مجله کنترل

جلد ۱۰، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵

طراحی الگوریتم پایداری حرکت توده‌ی ربات‌ها در صورت عدم برخورد با مانع و عدم تمایل به تجمع مبتنی برمعادلات لاگرانژ

علی غفاری[۱]، علیرضا خدایاری[۲]، عباس پورمحمودی[۳]

[۱] استاد، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۲] نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳XX/X/X، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳XX/X/X)

چکیده: در حرکت توده‌یی ربات‌ها مهمترین مبحث ایجاد پایداری در طول حرکت می‌باشد. پایداری در حرکت توده‌ی ربات‌ها شامل مواردی همچون عدم برخورد اعضاء با یکدیگر و عدم برخورد اعضاء با موانع موجود در مسیر حرکت می‌باشد. در این مقاله الگوریتمی جدید در قالب یک معادله‌ی دینامیکی بر مبنای معادلات لاگرانژ برای پایداری حرکتی توده‌ی ربات‌ها ارائه می‌شود. هدف از ارائه این الگوریتم جدید ایجاد تجمع در نقطه‌ی هدف می‌باشد. الگوریتم جدید در دو حالت تعمیم داده می‌شود. حالت اول به صورتی است که اعضای توده تمایل به تجمع را در طول مسیر حرکت دارا می‌باشند و در حالت دوم حرکت به نحوی انجام می‌شود که اعضای توده تمایل به تجمع را در طول مسیر نخواهند داشت. در نهایت معادلات ارائه شده شبیه‌سازی و صحه‌گذاری می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، عدم برخورد اعضای توده با موانع موجود در طول مسیر حرکت و ایجاد تجمع در نقطه‌ی هدف را نشان می‌دهد. نشان داده شده است که در حالت دوم اعضای توده منطقه‌ی بیشتری را در طول مسیر خود پوشش دهند. پوشش بیشتر فضای حرکتی، سبب می‌شود تا کاربرد الگوریتم پیشنهادی در مواردی همچون شناسایی، جست‌وجو، نظارت بر محیط زیست و نقشه برداری در طول مسیر حرکت باشد.

کلمات کلیدی: توده، توده ربات ها، الگوریتم حرکت توده، تجمع توده ربات ها.

Designing a stability algorithm for swarm robots in the cases of obstacle avoidance and absence of tendency to aggregate based on Lagrange equations

Ali Ghaffari, Alireza Khodayari, Abbas Pourmahmoudi

Abstract: Stability is one of the most important issues in swarm movement. Stability in swarm movement is composed of features such as collision avoidance between members of the swarm with each other and also obstacle avoidance along the path of movement. This paper presents a new algorithm in the form of a dynamic equation based on Lagrange equations for stable movement of the swarm robot. One of the objective of presenting this algorithm is to enable

نویسنده عهده دار مکاتبات: علیرضا خدایاری

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

aggregation at the target point. The new algorithm will be extended in two cases; first, when the members of the swarm have the tendency for aggregation from the beginning of the movement, and second, members of the swarm don't have the tendency for aggregation along the path. At the end, the presented algorithms will be simulated and evaluated. The simulation results show successful obstacle avoidance along the path and aggregation at the target point. The results show that in the second case—when there is no aggregation along the path—the members of the swarm cover more area along the path. Covering more area along the path empowers the application of the proposed algorithm in cases such as identification, exploration, environmental monitoring and mapping along the path.

Keywords: Swarm, swarm robots, swarm movement algorithm, swarm robots aggregation.

