



# Improving Multi-Robot Path Planning by Adaptive Artificial Potential Fields

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Haghbeigi M.<sup>1</sup>,  
Khanmirza E.<sup>1\*</sup>,  
Davaie Markazi A.H.<sup>1</sup>,

### How to cite this article

Haghbeigi M, Khanmirza E, Davaie Markazi AH, Improving Multi-Robot Path Planning by Adaptive Artificial Potential Fields. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(07):455-466.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran.  
khanmirza@iust.ac.ir

### Article History

Received: November 5, 2024  
Accepted: July 10, 2024  
ePublished: October 15, 2024

## ABSTRACT

The Artificial Potential Fields approach is amongst the widely used path planning methods in continuous environments. However, the implementation of it in multi-robot path planning encounters challenges such as the local-minima and an increase in traffic probability with the rise in the number of robots. The purpose of the proposed method is to improve multi-robot path planning in complex environments. A new adaptive potential function is introduced that reduces the probability of the robots entering an area at the same time and thus reducing the probability of traffic. Also, new potential functions have been proposed that lead to smoother paths with less traverse time when the robot encounters obstacles. In these functions, in addition to the position of robots and obstacles, heading of the robot and the position of the target are also considered. In order to evaluate this method, a distributed software architecture has been designed and implemented in the framework of the robot operating system. In this architecture, as robots move, new robots can join the operation or new tasks can be assigned to robots. Two series of real-time simulations are carried out in the Gazebo environment. The results show that the use of the proposed potential functions leads to a decrease in the convergence of the robots. In the simulation done for 2 robots, proposed method has resulted in a 35% reduction in the traversal time. While in case of 15 robots in the same map, a 50% reduction in the traversal time has been achieved.

**Keywords** Path Planning, Multi-Robot Systems, Artificial Potential Fields, Autonomous Mobile Robots, Distributed Architecture

## CITATION LINKS

1- Contribution to the path planning of a .... 2- Multi-robot path planning based on .... 3- Path Planning. 4- Cloud-based multi-robot path planning in complex and .... 5- Survey of advances in guidance, navigation, and control of .... 6- A comparative study of deterministic and .... 7- Path Design and Control of a Moving Social Robot in an Environment with .... 8- Aerial Robotics in Urban Environments: Optimized .... 9- Aircraft Trajectory Planning with an Altitude-Bound in .... 10- Collision-free navigation and control for autonomous vehicle in .... 11- Humanoid robot path planning with .... 12- Zero reaction path planning for mobile robot arms. 13- Real-time obstacle avoidance for .... 14- Artificial potential field based path planning for mobile robots using a .... 15- Efficient local path planning algorithm using .... 16- Local-Minimum-Free Artificial Potential Field Method for .... 17- Improved artificial potential field method for mobile robot path planning. 18- Ddm: Fast near-optimal multi-robot path planning using diversified-path and .... 19- Dynamic node allocation-based multirobot path planning. 20- Multi-robot path planning using an .... 21- Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding. 22- Dynamic prioritization for conflict-free path planning of .... 23- Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses. 24- Coordination of multi-robot path planning for warehouse application using .... 25- Multi-robot path deconfliction through prioritization by .... 26- Coordination of multi-robot path planning for warehouse application using .... 27- A systematic literature review of A\* pathfinding. 28- Subdimensional expansion for multirobot path planning. 29- Finding optimal solutions to .... 30- Enhanced partial expansion A. 31- Towards optimal cooperative path planning in hard setups through .... 32- A general formal framework for pathfinding problems with .... 33- The increasing cost tree search for .... 34- M\*: A complete multirobot path planning algorithm with .... 35- Efficient and complete centralized .... 36- Push and rotate: cooperative multi-agent path planning. 37- Distributed path planning of a multi-robot system based on .... 38- Multi-Robot Motion Planning: A Learning-Based ....

## بهبود طراحی مسیر جمعی ربات ها به روش میدان های پتانسیل مصنوعی تطبیقی

مرتضی حق بیگی<sup>۱</sup>، اسماعیل خان میرزا<sup>۱\*</sup>، امیرحسین دوائی مرکزی<sup>۱</sup>  
<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

میدان های پتانسیل مصنوعی یکی از روش های پرکاربرد در طراحی مسیر پیوسته است. اما، کاربرد این روش در طراحی مسیر جمعی با چالش هایی مواجه است که می توان به مساله نقاط کمینه محلی و نیز ایجاد ترافیک در صورت افزایش تعداد ربات ها اشاره کرد. هدف از روش پیشنهادی در این مقاله، بهبود طراحی مسیر جمعی در محیط های پیچیده و با حضور تعداد متغیری ربات است. یک تابع پتانسیل تطبیقی جدید معرفی شده است که احتمال همگرایی و ورود هم زمان ربات ها به یک ناحیه و در نتیجه احتمال ایجاد ترافیک و نقاط کمینه محلی را کاهش می دهد. همچنین، توابع پتانسیل جدیدی پیشنهاد شده است که منجر به مسیرهای هموارتر با زمان پیمایش کمتر، در مواجهه ربات با موانع می شود. در این توابع، علاوه بر موقعیت ربات ها و موانع، جهت حرکت ربات ها و موقعیت هدف نیز در نظر گرفته شده است. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، یک معماری نرم افزاری هیبریدی طراحی و در بستر سیستم عامل رباتی پیاده سازی شده است که در آن امکان پیوستن ربات های جدید و یا تعریف هدف جدید، هم زمان با حرکت دیگر ربات ها وجود دارد. نتایج نشان می دهد که استفاده از توابع پتانسیل پیشنهادی منجر به کاهش همگرایی ربات ها و در نتیجه کاهش زمان پیمایش مسیرها می شود. در شبیه سازی صورت گرفته برای ۲ ربات، استفاده از توابع تطبیقی توسعه داده شده منجر به کاهش ۳۵ درصدی در زمان پیمایش مسیرها شده است. درحالی که در طراحی مسیر برای ۱۵ ربات در نقشه یکسان، کاهش ۵۰ درصدی در زمان پیمایش مسیرها حاصل شده است.

**کلیدواژه ها:** طراحی مسیر، سامانه چندرباتی، میدان پتانسیل مصنوعی، ربات خودکار، معماری هیبریدی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴

\* نویسنده مسئول: khammirza@iust.ac.ir

### ۱- مقدمه

امروزه مزیت های ارائه شده توسط سامانه های چندرباتی باعث افزایش فزاینده اهمیت و کاربرد آن ها در انجام عملیات خودکار مختلف شده است. با تقسیم وظایف کاری در این سامانه ها، امکان انجام هم زمان وظایف در زمان عملیاتی کمتر فراهم شده است [1,2]. یکی از چالش های اصلی در پیاده سازی این سامانه ها و افزایش کارایی آن ها، طراحی توابع هدایت و ناوبری جمعی و برخط است. توابع طراحی مسیر خودکار، با استفاده از اطلاعات ناوبری و نقشه از پیش تهیه شده و یا ایجاد شده به صورت برخط توسط حسگرها، مسیرهای بهینه بدون برخورد از موقعیت اولیه تا موقعیت هدف را طراحی می کنند [3-5]. شاخص های متداول در مساله طراحی مسیر انفرادی شامل طول مسیر، همواری مسیر، زمان پیمایش و انرژی مصرفی می شود [6].

طراحی مسیر یکی از بخش های اصلی هدایت در تمامی سیستم های رباتیکی خودکار مانند ربات های زمینی [7]، هوایی [8,9]، خودروهای هوشمند [10]، ربات های انسان نما [11] و بازوهای رباتیکی [12] است. روش های متنوعی برای مساله طراحی مسیر انفرادی توسعه داده شده است. یکی از این روش ها که به دلیل عدم پیچیدگی محاسباتی و امکان پیاده سازی برخط، کاربرد زیادی یافته روش میدان پتانسیل مصنوعی (APF) [13] است. در این روش، ربات مانند ذره ای تحت تاثیر میدان های جاذب منشعب از اهداف و میدان های دافع حاصل از موانع حرکت می کند. یکی از چالش های روش میدان های پتانسیل مصنوعی، مواجهه ربات با نقاط کمینه محلی است. روش هایی نظیر ایجاد موانع مجازی در نقشه [14,15]، تحلیل بردار نیرو [16]، افزودن میدان های نیروی جدید [17]، و در نهایت ترکیب با روش های طراحی دیگر به منظور مواجهه با مساله کمینه محلی پیشنهاد شده اند.

طراحی مسیر جمعی عبارت است از طراحی مسیرهای بهینه از موقعیت های ابتدایی به موقعیت های هدف برای تعدادی از ربات ها، به صورتی که پیمایش هم زمان و بدون برخورد مسیرها ممکن باشد [2,18]. این مساله می تواند شامل یک تابع هزینه سراسری مانند زمان جریان (Flowtime)، یعنی مجموع زمان پیمایش مسیرها، یا زمان اتمام (Makespan)، یعنی زمان رسیدن آخرین ربات به هدف باشد [19-21]. در مقایسه با طراحی مسیر انفرادی، حالت جمعی با چالش های بیشتری مواجه است. از آنجایی که تأخیر در طراحی مسیر می تواند منجر به ایجاد ترافیک شود، زمان طراحی با محدودیت بیشتری مواجه است [4]. همچنین افزایش تعداد ربات ها، منجر به افزایش نمایی فضای پیکربندی مشترک می شود که چالش جدی در استفاده از روش های بهینه سازی سراسری است [22].

