD thesis, Budapest university of engineering and technology, 2017.
- [7] K.N. McGuire, G.C.H.E. de Croon, K. Tuyls, "A comparative study of bug algorithms for robot navigation", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 121, Nov. 2019 (doi:10.1016/j.robot.2019.103261).
- [8] S. Gorji, S. Zamanian, M. Moazzami, "Techno-economic and environmental base approach for optimal energy management of microgrids using crow search algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 11, no. 43, pp. 49-68, Autumn 2020 (in Persian).
- [9] A. Najar-Khoda-Bakhsh, M. Moradian, L. Najar-Khodabakhsh, N. Abjadi, "Stabilization of electromagnetic suspension system behavior by genetic algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 3, no. 11, pp. 53-61, Summer 2013 (in Persian).
- [10] Y. Gheraibia, A. Moussaoui, "Penguins search optimization algorithm (PeSOA)", In: M. Ali, T. Bosse, K. V. Hindriks, M. Hoogendoorn, C. M. Jonker, J. Treur (eds) *Recent Trends in Applied Artificial Intelligence. IEA/AIE 2013. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7906. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013 (doi: 10.1007/978-3-642-38577-3_23).
- [11] S. A. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Lewis, "Grey wolf optimizer", *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, March 2014 (doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007).
- [12] S. Saremi, S. A. Mirjalili, A. Lewis, "Grasshopper optimisation algorithm: Theory and application", *Advances in Engineering Software*, vol. 105, pp. 30-47, Mar. 2017 (doi: 10.1016/j.advengsoft.2017.01.004).
- [13] B. Zolghadr-Asli, O. Bozorg-Haddad, X. Chu, "Crow search algorithm (CSA)". In: O. Bozorg-Haddad (eds) *Advanced Optimization by Nature-Inspired Algorithms. Studies in Computational Intelligence*, vol. 720. Springer, Singapore, 2018 (doi: 10.1007/978-981-10-5221-7_14).
- [14] S. Binitha, S. S. Sathya, "A Survey of bio inspired optimization algorithms", *International Journal of Soft Computing and Engineering*, vol. 2, pp. 137–151, May 2012.
- [15] W. Zhang, X. Gong, G. Han, Y. Zhao, "An improved ant colony algorithm for path planning in one scenic area with many spots", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 13260-13269, 2017 (doi: 10.1109/ACCESS.2017.2723892).
- [16] M. A. Porta Garcia, O. Montiel, O. Castillo, R. Sepúlveda, P. Melin, "Path planning for autonomous mobile robot navigation with ant colony optimization and fuzzy cost function evaluation", *Applied Soft Computing*, vol. 9, pp. 1102–1110, Jun. 2009 (doi: 10.1016/j.asoc.2009.02.014).
- [17] R. Shakiba, M. Najafipour, M. E. Salehi, "An improved PSO-based path planning algorithm for humanoid soccer playing robots", *Proceeding of the IEEE/RIOS*, pp. 1-6, Tehran, Iran, April 2013 (doi: 10.1109/RIOS.2013.6595312).
- [18] V. Roberge, M. Tarbouchi, G. Labonte, "Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning", *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 132-141, Feb. 2013 (doi: 10.1109/TII.2012.2198665).

- [19] L. Amador-Angulo, O. Mendoza, J. R. Castro, A. Rodriguez-Diaz, P. Melin, O. Castillo, "Fuzzy sets in dynamic adaptation of parameters of a bee colony optimization for controlling the trajectory of an autonomous mobile robot", *Sensors*, vol. 16, no. 9, pp. 1–27, Sep. 2016 (doi: /doi.org/10.3390/s16091458).
- [20] L. Amador-Angulo, O. Castillo, J. R. Castro, "A generalized type-2 fuzzy logic system for the dynamic adaptation the parameters in a bee colony optimization algorithm applied in an autonomous mobile robot control", *Proceeding of the IEEE/FUZZ*, pp. 537-544, Vancouver, BC, Canada, July 2016 (doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2016.7737733).
- [21] U. Orozco-Rosas, O. Montiel, R. Sepúlveda. "Mobile robot path planning using membrane evolutionary artificial potential field", *Applied Soft Computing*, vol. 77, pp. 236-251 , Apr. 2019 (10.1016/j.asoc.2019.0-1.036).
- [22] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, H. Chen, "Harris hawks optimization: Algorithm and applications", *Future Generation Computer Systems*, vol. 97 , pp. 849-872, Aug. 2019 (doi: 10.1016/j.future.2019.02.028).
- [23] Z. Zhou, J. Wang, Z. Zhu, D. Yang, J. Wu, "Tangent navigated robot path planning strategy using particle swarm optimized artificial potential field", *Optik*, vol. 158, pp. 639-651, Apr. 2018 (doi: 10.1016/j.ijleo.2017.12.169).

زیر نویس‌ها:

1. Road Map
2. Cell Decomposition
3. Artificial Potential Field (APF)
4. Voronoi-Diagram
5. O. Khatib
6. Local Minimum Problems
7. BUG Algorithms
8. Evolutionary Artificial Potential Field(EAPF)
9. Cost Function
10. Convergence Time
11. Optimization Algorithms
12. Metaheuristic Algorithms
13. Penguins Search Optimization Algorithm (PeSOA)
14. Grey Wolf Optimization Algorithm (GWO)
15. Grasshopper Optimization Algorithm (GOA)
16. Crow Search Optimization Algorithm (CSA)
17. Air and Water Optimization Algorithm (AWO)
18. Ant Colony Optimization (ACO)
19. Particle Swarm Optimization (PSO)
20. Bee Colony Optimization (BCO)
21. Membrane Computing
22. Harris Hawks Optimization Algorithm (HHO)