۱- مقدمه

توده‌ی ربات‌ها، گروهی متشکل از چندین عضو است که با یکدیگر در تعامل هستند و ایده‌ی آن برگفته شده از رفتار اجتماعی حشرات و حیوانات است که برای هدفی مشخص طراحی می‌شود[۱-۳]. عبارت توده هوشمند[۱] [۴] اولین بار توسط بنی[۲] در سال ۱۹۸۰ معرفی گردید [۵]. بعدها برای ایجاد تعامل بین رفتارهای اجتماعی حیوانات و روابط ریاضی، شاخه‌یی در مهندسی با عنوان مهندسی توده تعریف شد. مهندسی توده توسط کزادی[۳] اینگونه تعریف شده است که "رفتار توده‌ی طراحی شده برای هدفی مشخص، با ضریب اطمینان بالا قابل پیش بینی و قابل کنترل بوده، و با کمترین شرایط اثبات می‌شود" [۶]. رفتارهای توده‌یی در دهه‌ی اخیر با استفاده از روش‌های گوناگون مدل شده است[۷]. توده‌ی ربات‌ها که برگرفته از رفتارهای توده‌یی می‌باشد در شاخه‌های متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مهمترین شاخه‌های مورد بررسی توده‌ی ربات‌ها بررسی پایداری در حرکت آنها می‌باشد[۸]. پایداری در مدل‌های ارائه شده، به این صورت تعریف می‌شود که "حرکت توده‌ی ربات‌ها زمانی پایدار است که برخوردی بین اعضا با یکدیگر و موانع موجود در مسیر حرکت وجود نداشته باشد و نهایتاً اعضاء پس از توقف ارتعاش نداشته باشند" [۹-۱۲]. همچنین همگرایی اعضای توده به هدفی مشخص نیز بخشی از تحلیل پایداری حرکت توده‌ی ربات‌ها می‌باشد که معمولا توسط ایجاد عوامل دافع مجازی جهت عدم برخورد بایکدیگر و جاذب مجازی جهت ایجاد تجمع و حرکت به سمت نقطه‌ی هدف صورت می‌گیرد[۱۳-۱۴]. در زمینه‌ی پایداری حرکت توده‌ی ربات‌ها، در سال ۲۰۰۹، مدلی توسط ایکانایاک[۴] ارائه شده است. در این مدل توده‌ی ربات‌ها توسط نیروهای مجازی به سمت الگویی مشخص که به صورت یک خم ساده و بسته می‌باشد حرکت می‌کنند. نیروی مجازی معرفی شده توسط ایکانایاک به صورت یک انتگرالی است که روی خم بسته‌ی، ساده و متقارن تعریف شده است. سپس ربات‌ها داخل خم ساده و بسته قرار می‌گیرند و به صورت منظم در آن پراکنده شده و نهایتا متوقف می‌شوند. حرکت توده‌ی ربات‌ها در این مدل توسط سوئیچ‌هایی طراحی شده است که وظیفه آنها فعال و غیر فعال کردن نیروها از سمت خم ساده و بسته می‌باشد. وجود موانع نیز توسط ایکانایاک به نحوی در نظر گرفته شده است که موانع به صورت خم‌های بسته، ساده و متقارن هستند و نیروهای دافع مجدداً به صورت یک انتگرال روی این خم‌ها تعریف شده اند[۱۵]. از آنجایی که نیروهای در نظر گرفته شده توسط ایکانایاک به صورت انتگرال‌های مختلط هستند و روی خم‌هایی تعریف شده‌اند، لذا ربات‌ها ابتدا باید حجم وسیعی از محاسبات را در حافظه‌ی خود انجام دهند و پس از آن برای حرکت تصمیم گیری کنند. در سال ۲۰۰۶ مدلی توسط کیم[۵] و همکاران ارائه شده، که در آن با استفاده از توابع پتانسیل، حرکتی پایدار برای توده‌ی ربات‌ها به سمت نقطه‌ی هدف ایجاد شده است [۱۶]. کیم و همکاران اعضای توده را بدون جرم در نظر گرفته‌اند. همچنین ابعاد مشخصی برای موانع موجود بر مسیر حرکت در نظر گرفته نشده است. لذا در مدل ارائه شده سعی بر این شده است که با تنظیم پارامترها و همچنین مشخص بودن مسیر حرکت، پایداری توده‌ی ربات‌ها تضمین شود. هاشیموتو[۶] و همکاران در سال۲۰۰۹ مدلی را ارئه کرده‌اند که در آن عدم برخورد با مانع، توسط نیروی تعریف شده به صورت یک انتگرال روی سطح مانع، تضمین شده است. گیزی[۷] در سال ۲۰۰۲ مدلی را ارائه داده است که در آن توده‌یی متشکل از چندین عضو در شرایط اولیه به صورت پراکنده در فضای سه بعدی قرار دارند. الگوریتم پیشنهادی گیزی که بر اساس یک معادله دیفرانسیل مرتبه‌ی یک است، تجمع توده را در نقطه‌ی مرکز توده ایجاد می‌نماید[۱۷]. در این مدل، گیزی وجود مانع را در نظر نگرفته است. گیزی در سال ۲۰۱۳ مدل دیگری را بر اساس معادلات لاگرانژ ارائه داده است که در آن اعضای توده به سمت نقطه‌ی هدف حرکت می‌کنند. در مدل گیزی، وجود مانع به صورت یک جرم متمرکز در نظر گرفته شده است و یک تابع نمایی باعث عدم نزدیک شدن اعضای توده به آن می‌شود[۱۸]. همچنین در مدل ارائه شده توسط گیزی اعضای توده در همان ابتدای شروع حرکت، تمایل به تجمع دارند، که این موضوع سبب می‌شود تا اعضای توده آزادی عمل در انتخاب مسیر حرکت را به صورت خودکار نداشته باشند،

1.Swarm Intelligence
2.Beni
3.Kzadi
4.Ekanayak
5.Kim
6.Hashimoto
7.Gazi

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

چرا که تمایل به تجمع، آنها را مجبور می‌سازد تا ابتدا به دیگر اعضای توده ملحق شوند و پس از آن به سمت نقطه‌ی هدف حرکت نمایند.