روش های طراحی مسیر جمعی را با توجه به نحوه دریافت اهداف می توان به دو صورت تک گام (One-shot) و پویا تعریف کرد. در بیشتر روش های ارائه شده، مساله طراحی مسیر جمعی در قالب مساله تک گام تعریف شده که در آن پیکربندی ابتدایی و پایانی از پیش تعریف شده و تا انتهای عملیات تنها یک هدف به هر ربات اختصاص پیدا می کند [23]. در حالی که بیشتر کاربردهای واقعی نظیر انبارداری خودکار، در قالب پویا قابل تعریف هستند. زیرا که امکان تغییر تعداد ربات ها وجود داشته و پس از به انجام رساندن وظایف فعلی، وظایف جدیدی به صورت پیوسته به ربات ها اختصاص می یابد.

با توجه به معماری نرم افزاری، روش های طراحی مسیر جمعی را می توان به سه دسته مرکزی، توزیع شده و ترکیبی تقسیم کرد. در معماری مرکزی، تمام اطلاعات ضروری سامانه توسط یک ناظر جمع آوری شده و طراحی مسیر برای تمامی ربات ها انجام می شود [24,25]. در این معماری، امکان محاسبه مسیرهای بهینه وجود دارد؛ اما پیچیدگی مساله با افزایش تعداد ربات ها افزایش می یابد.

می‌گیرد. همچنین، معماری توزیع شده و هزینه محاسباتی پایین این الگوریتم‌ها، امکان پیاده‌سازی آن‌ها در عملیات برخط را فراهم می‌کند. همانطور که اشاره شد، روش‌های مبتنی بر میدان‌های پتانسیل مصنوعی یکی از روش‌های پرکاربرد محلی هستند که کاربرد گسترده‌ای در طراحی مسیر انفرادی یافته‌اند، اما کاربرد آن‌ها در سیستم‌های چند رباتی با چالش‌هایی مواجه است و تحقیقات کمی در این زمینه صورت گرفته است. یکی از این چالش‌ها، هماهنگی سطح پایین ربات‌ها در طراحی مسیرها است که در شرایط وجود تعداد زیادی ربات نسبت به مساحت محیط عملیات، می‌تواند منجر به ترافیک ربات‌ها در یک منطقه شود. در سال ۲۰۱۹ یک معماری توزیع شده برای طراحی مسیر جمعی ربات‌ها بر پایه روش میدان‌های پتانسیل مصنوعی پیشنهاد شده که تعریف ناحیه همسایگی و تنظیم اولویت را برای هماهنگی حرکت میان ربات‌ها پیشنهاد کرده است<sup>[37]</sup>. اما این روش تنها در مواجهه تعداد کمی ربات قابل کاربرد است و در صورت افزایش ربات‌ها در یک محیط، احتمال ایجاد ترافیک و افزایش زمان اتمام عملیات افزایش پیدا می‌کند. یک روش مشابه تحت معماری مرکزی نیز در سال ۲۰۲۰ پیشنهاد شده است که در آن تنظیم اولویت‌ها و پیش‌بینی برخورد توسط یک ناظر مرکزی صورت می‌گیرد<sup>[1]</sup>. اما این روش نیز از همگرایی ربات‌ها به یک منطقه و ایجاد ترافیک در آن پیشگیری نمی‌کند. از دیگر راهکارهای پیشنهادی برای افزایش توانایی روش APF، ترکیب آن با روش‌های محاسبات نرم و هوشمند می‌باشد. برای مثال، ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۲۳ از یادگیری تقویتی عمیق جهت تنظیم پارامترهای روش میدان پتانسیل استفاده کرده‌اند<sup>[38]</sup>. همچنین در سال ۲۰۲۰، به منظور تنظیم بهتر سرعت ربات‌ها، ترکیب روش APF با روش فازی پیشنهاد شده است. با اینکه این روش‌ها توانایی طراحی مسیر جمعی برای تعداد محدودی از ربات‌ها را افزایش می‌دهند، اما با افزایش تعداد ربات‌ها پیچیدگی محاسباتی آن‌ها افزایش پیدا می‌کند.

هدف از این مقاله، ارائه یک روش طراحی مسیر جمعی برخط برای ربات‌ها در محیط پیوسته و در کاربردهایی است که جریان پیوسته‌ای از وظایف عملیاتی وجود دارد. الگوریتم پیشنهادی با توسعه روش میدان‌های پتانسیل مصنوعی، امکان عملیات هم-زمان تعداد بیشتری از ربات‌ها در محیط مشترک و در زمان عملیاتی کمتر را فراهم می‌کند. به منظور بهبود مسیر ربات در مواجهه با موانع و دیگر ربات‌های متحرک، میدان‌های پتانسیل تطبیقی پیشنهاد شده است که مسیرهای هموارتری را نتیجه می‌دهد. به منظور پیشگیری حداکثری از ورود همزمان و غیر ضروری ربات‌ها به یک ناحیه، میدان پتانسیل افزوده پیشنهاد شده است. در نتیجه این میدان پتانسیل، از همگرایی ربات‌ها اجتناب شده و ربات‌ها از فضای بیشتری از محیط عملیات برای حرکت خود استفاده می‌کنند. نتایج مقایسه درساربیوهای شبیه‌سازی برخط،

در معماری توزیع شده، طراحی مسیر توسط هر ربات و با توجه به اطلاعات محلی انجام می‌شود که منجر به کاهش هزینه محاسباتی و امکان پیاده‌سازی برخط می‌شود. اما پاسخ‌های محاسبه شده کامل نبوده و تضمینی برای بهینگی آن‌ها وجود ندارد<sup>[26]</sup>.

از دیدگاه الگوریتمی و نحوه مدل‌سازی محیط، روش‌های طراحی مسیر را می‌توان به دو دسته اصلی روش‌های سراسری بر پایه جستجوی گراف و روش‌های محلی و پیوسته تقسیم کرد. در دسته اول، ابتدا نقشه محیط به صورت یک گراف مدل شده و مساله طراحی مسیر به صورت جستجوی مسیر بهینه میان گره‌های گراف بازتعریف می‌شود. یکی از الگوریتم‌های پایه برای بسیاری از الگوریتم‌های طراحی مسیر انفرادی و جمعی مبتنی بر گراف، الگوریتم A\* است<sup>[27]</sup>. الگوریتم‌های طراحی مسیر جمعی بر پایه گراف را می‌توان در طیفی میان روش‌های کوپل شده و غیر کوپل شده بررسی کرد. در روش‌های کوپل شده، جستجوی مسیرهای بهینه در فضای جستجوی مشترک ربات‌ها صورت می‌گیرد. در نتیجه بهینگی و کامل بودن پاسخ‌ها قابل تضمین است<sup>[28]</sup>؛ اما هزینه محاسباتی بالا بوده و پیاده‌سازی برخط برای تعداد بالایی از ربات‌ها امکان ندارد. از مهمترین این روش‌ها می‌توان به تجزیه عملگر<sup>[29]</sup> و الگوریتم A\* با گسترش جزئی پیشرفته<sup>[30]</sup> اشاره کرد. همچنین روش دیگر، بازتعریف مساله کوپل شده به صورت مسائل برنامه‌ریزی خطی<sup>[30]</sup>، تصدیق‌پذیری دودویی<sup>[31]</sup> و یا برنامه‌نویسی مجموعه جواب است<sup>[32]</sup>. از طرف دیگر، در روش‌هایی با کوپلینگ متغیر، مسیر ربات‌ها به صورت مجزا طراحی شده و سپس در صورت وجود تعارض میان مسیرها، با استفاده از تکنیک‌هایی فضای جستجو به فضای پیکربندی مشترک ربات‌های برخورد کننده گسترش می‌یابد. از مهمترین این روش‌ها می‌توان به جستجوی درخت هزینه<sup>[33]</sup>، روش جستجوی مبتنی بر تعارض<sup>[21]</sup> و الگوریتم M\*<sup>[34]</sup> اشاره کرد. روش‌های مبتنی بر قانون مانند فشار و تعویض<sup>[35]</sup> و فشار و چرخش<sup>[36]</sup>، دسته‌ای از روش‌های غیرکوپل شده هستند که با توجه به یکسری قواعد از پیش تعیین شده، حرکت بعدی ربات‌ها را مشخص می‌کنند. اما تعداد محدودی ربات در یک زمان امکان حرکت دارند.

در بیشتر روش‌های مبتنی بر گراف، طراحی مسیر جمعی به صورت مساله تک‌گام در نظر گرفته شده و امکان تخصیص اهداف جدید هم‌زمان با عملیات ربات‌ها وجود ندارد. همچنین، دینامیک ربات و پویایی محیط در نظر گرفته نشده و زمان پیمایش میان گره‌های گراف ثابت و از پیش مشخص در نظر گرفته شده است. این موضوع کاربرد این دسته از روش‌ها در مسائل واقعی را با چالش مواجه می‌کند. محدودیت دیگر این روش‌ها، طراحی مسیر در فضای گسسته‌سازی شده است که استفاده از مساحت زیادی از محیط عملیات را ناممکن می‌سازد.

در روش‌های محلی برخلاف روش‌های مبتنی بر گراف، دینامیک ربات‌ها در نظر گرفته شده و طراحی مسیر در محیط پیوسته صورت

فاصله و بردار موقعیت ربات نسبت به مانع است. دو پارامتر ثابت  $C_o$  و  $\rho_j^p$  نیز به ترتیب ضریب ثابت و شعاع مجاورت مانع هستند.

$$FO_{i,j}^b = C_o \left( \frac{1}{d(r_i, o_j)} - \frac{1}{\rho_j^p} \right)^2 \frac{1}{d(r_i, o_j)} K. \quad (2)$$

$$K = \begin{cases} D(o_j, r_i) & \text{if } d(r_i, o_j) \leq \rho_j^p \\ 0 & \text{if } d(r_i, o_j) > \rho_j^p \end{cases}$$

با ورود مانع به دایره مجاورت و نزدیک‌تر شدن ربات، مقدار این نیرو به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. یکی از ضعف‌های این مدل در مواردی است که مانع در بین ربات و هدف قرار گرفته و زاویه میان جهت ربات و بردار موقعیت نسبی هدف دارای اندازه کوچکی باشد. در این موارد، ربات تغییرات ناگهانی در اندازه جهت سرعت خواهد داشت و در نتیجه مسیر ربات ناهموار خواهد بود. برای مواجهه با این چالش، میدان نیروی حاصل از مانع به صورت تطبیقی بر اساس زاویه ربات و بردار موقعیت نسبی مانع و نیز هدف تعریف شده است.

**شکل ۱** موقعیت ربات  $r_i$  با بردار جهت  $h_i$  را در نسبت با مانع  $o_i$ ، موقعیت هدف  $t_i$  و نیز معیارهای مورد نیاز جهت محاسبه نیروی دافعه حاصل از میدان پتانسیل تطبیقی پیشنهادی نمایش می‌دهد. مقدار این نیروها در خارج از دایره مجاورت مانع با شعاع  $\rho_j^p$  برابر با صفر می‌باشد. دایره احتیاط شامل ناحیه‌ای است که از ورود ربات به آن باید جلوگیری نمود و شعاع آن  $(\rho_j^c)$  برابر با مجموع شعاع ربات  $(\rho_i^r)$ ، شعاع مانع  $(\rho_o^m)$  و فاصله احتیاط  $(\rho_c)$  است که مورد نهایی جزو پارامترهای طراحی است. بردارهای  $D(r_i, o_j)$  و  $D(r_i, t_i)$  به ترتیب نشان دهنده موقعیت مانع و هدف نسبت به ربات هستند. بردار نیروی دافع  $FO_{i,j}^b$  نشان دهنده نیروی است که در رابطه (۲) بیان شده است. بردار  $FO_{i,j}^a$ ، نیروی حاصل از میدان نیروی تطبیقی جدید را نشان می‌دهد. اندازه این نیرو برابر با اندازه  $FO_{i,j}^a$  است اما زاویه آن نسبت به محور  $x$  که با  $\omega_{i,j}^a$  نشان داده شده است بر اساس زوایای  $\psi_{i,j}$ ،  $\phi_{i,j}$ ،  $\omega_{i,j}^b$  طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود. این سه زاویه به ترتیب برابر با زاویه  $FO_{i,j}^a$  نسبت به محور  $x$ ، اختلاف زاویه بردار موقعیت نسبی هدف و بردار موقعیت نسبی مانع، و اختلاف زاویه جهت ربات با بردار موقعیت نسبی مانع هستند.

$$\omega_{i,j}^a = \omega_{i,j}^b - 90 \cdot \text{sign}(\psi_{i,j}) \cdot T$$

$$T = \begin{cases} \text{sing}(\phi_{i,j}, \psi_{i,j}) & \text{if } |\psi_{i,j}| \leq \phi \\ 1 & \text{if } |\psi_{i,j}| > \phi \end{cases} \quad (3)$$

در این رابطه، پارامتر  $\phi$  برای کنترل تاثیر بردار نسبی هدف در زاویه نهایی نیروی  $FO_{i,j}^a$  معرفی شده است. در صورت زیاد بودن اختلاف زاویه جهت ربات و بردار موقعیت نسبی مانع،  $\psi_{i,j}$ ، جهت نیروی  $FO_{i,j}^a$  تنها بر اساس این زاویه محاسبه می‌شود. اما در صورت کوچکتر بودن این زاویه از پارامتر  $\phi$ ، این نیرو ربات را به سمت موقعیت هدف آن راهنمایی می‌کند. نیروی نهایی حاصل از مانع

کاهش قابل توجه زمان اتمام عملیات را نشان می‌دهد. به منظور استفاده از روش پیشنهادی در کاربردهای واقعی و شبیه‌سازی برخط، یک معماری نرم‌افزاری هیبریدی با قابلیت مقیاس‌پذیری، ارائه و در بستر سیستم عامل رباتی پیاده‌سازی شده است.

## ۲- میدان‌های پتانسیل مصنوعی پیشرفته

در این بخش، روش پیشنهادی برای بهبود کارایی میدان‌های پتانسیل مصنوعی در مساله طراحی مسیر جمعی ارائه شده است. این توسعه شامل دو مورد اصلی است. مورد اول، تعریف میدان‌های پتانسیل تطبیقی برای موانع و ربات‌های متحرک در همسایگی یک ربات است. مورد دوم، تعریف میدان‌های پتانسیل افزوده جهت جلوگیری از همگرایی و ورود هم‌زمان و غیر ضروری تعداد زیادی ربات به یک ناحیه از محیط عملیات است. کارایی روش پیشنهادی با توجه به مولفه‌های طول مسیر و زمان اتمام عملیات مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

### ۲-۱- میدان نیروی جاذب هدف

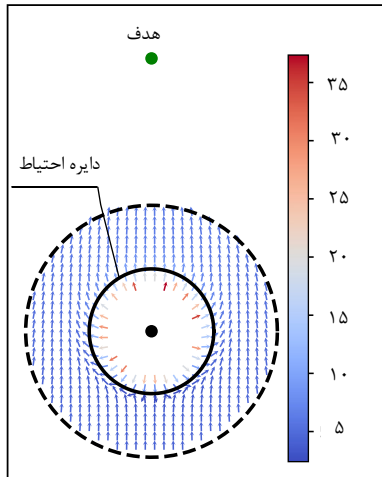
طراحی مسیر و هدایت ربات در روش میدان‌های پتانسیل مصنوعی، بر اساس برآیند نیروهای جاذب و دافع در هر لحظه و در موقعیت کنونی از محیط عملیات است. نیروی جاذب، بر اساس میدان پتانسیل تعریف شده در موقعیت هدف محاسبه می‌شود. نیروهای دافع نیز بر اساس میدان‌های پتانسیل تعریف شده منطبق بر موقعیت موانع و ربات‌های متحرک دیگر به دست می‌آیند. روش مرسوم در تعریف میدان نیروی جاذب، استفاده از یک مدل خطی بر اساس موقعیت نقطه هدف نسبت به ربات است که برای ربات  $i$  به صورت رابطه (۱) ارائه شده است.

$$FA_i = C_a D(r_i, g_i) \quad (1)$$

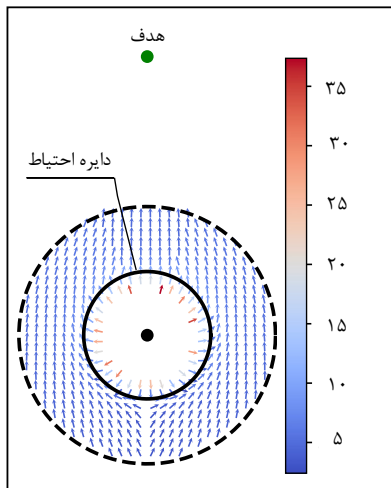
در این رابطه،  $C_a$  یک ضریب ثابت بوده و  $D(r_i, g_i)$  بردار موقعیت هدف  $g_i$  نسبت به موقعیت ربات،  $r_i$  می‌باشد. در صورت بزرگ بودن ضریب  $C_a$ ، مقدار نیروی جاذب در فواصل دور از هدف افزایش زیادی داشته و این موضوع احتمال نزدیک شدن به موانع را افزایش می‌دهد. در صورت کوچک بودن این ضریب نیز مقدار نیروی جاذب در نزدیکی هدف کاهش یافته و در صورت وجود موانع، احتمال عدم موفقیت و یا ماندن در نقاط کمینه محلی افزایش می‌یابد. برای حل این مشکل و نیز تنظیم مناسب دیگر میدان‌های پتانسیل بر اساس یک معیار واحد، اندازه بردار نیروی جاذب متناظر با هدف در این روش مقداری ثابت،  $FA$ ، در نظر گرفته شده است.

### ۲-۲- میدان نیروی تطبیقی موانع

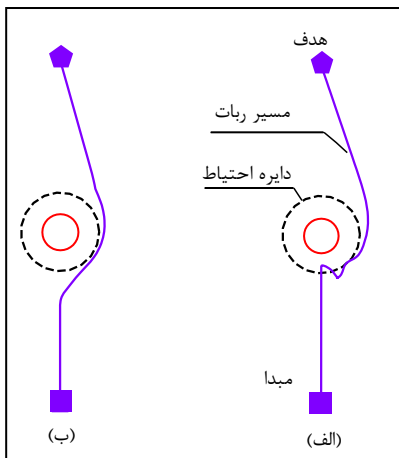
مدل مرسوم برای تعریف نیروی دافع حاصل از موانع در رابطه (۲) بیان شده است. در این رابطه  $FO_{i,j}^b$  بردار نیروی دافع حاصل از مانع  $j$  بر ربات  $i$  می‌باشد. همچنین،  $d(r_i, o_j)$  و  $D(o_j, r_i)$  به ترتیب



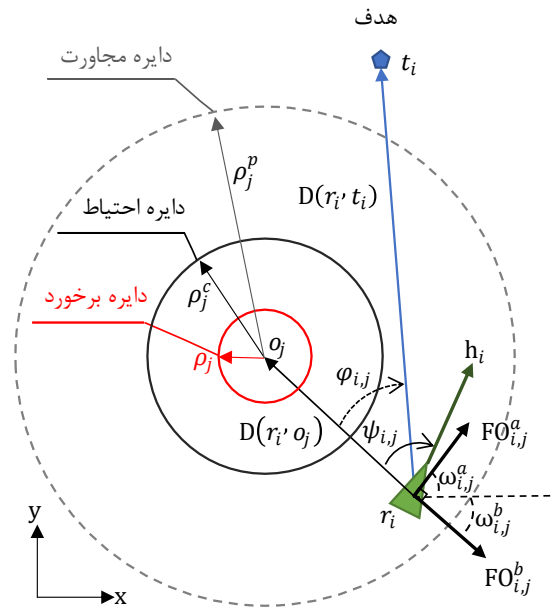
شکل ۲) برآیند میدان نیروی دافع پایه و نیروی جاذب هدف در هر نقطه داخل دایره مجاورت، با فرض اینکه جهت گیری ربات در هر نقطه به سمت مرکز مانع است.



شکل ۳) برآیند میدان نیروی دافع پایه، تطبیقی و نیروی جاذب هدف در هر نقطه داخل دایره مجاورت، با فرض اینکه جهت گیری ربات در هر نقطه به سمت مرکز مانع است.



شکل ۴) مسیر ربات در شبیه سازی عملیات با حضور یک مانع بین موقعیت هدف و ربات با در نظر گرفتن (الف) میدان دافع پایه، (ب) برآیند میدان دافع پایه و تطبیقی.



شکل ۱) متغیرهای محاسبه نیروی دافعه حاصل از میدان پتانسیل تطبیقی در مواجهه ربات \$r\_i\$ با مانع \$o\_j\$.

\$o\_i\$ طبق رابطه (۴) و مجموع نیروهای وارد شده از تعداد \$N\_o\$ مانع بر ربات \$r\_i\$ بر اساس رابطه (۵) محاسبه می شوند. ضریب ثابت \$C\_o\$ در محاسبه \$FO\_{i,j}^b\$ به گونه ای تنظیم شده است که مقدار این نیرو در دایره احتیاط برابر با اندازه \$FA\$ است.

$$FO_{i,j} = FO_{i,j}^b + FO_{i,j}^a \quad (۴)$$

$$FO_i = \sum_{j=1}^{N_o} FO_{i,j} \quad (۵)$$

شکل ۲ و شکل ۳ به ترتیب میدان های نیروی پایه (رابطه ۲) و تطبیقی (رابطه ۴) را در برآیند با میدان جاذب هدف نمایش می دهد. این میدان با فرض اینکه جهت گیری ربات در هر نقطه به سمت مرکز مانع است محاسبه شده است. همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده است، در صورتی که مانع بین ربات و موقعیت هدف آن قرار گرفته باشد، تا رسیدن ربات به دایره احتیاط، مقدار نیرو در راستای شعاعی مانع تغییر کرده و با رسیدن ربات به شعاع احتیاط جهت این نیرو تغییر نزدیک به ۱۸۰ درجه ای پیدا می کند. اما همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، برآیند نیروهای پایه، تطبیقی و هدف به صورتی است که در صورت قرار گرفتن مانع میان ربات و موقعیت هدف، جهت نیروی برآیند به گردش ربات حول مانع کمک می کند. نتایج شبیه سازی این سناریو در شکل ۴ برای میدان پایه (الف) و میدان تطبیقی (ب) ارائه شده است. همانطور که قابل مشاهده است، در حالت (الف)، ربات تا دایره احتیاط حرکت کرده و سپس در اثر تغییر جهت نیروی برآیند متوقف شده و تغییر مسیر ناگهانی داشته است. در صورتی که حالت (ب)، مسیر ربات به صورت تدریجی تغییر کرده و مانع را دور زده است.

۳-۲- میدان نیروی تطبیقی ربات‌ها

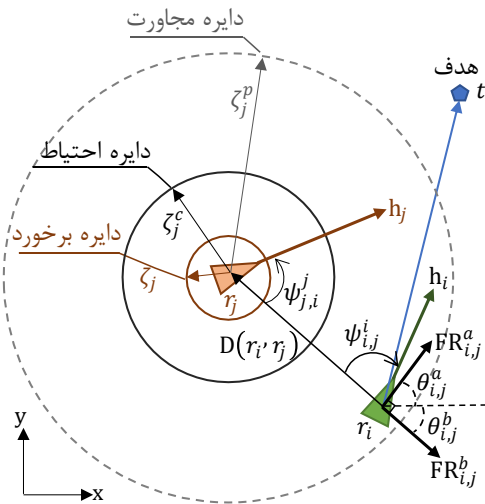
در روش ارائه شده در [37] و [1]، ربات‌های دیگر در محیط برای هر ربات به صورت موانع متحرک تعریف شده‌اند که میدان نیروی دافع آن‌ها طبق رابطه (۲) قابل محاسبه است. از ضعف‌های این روش، علاوه بر مشکلات مطرح شده در بخش قبل، عدم در نظر گرفتن جهت حرکت ربات‌ها است. این موضوع می‌تواند منجر به تغییر مسیرهای ناخواسته، مسیرهای ناهموار و در نهایت افزایش زمان اتمام عملیات شود. در این بخش، میدان نیروی تطبیقی با در نظر گرفتن جهت ربات‌ها و نیز موقعیت نسبی هدف ارائه شده است.

هر ربات یا در حالت حرکت و یا حالت توقف است. در صورت توقف ربات، همچون یک مانع در نظر گرفته شده و نیروی دافعه آن بر اساس رابطه (۴) قابل محاسبه است. اما در صورت حرکت ربات، نیروی دافعه تطبیقی جدیدی بر اساس جهت حرکت ربات‌ها معرفی شده است. شکل ۵ را در نظر بگیرید که در آن ربات  $r_i$  وارد دایره مجاورت ربات  $r_j$  شده است. در این شکل،  $\psi_{i,j}^i$  زاویه جهت ربات  $r_i$  نسبت به خط دید ربات (بردار  $D(r_i, r_j)$ ) است. نیروی دافعه شعاعی پایه حاصل از مانع با بردار  $FR_{i,j}^b$  و نیروی تطبیقی پیشنهادی نیز با بردار  $FR_{i,j}^a$  نمایش داده شده است. اندازه این نیروی تطبیقی برابر با اندازه  $FR_{i,j}^b$  می‌باشد اما جهت آن نسبت به محور افقی،  $\theta_{i,j}^a$ ، بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

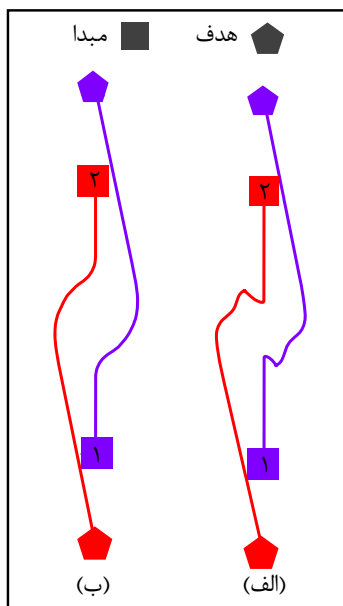
$$\theta_{i,j}^a = \theta_{i,j}^b - 90 \cdot \text{sign}(\psi_{i,j}^i) \cdot T \quad (6)$$

$$T = \text{sign}(\psi_{i,j}^i \cdot \psi_{j,i}^j \cdot (P_i - P_j))$$

در این رابطه،  $P_i$  و  $P_j$  مقادیر اولویت اختصاص یافته به ربات‌ها هستند که بر اساس فاصله آن‌ها از موقعیت هدف در هر زمان محاسبه می‌شوند. ربات با فاصله کمتر از هدف دارای اولویت بالاتری نسبت به ربات‌های دیگر است. نیروی تطبیقی معرفی شده که زاویه آن بر اساس رابطه (۶) تنظیم می‌شود به صورتی است که اگر بردارهای جهت دو ربات در دو سمت خط دید بین آن‌ها باشد، جهت چرخش ربات‌ها یکی بوده و در نتیجه به افزایش فاصله آن‌ها کمک می‌کند. این موضوع در نتیجه شبیه‌سازی ارائه شده در شکل ۶ قابل مشاهده است. حالت (الف) مسیرهای به دست آمده تحت تاثیر نیروی دافعه پایه و حالت (ب) مسیرهای به دست آمده تحت برآیند نیروی‌های دافعه پایه و تطبیقی را برای حالتی که ربات‌ها از روبرو به یکدیگر نزدیک می‌شوند را نمایش می‌دهد. تغییر تدریجی زاویه ربات و عدم تغییر مسیر ناگهانی که منجر به مسیر هموارتری شده است در مقایسه این دو حالت قابل مشاهده است. اما در صورتی که بردار جهت هر دو ربات در یک سمت خط دید میان آن‌ها باشد، بر اساس نیروی دافعه تطبیقی، زاویه چرخش ربات‌ها خلاف یکدیگر خواهد بود. شبیه‌سازی شکل ۷ حالتی را نمایش می‌دهد که جهت‌گیری ربات‌ها ابتدا به سمت یه نقطه بوده و از پهلوی در حال نزدیک شدن به یکدیگر هستند.



شکل ۵) متغیرهای محاسبه نیروی دافعه حاصل از میدان پتانسیل تطبیقی در مواجهه ربات  $r_i$  با ربات  $r_j$ .



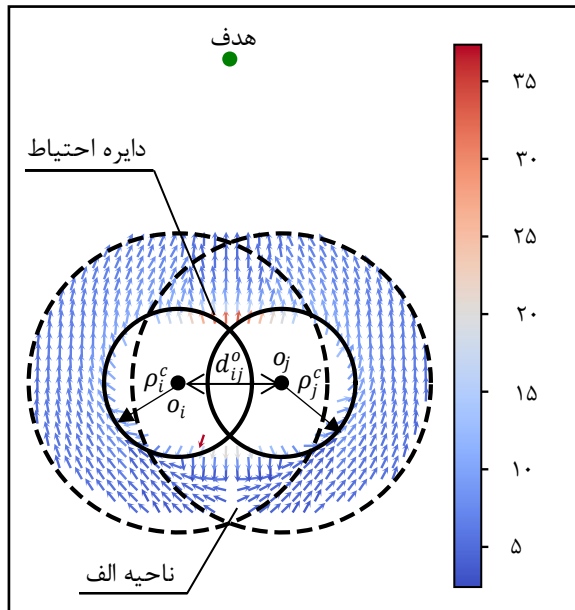
شکل ۶) مسیر دو ربات در شبیه‌سازی عملیاتی که ربات‌ها از روبرو به یکدیگر نزدیک می‌شوند با حضور (الف) میدان دافع پایه، (ب) برآیند میدان دافع پایه و تطبیقی.

در حالت (الف)، ربات‌ها پس از طی مسیری غیر ضروری در کنار یکدیگر قادر به عبور از کنار هم شده‌اند. اما با حضور نیروی تطبیقی در حالت (ب)، با اصلاح جهت ربات‌ها از این موضوع جلوگیری شده است.

برآیند نیروی وارده از ربات  $r_i$  به ربات  $r_j$  و نیز برآیند نیروهای وارده از تمامی ربات‌ها به ربات  $r_i$  بر اساس روابط (۷) و (۸) محاسبه شده است.  $N_r$  در رابطه (۸) برابر با تعداد کل ربات‌ها است.

$$FR_{i,j} = FR_{i,j}^b + FR_{i,j}^a \quad (7)$$

$$FR_i = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_r} FR_{i,j} \quad (8)$$



شکل ۸) تاثیر میدان نیروی افزوده حاصل از مانع مجازی در برآیند نیروها که منجر به جلوگیری از ایجاد کمینه محلی در ناحیه الف می شود.

این چالش و جلوگیری از ایجاد ترافیک ربات ها در عملیات، نوع دیگری از میدان نیروی افزوده تعریف شده است.

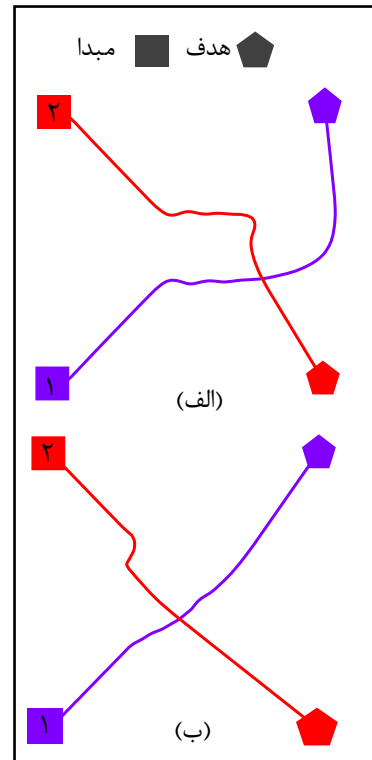
مرحله اول در تعیین نواحی همگرایی و محتمل برای ترافیک، تشخیص و خوشه بندی ربات های دیگر است. شکل ۹ یک نمونه از خوشه بندی ربات ها و تشکیل مانع مجازی جدید را نمایش می دهد. دو پارامتر اصلی برای خوشه بندی ربات ها وجود دارد. پارامتر اول،  $rc$ ، شعاع بررسی است. ربات هایی در فرآیند خوشه بندی در نظر گرفته می شوند که نسبت به ربات در فاصله کوتاه تری از  $rc$  بوده و نیز متوقف نشده باشند. پارامتر دوم،  $dc$ ، حداکثر فاصله ای است که هر ربات در یک خوشه باید حداقل با یکی دیگر از ربات های دیگر داشته باشد.

پس از شکل گیری خوشه، یک چندضلعی از اتصال مراکز ربات ها تشکیل شده و دایره محیط بر این چند ضلعی ایجاد می شود. شعاع احتیاط مانع مجازی جدید، طبق رابطه (۱۰) محاسبه می شود.  $\rho^p$  در این رابطه برابر با شعاع دایره محیط بر چند ضلعی ایجاد شده است که مرکز آن محل قرارگیری مرکز مانع مجازی جدید،  $o_a$ ، است.

$$\rho_a^c = \rho^p + \zeta_j^c \quad (10)$$

در صورتی که موقعیت هدف ربات، داخل دایره مجاورت مانع مصنوعی جدید قرار گرفته باشد، این مانع در نظر گرفته نمی شود. پس از تشکیل مانع مجازی تشریح شده و تعیین موقعیت و اندازه آن ها، میدان های نیروی حاصل از آن ها همانند دیگر مانع بر اساس رابطه (۴) محاسبه می شود. با در نظر گرفتن برآیند نیروهای مانع مجازی،  $FOA$ ، برآیند مجموع نیروهای وارد بر ربات به صورت رابطه (۱۱) قابل محاسبه است.

$$F = FA + FO + FR + FOA \quad (11)$$



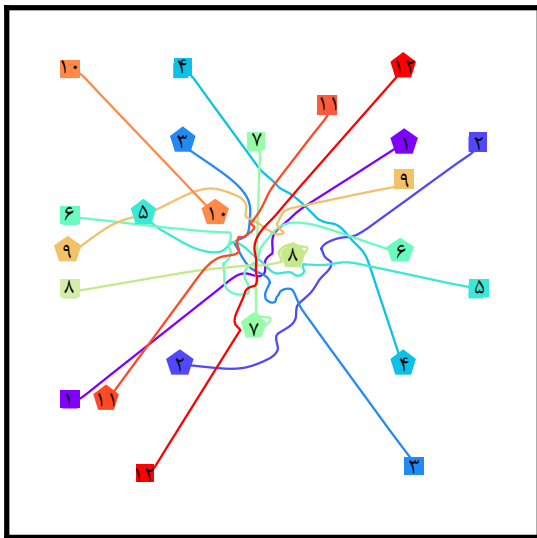
شکل ۷) مسیر دو ربات در شبیه سازی عملیاتی که جهت گیری ربات ها به یک نقطه بوده و از پهلو به یکدیگر نزدیک می شوند با حضور (الف) میدان دفاع پایه، (ب) برآیند میدان دفاع پایه و تطبیقی.

#### ۴-۲- میدان های نیروی افزوده

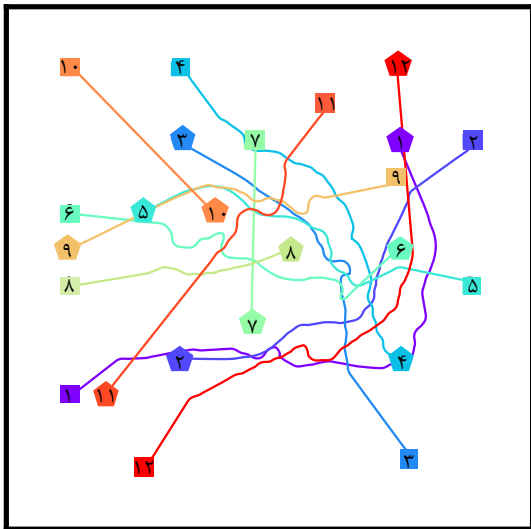
میدان های نیروی افزوده که در این بخش معرفی شده اند منطبق بر موانع و یا ربات های واقعی نیستند. این نیروها جهت بهبود کارایی و در دو موقعیت ایجاد می شوند. موقعیت اول زمانی است که فاصله میان دو مانع و یا یک ربات متوقف و یک مانع کوچکتر از مجموع شعاع احتیاط آن ها است. در این حالت، احتمال ایجاد نقاط کمینه محلی افزایش پیدا کرده و افزودن یک مانع مجازی بین دو جسم به حل این مساله کمک می کند. شکل ۸ را در بگیریید که دو مانع با فاصله کمتر از مجموع شعاع احتیاط آن ها در کنار یکدیگر قرار گرفته اند. ناحیه الف بخشی را نشان می دهد که با توجه به موقعیت هدف نسبت به موانع، احتمال ایجاد نقاط کمینه محلی وجود دارد. اما تعریف یک مانع مجازی در محل میان دو مانع، مانع از توقف ربات در این ناحیه می شود. این موضوع در جهت بردارهای نیرو ایجاد شده در این ناحیه قابل مشاهده است. شعاع احتیاط مانع مصنوعی،  $\rho_a^c$ ، در این حالت طبق رابطه (۹) محاسبه شده است.  $d_{ij}^o$  در این رابطه برابر با فاصله بین مراکز دو مانع است.

$$\rho_a^c = d_{ij}^o + (\rho_i^c + \rho_j^c)/2 \quad (9)$$

یکی از چالش های طراحی مسیر جمعی، همگرایی مسیر ربات ها به سمت یک ناحیه از محیط عملیات و نزدیک شدن همزمان ربات ها به هم می باشد. برای مثال، زمانی که خط مستقیم میان مبدا و هدف ربات ها در یک ناحیه با یکدیگر تلاقی دارد. برای حل



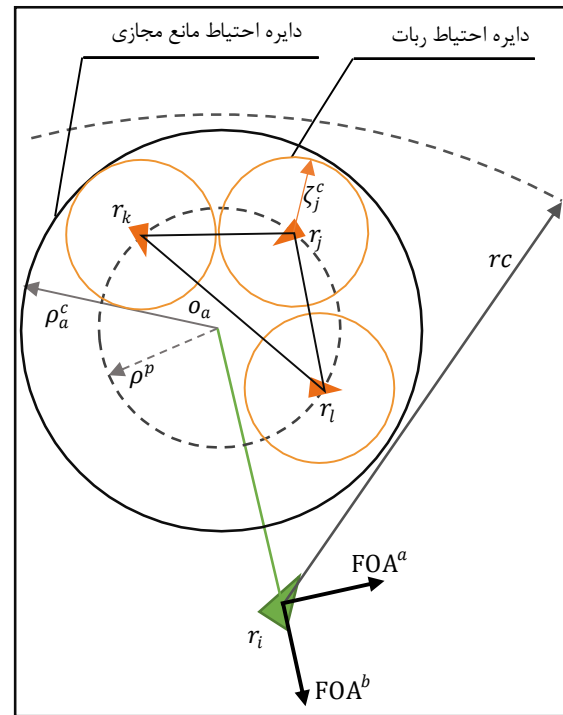
(الف)



(ب)

شکل ۱۰) مسیره‌های طی شده توسط ۱۲ ربات در طراحی مسیر جمعی (الف) بدون میدان نیروی افزوده و (ب) با حضور میدان نیروی افزوده.

شکل ۱۱ معماری سامانه شامل سرویس مرکزی و توابع طراح مسیر مجزا را نمایش می‌دهد. در این شکل، دو ربات متصل به سامانه مرکزی در نظر گرفته شده است. کلاینت طراحی مسیر هر ربات با ارسال درخواست به سرور مرکزی، به این سامانه متصل می‌شود. با دریافت این درخواست، سرور مرکزی اطلاعات تابع هماهنگی مرکزی را به روزرسانی کرده و تابع طراح مجزای مربوط به این ربات را ایجاد می‌کند. تابع هماهنگی مرکزی وظیفه دریافت اطلاعات موقعیتی و وضعیت ربات‌ها، تجمیع این داده‌ها، محاسبه اولویت‌ها و ارسال آن‌ها به توابع طراح را دارد. تابع طراح مسیر مختص هر ربات، اطلاعات لحظه‌ای موقعیت را از تابع ناوبری ربات دریافت کرده و بر اساس میدان‌های پتانسیل مصنوعی تشریح شده، مقدار برآیند نیروی وارد شده به ربات در جهت راستای ربات و عمود بر آن را محاسبه می‌کند. بر اساس این



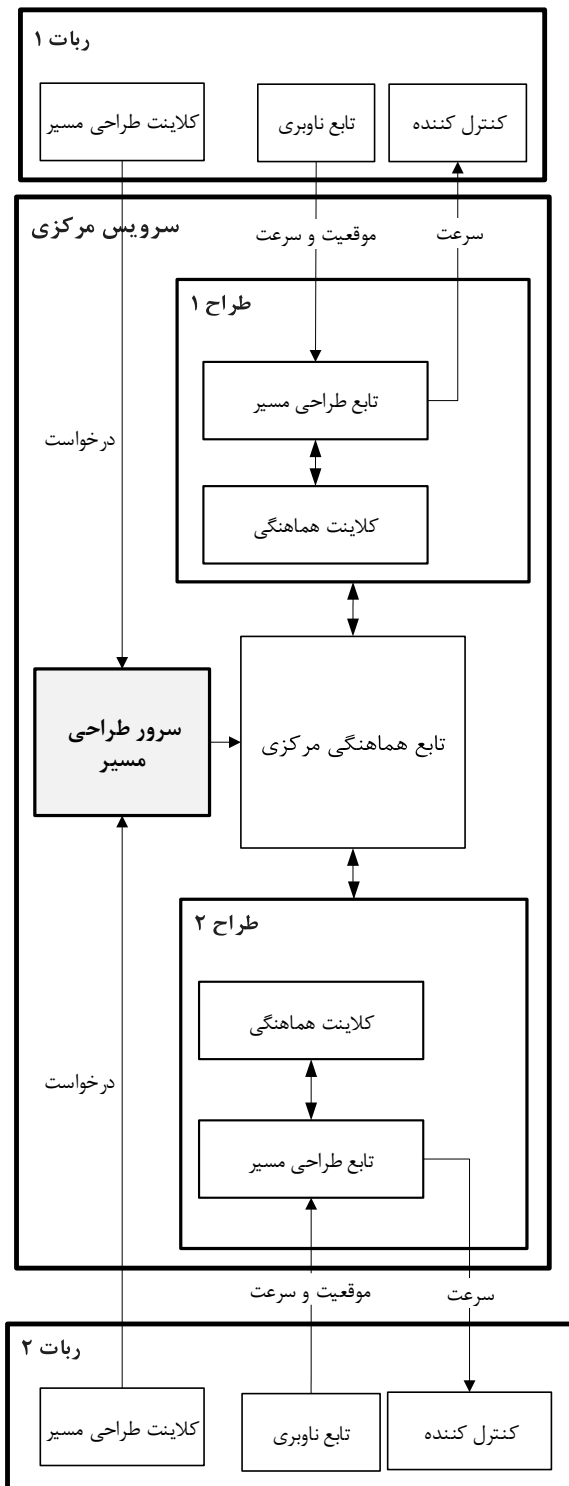
شکل ۹) مثالی از خوشه‌بندی ربات‌ها و ایجاد مانع مجازی برای جلوگیری از همگرایی بیشتر ربات‌ها.

شکل ۱۰ تاثیر میدان نیروی افزوده در یک شبیه‌سازی طراحی مسیر جمعی با تعداد ۱۲ ربات را نمایش می‌دهد که خط مستقیم میان مبدا و مقصد ربات‌ها در ناحیه مرکزی محیط دارای تلاقی است. شکل (الف) مسیره‌های طی شده توسط ربات‌ها بدون حضور میدان نیروی افزوده و شکل (ب) مسیره‌های طی شده با حضور میدان نیروی افزوده را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل (الف) قابل مشاهده است، مسیر ربات‌ها از ناحیه مرکزی عبور کرده است که به معنی کاهش سرعت ربات‌ها در ناحیه مرکزی و ایجاد ترافیک است. اما مسیر ربات‌ها در شکل (ب) در سطح وسیع‌تری از محیط عملیات قرار گرفته و از ورود همزمان ربات‌ها به یک ناحیه پیش-گیری شده است.

### ۳- معماری هیبریدی

برای پیاده‌سازی برخط الگوریتم تشریح شده و هماهنگی ربات‌ها در عملیات طراحی مسیر جمعی، یک معماری هیبریدی طراحی و در بستر سیستم عامل رباتی پیاده‌سازی شده است. این معماری با در نظر گرفتن مساله پویا، یعنی امکان دریافت پیوسته وظایف عملیاتی و تغییر تعداد ربات‌ها در طول عملیات طراحی شده است. در این معماری، یک سامانه مرکزی جهت دریافت درخواست‌ها و وظایف، دریافت و تجمیع اطلاعات ربات‌ها و به روزرسانی متغیرهای تصمیم‌گیری وجود دارد. اما برای هر رباتی که جهت طراحی مسیر به این سامانه متصل شده است، یک طراح مسیر مجزا ایجاد می‌شود.





شکل ۱۱) معماری هیبریدی سامانه طراحی مسیر جمعی.

عملیات در حالت ۱۵ ربات به ۶۲ ثانیه رسیده است که کاهش تقریباً ۵۰٪ در طراحی مسیر با روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این حالت، تاثیر میدان‌های نیروی افزوده در جلوگیری از همگرایی ربات‌ها به یک منطقه قابل مشاهده است. همانطور که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است، زمان اتمام عملیات در برخی موارد با افزایش ربات کاهش یافته است. این موضوع

نیروها، مقادیر سرعت خطی و زاویه‌ای ربات محاسبه شده و به تابع کنترل ربات ارسال می‌شود.

وضعیت ربات‌ها ابتدا در حال توقف است. با دریافت وظیفه و آغاز حرکت ربات به سمت هدف، وضعیت به در حال حرکت تغییر کرده و با رسیدن به هدف، دوباره به در حال توقف تغییر می‌یابد. از آنجایی که یک تابع طراح مسیر مجزا برای هر ربات اختصاص پیدا می‌کند، سرور طراحی مسیر مرکزی قابلیت دریافت درخواست جدید در طول عملیات ربات‌های دیگر را داشته و تعداد ربات‌ها قابل تغییر است.

#### ۴- شبیه‌سازی برخط و مقایسه

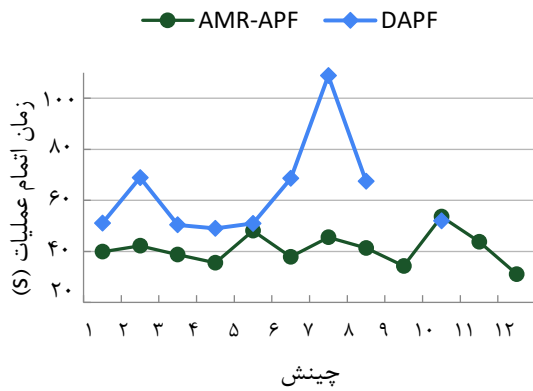
به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، دو حالت شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. در حالت اول، آرایش موانع در محیط ثابت بوده و تعداد ربات‌ها افزایش پیدا می‌کند. در حالت دوم، تعداد ربات‌ها و موانع ثابت بوده اما آرایش آن‌ها تغییر می‌یابد. شبیه‌سازی‌ها در بستر نرم‌افزار گزبو و به صورت برخط انجام شده است. از مدل ربات ترتلیات (TurtleBot3) برای تعریف ربات‌ها در این محیط استفاده شده است.

نتایج به دست آمده توسط روش پیشنهادی با روش طراحی مسیر جمعی بر پایه میدان‌های پتانسیل مصنوعی پیشنهادی در [37]، بر اساس میانگین طول مسیرهای طی شده و زمان اتمام عملیات مقایسه شده است. نتایج روش پیشنهادی در این مقاله تحت عنوان AMR-APF و برای روش دیگر تحت عنوان DAPF گزارش شده است.

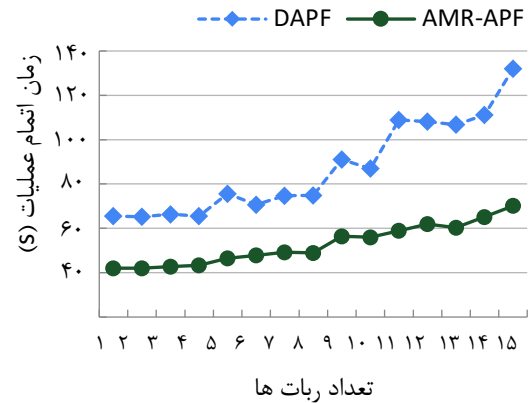
#### ۴-۱- حالت اول: افزایش تعداد ربات‌ها

ابتدا یک محیط مربع شکل با عرض ۱۰ متر و تعداد ۲۰ مانع ایجاد شده است که موانع در آن در چهار ردیف موازی در عرض‌های ۲/۱، ۳/۵، ۶/۳ و ۷/۷ با فاصله ۱/۴ متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. این حالت شبیه‌سازی شامل ۱۵ تست است که با یک ربات آغاز شده و در هر مورد بعدی یک ربات به مجموعه اضافه می‌شود. آرایش موقعیت ابتدایی و اهداف ربات‌ها به گونه‌ای است که مسیر مستقیم میان موقعیت شروع و هدف ربات‌ها در ناحیه مرکزی دارای تلاقی است.

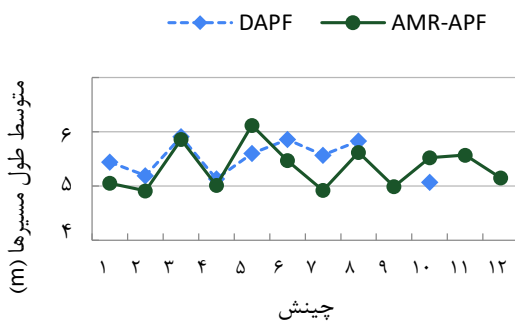
شکل ۱۲ زمان اتمام عملیات ربات‌ها در طی مسیرهای طراحی شده را نمایش می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است زمان اتمام عملیات به دست آمده در طراحی مسیر با روش پیشنهادی، در تمام موارد کمتر از روش DAPF می‌باشد و مقدار این اختلاف با افزایش تعداد ربات‌ها به صورت کلی افزایش یافته است. در ابتدا و برای حالت ۱ تا ۵ ربات، مقدار این اختلاف تقریباً برابر با ۲۳ ثانیه است. در این حالات، کاهش زمان اتمام عملیات در روش پیشنهادی، ناشی از میدان‌های نیروی تطبیقی موانع می‌باشد. با افزایش تعداد ربات‌ها و در نتیجه تاثیر متقابل آن‌ها، اختلاف زمان اتمام



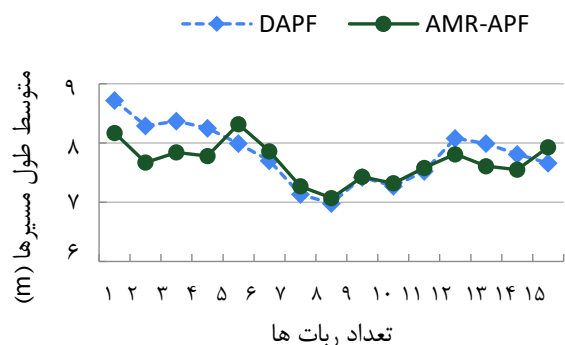
شکل ۱۴) مقایسه زمان اتمام عملیات در شبیه‌سازی عملیات طراحی مسیر جمعی با تعداد ۸ ربات و ۱۵ مانع با چینش تصادفی.



شکل ۱۲) مقایسه زمان اتمام عملیات در شبیه‌سازی عملیات طراحی مسیر جمعی در نقشه یکسان و با تعداد ۱ تا ۱۵ ربات.



شکل ۱۵) مقایسه میانگین طول مسیرهای طی شده توسط ربات‌ها در شبیه‌سازی عملیات طراحی مسیر جمعی با تعداد ۸ ربات و ۱۵ مانع با چینش تصادفی.



شکل ۱۳) مقایسه میانگین طول مسیرهای طی شده توسط ربات‌ها در شبیه‌سازی عملیات طراحی مسیر جمعی در نقشه یکسان و با تعداد ۱ تا ۱۵ ربات.

کمتر از روش DAPF است. مقدار اختلاف زمان اتمام عملیات به دست آمده توسط دو روش در چینش ۷ بیشترین مقدار را داشته که تقریباً برابر با یک دقیقه است. همچنین، روش DAPF در چینش‌های ۹، ۱۱ و ۱۲ موفق به اتمام عملیات در بازه زمان ۵۰۰ ثانیه نشده است. دلیل این موضوع، قرار گرفتن و حرکت ربات‌ها در مسیرهای بسته است که ناشی از میدان‌های پتانسیل موانع و ربات‌های متوقف شده می‌باشد.

همچنین مانند حالت اول، اختلاف چشمگیری در میانگین طول مسیر طی شده توسط ربات‌ها در شکل ۱۵ مشاهده نمی‌شود.

### ۵- جمع‌بندی

در این مقاله، یک روش طراحی مسیر جمعی و برخط برای سامانه‌های چند رباتی پویا ارائه شده است. طراحی این روش در دو بخش اصلی انجام شده است. بخش اول طراحی الگوریتم طراحی مسیر است. با توجه به هماهنگی ربات‌ها، یک تابع میدان نیروی افزوده مصنوعی تعریف شده است که نقش آن، کاهش همگرایی ربات‌ها به یک ناحیه از میدان عملیات و پیشگیری از ایجاد ترافیک است. همچنین، میدان‌های نیروی تطبیقی دیگری نیز تعریف شده است که نقش آن‌ها افزایش همواری مسیر ربات هنگام مواجهه با موانع و دیگر ربات‌ها است. در بخش دوم، یک معماری نرم‌افزاری

نشان دهنده تاثیر آرایش اولیه ربات‌ها در محیط است. افزودن یک ربات به یک آرایش اولیه می‌تواند حرکت ربات‌ها را به گونه‌ای تحت تاثیر قرار دهد که باعث ایجاد و یا جلوگیری از همگرایی تعدادی از ربات‌ها شود.

شکل ۱۳ متوسط طول مسیرهای طی شده توسط ربات‌ها را نمایش می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است، اختلاف چشمگیری میان روش پیشنهادی و روش DAPF وجود ندارد. در روش پیشنهادی ممکن است به دلیل جلوگیری از همگرایی، ربات‌ها مسیرهای طولانی‌تری را طی کنند. اما در روش DAPF، ربات‌ها ممکن است وارد نواحی همگرایی شده و در نتیجه با توقف‌ها و تغییر مسیرهای کوتاه اما زیاد، از این ناحیه عبور کنند.

### ۴-۲- حالت دوم: تغییر آرایش ربات‌ها و موانع

در این حالت از شبیه‌سازی، تعداد ۸ ربات و ۱۵ مانع در یک محیط مربع شکل به ضلع ۷ متر قرار گرفته‌اند. این مورد شامل ۱۲ تست می‌شود که در هر کدام آرایش موانع و ربات‌ها به صورت تصادفی انجام شده است.

همانطور که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است، زمان اتمام عملیات در طراحی مسیر با روش پیشنهادی در همه موارد به جز چینش ۱۰

navigation, and control of unmanned rotorcraft systems. *Journal of Field Robotics*. 2012 Mar;29(2):315-78.

6- Khanmirza E, Haghbeigi M, Nazarahari M, Doostie S. A comparative study of deterministic and probabilistic mobile robot path planning algorithms. In 2017 5th RSI international conference on robotics and mechatronics (ICRoM) 2017 Oct 25 (pp. 534-539). IEEE.

7- Nikkhoe Tanha SD, Habibnejad Korayem M, Fathollahi Dehkordi S. Path Design and Control of a Moving Social Robot in an Environment with Moving Obstacles in Order to Reach a Moving Target through Fuzzy Control. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2021 Apr 21;53(2):993-1014.

8- Abtahi SA, Atashgah MA, Tarvirdizadeh B, Shahbazi M. Aerial Robotics in Urban Environments: Optimized Path Planning and SITL Assessments. In 2023 11th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM) 2023 Dec 19 (pp. 271-278). IEEE.

9- Kassaei SI, Kosari A. Aircraft Trajectory Planning with an Altitude-Bound in terrain-following flight. *Modares Mechanical Engineering*. 2018 Feb 10;17(12):135-44.

10- Analooee A, Azadi S, Kazemi R. Collision-free navigation and control for autonomous vehicle in complex urban environments. *Modares Mechanical Engineering*. 2018 Jan 10;17(11):277-88.

11- Fakoor M, Kosari A, Jafarzadeh M. Humanoid robot path planning with fuzzy Markov decision processes. *Journal of applied research and technology*. 2016 Oct;14(5):300-10.

12- Moosavian S A A, Morady M. Zero reaction path planning for mobile robot arms. *Modares Mechanical Engineering* 2011; 11 (1):43-51.

13- Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. In *Proceedings. 1985 IEEE international conference on robotics and automation* 1985 Mar 25 (Vol. 2, pp. 500-505). IEEE.

14- Lee MC, Park MG. Artificial potential field based path planning for mobile robots using a virtual obstacle concept. In *Proceedings 2003 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics (AIM 2003)* 2003 Jul 20 (Vol. 2, pp. 735-740). IEEE.

15- Szczepanski R, Bereit A, Tarczewski T. Efficient local path planning algorithm using artificial potential field supported by augmented reality. *Energies*. 2021 Oct 14;14(20):6642.

16- Tahri A, Guenfaf L. Local-Minimum-Free Artificial Potential Field Method for Obstacle Avoidance. In *Intelligent Systems and Applications: Proceedings of the 2021 Intelligent Systems Conference (IntelliSys) Volume 3* 2022 (pp. 323-331). Springer International Publishing.

17- Tao S. Improved artificial potential field method for mobile robot path planning. *Appl Comput Eng*. 2024;33:157-66.

18- Han SD, Yu J. Ddm: Fast near-optimal multi-robot path planning using diversified-path and optimal sub-problem solution database heuristics. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020 Jan 17;5(2):1350-7.

19- Zhao W, Lin R, Dong S, Zhao W, Cheng Y. Dynamic

هیبریدی ارائه شده که در بستر سیستم عامل رباتی پیاده‌سازی شده است. در این معماری، یک سرویس مرکزی جهت اتصال ربات‌ها و هماهنگی آن‌ها با یکدیگر وجود دارد. اما برای هر ربات، یک گره طراحی مسیر مجزا ایجاد می‌شود که در ارتباط با تابع هماهنگی مرکزی، مسیر ربات اختصاص یافته را طراحی می‌کند. یکی از مشخصه‌های این معماری، امکان ورود ربات‌های جدید به عملیات همزمان با حرکت ربات‌های دیگر است. همچنین، با رسیدن هر ربات به هدف، امکان تعریف لحظه‌ای اهداف جدید فراهم شده است. بنابراین، روش پیشنهادی مقیاس‌پذیر بوده و قابل استفاده در کاربردهای واقعی است که در آن‌ها جریان پیوسته‌ای از وظایف عملیاتی وجود دارد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌های برخط، استفاده از روش پیشنهادی منجر به افزایش همواری مسیرها شده و نیز کاهش چشمگیری در زمان پیمایش مسیرها ایجاد کرده است. بهبود در نتایج با افزایش تعداد ربات‌ها بیشتر قابل مشاهده است. نتایج تا ۶۰ درصد کاهش در زمان پیمایش مسیرها را نشان می‌دهد. همچنین، در برخی از موارد، بدون استفاده از توابع پیشنهادی، رسیدن تمام ربات‌ها به موقعیت هدف امکان‌پذیر نبوده است.

یکی از موضوعات مورد نظر در ادامه تحقیقات، نحوه خوشه‌بندی ربات‌ها و ایجاد توابع پتانسیل افزوده است. محدود بودن نحوه خوشه‌بندی ربات‌ها به شکل دایره می‌تواند منجر به محدودیت کاربرد روش پیشنهادی در فضاهایی کوچک در مقایسه با ابعاد ربات‌ها شود. به منظور افزایش کارایی و کاربرد روش پیشنهادی، این موضوع مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

## منابع

- 1- Matoui F, Boussaid B, Metoui B, Abdelkrim MN. Contribution to the path planning of a multi-robot system: centralized architecture. *Intelligent Service Robotics*. 2020 Jan;13(1):147-58.
- 2- Zhao T, Li H, Dian S. Multi-robot path planning based on improved artificial potential field and fuzzy inference system. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2020 Jan 1;39(5):7621-37.
- 3- Klancar G, Zdesar A, Blazic S, Skrjanc I. Path Planning. In: *Wheeled Mobile Robotics*. Elsevier; 2017. p. 161-206.
- 4- Zagradjanin N, Pamucar D, Jovanovic K. Cloud-based multi-robot path planning in complex and crowded environment with multi-criteria decision making using full consistency method. *Symmetry*. 2019 Oct 4;11(10):1241.
- 5- Kendoul F. Survey of advances in guidance,

- 3267). IEEE.
- 35- Luna R, Bekris KE. Efficient and complete centralized multi-robot path planning. In 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2011 Sep 25 (pp. 3268-3275). IEEE.
- 36- De Wilde B, Ter Mors AW, Witteveen C. Push and rotate: cooperative multi-agent path planning. In Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems 2013 May 6 (pp. 87-94).
- 37- Matoui F, Boussaid B, Abdelkrim MN. Distributed path planning of a multi-robot system based on the neighborhood artificial potential field approach. Simulation. 2019 Jul;95(7):637-57.
- 38- Zhang D, Zhu G, Zhang Q. Multi-Robot Motion Planning: A Learning-Based Artificial Potential Field Solution. In 2023 2nd Conference on Fully Actuated System Theory and Applications (CFASTA) 2023 Jul 14 (pp. 233-238). IEEE.
- node allocation-based multirobot path planning. IEEE Access. 2021 Jul 16;9:106399-411.
- 20- Tang B, Xiang K, Pang M, Zhanxia Z. Multi-robot path planning using an improved self-adaptive particle swarm optimization. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2020 Sep 28;17(5):1729881420936154.
- 21- Sharon G, Stern R, Felner A, Sturtevant NR. Conflict-based search for optimal multi-agent pathfinding. Artificial intelligence. 2015 Feb 1;219:40-66.
- 22- Rathi A, Vadali M. Dynamic prioritization for conflict-free path planning of multi-robot systems. arXiv preprint arXiv:2101.01978. 2021 Jan 6.
- 23- Wurman PR, D'Andrea R, Mountz M. Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses. AI magazine. 2008 Mar 20;29(1):9-.
- 24- Sharma K, Doriya R. Coordination of multi-robot path planning for warehouse application using smart approach for identifying destinations. Intelligent Service Robotics. 2021 Apr;14(2):313-25.
- 25- Wu W, Bhattacharya S, Prorok A. Multi-robot path deconfliction through prioritization by path prospects. In 2020 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA) 2020 May 31 (pp. 9809-9815). IEEE.
- 26- Sharma K, Doriya R. Coordination of multi-robot path planning for warehouse application using smart approach for identifying destinations. Intelligent Service Robotics. 2021 Apr;14(2):313-25.
- 27- Foead D, Ghifari A, Kusuma MB, Hanafiah N, Gunawan E. A systematic literature review of A\* pathfinding. Procedia Computer Science. 2021 Jan 1;179:507-14.
- 28- Wagner G, Choset H. Subdimensional expansion for multirobot path planning. Artificial intelligence. 2015 Feb 1;219:1-24.
- 29- Standley T. Finding optimal solutions to cooperative pathfinding problems. In Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence 2010 Jul 3 (Vol. 24, No. 1, pp. 173-178).
- 30- Goldenberg M, Felner A, Stern R, Sharon G, Sturtevant N, Holte RC, Schaeffer J. Enhanced partial expansion A. Journal of Artificial Intelligence Research. 2014 May 28;50:141-87.
- 31- Surynek P. Towards optimal cooperative path planning in hard setups through satisfiability solving. In Pacific Rim international conference on artificial intelligence 2012 Sep 3 (pp. 564-576). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- 32- Erdem E, Kisa D, Oztok U, Schüller P. A general formal framework for pathfinding problems with multiple agents. In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence 2013 Jun 30 (Vol. 27, No. 1, pp. 290-296).
- 33- Sharon G, Stern R, Goldenberg M, Felner A. The increasing cost tree search for optimal multi-agent pathfinding. Artificial intelligence. 2013 Feb 1;195:470-95.
- 34- Wagner G, Choset H. M\*: A complete multirobot path planning algorithm with performance bounds. In 2011 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems 2011 Sep 25 (pp. 3260-