در این مقاله با استفاده از روش انرژی، بر اساس معادله‌ی لاگرانژ که مبنای آن سرعت به جای نیرو می‌باشد، الگوریتم جدیدی درقالب یک معادله دینامیکی برای حرکت توده ربات ها طراحی شده است. در این الگوریتم معادله حرکت کل توده توصیف می‌شود، بطوریکه معادله حرکت نهایی مشابه به معادله بدست آمده از روش نیوتن می‌باشد. علت به کارگیری روش لاگرانژ به جای روش نیوتن، استفاده از توابع انرژی پتانسیل مجازی است. در مدل ارائه شده در این مقاله اعضای توده دارای جرم می‌باشند. همچنین با تغییر پارامتر دافع از سمت اعضاء به یکدیگر می‌توان برای هر عضو نیز ابعاد درنظر گرفت. با استفاده از سوئیچی که برای هر مانع در نظر گرفته می‌شود به سادگی می‌توان ابعاد موانع را تغییر داد. همچنین عامل دافع جهت عدم برخورد با موانع، از مرکز مانع به هر عضو اعمال می‌شود که این عمل پیچیدگی در محاسبات را کاهش می-دهد، چرا که به جای استفاده از انتگرال، از یک بردار استفاده می‌شود و به موازات آن سرعت محاسبات در حافظه‌ی ربات‌ها افزایش می‌یابد. در حالی که در سایر مدل‌های ارائه شده، همانطور که در مقدمه بیان شد(موارد [۸] و [۱۵])، عامل دافع از سمت موانع در صورتی که موانع دارای ابعاد باشند، به صورت انتگرال روی بردار نرمال سطح هر مانع تعریف می‌شود که به مراتب پیچیدگی در محاسبات را در حافظه‌ی ربات‌ها افزایش می‌دهد. در مدلی که موانع در آن به صورت نقطه‌یی در نظر گرفته شده است(مورد [۱۸])، عامل دافع به صورت توابع نمایی در نظر گرفته می‌شود، که این امر سبب شده تا اعضاء در فواصل دورتری از موانع دفع شوند. در حالی که روش پیشنهادی در این مقاله، یعنی اعمال سوئیچ حول محدوده‌ی هر مانع، باعث می‌شود تا اعضاء از فاصله‌ی نزدیکتری نسبت به موانع عبور نمایند. بنابراین اعضاء محدوده‌ی بیشتری را در طول حرکت پوشش می‌دهند. موانع موجود در مسیر حرکت را می‌توان طوری در نظر گرفت که روی یکدیگر اثر همپوشانی داشته باشند، در این صورت موانع باشکل‌های متفاوت را می‌توان ایجاد نمود. موارد ذکر شده برتری الگوریتم ارائه شده در این مقاله نسبت به مدل ارائه شده توسط کیم و همکاران[۱۶]، گیزی[۱۷] و [۱۸]، ایکاناياک[۱۵] و هاشیموتو و همکاران[۸] می‌باشد. الگوریتم طراحی شده در قالب یک معادله دینامیکی بهینه‌سازی می‌شود. هدف از بهینه‌سازی، ایجاد پوشش مناسب فضای حرکتی می‌باشد، که به موازات آن کاربری الگوریتم پیشنهادی افزایش می‌یابد. بهینه‌سازی به نحوی صورت می‌گیرد که تمایل به تجمع در اعضای توده تنها حول نقطه‌ی هدف انجام شود. این امر سبب می‌شود تا اعضاء در طول مسیر حرکت با آزادی عمل بیشتر در انتخاب مسیر، فضای بیشتری را پوشش دهند. در حالی که در مدل ارائه شده توسط گیزی[۱۷] و [۱۸] و هاشیموتو و همکاران[۸]، تمایل به تجمع از ابتدای حرکت توده وجود دارد.

در ادامه در این مقاله، در بخش (۲) به ارائه فرضیات اساسی در طراحی الگوریتم جدید پرداخته می‌شود و همچنین مختصات و معادلات کلی حرکت برای توده ربات‌ها بیان می‌شود. در بخش (۳) طراحی الگوریتم حرکتی با استفاده از معادله‌ی بدست آمده از بخش قبل به صورت هدف دار صورت می‌پذیرد به نحوی که در آن عدم برخورد با موانع موجود در مسیر حرکت و حرکت در صورت عدم تمایل به تجمع طراحی می‌شود. در بخش (۴)، الگوریتم طراحی شده شبیه‌سازی و صحه گذاری می‌شود و در نهایت در بخش (۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه می‌شود.

۲- مختصات عمومی و فرضیات کلی برای اعضای توده

در این بخش به ارائه فرضیات کلی در مورد اعضاء و حرکت توده پرداخته می‌شود. همچنین مختصات و معادلات کلی حرکت که الگوریتم جدید بر مبنای آن توسعه می‌یابد برای تفسیر بهتر بیان می‌شوند. اعضای توده‌ی مورد نظر دارای فرضیاتی به صورت زیر می‌باشند.

- هر عضو به صورت جرم متمرکز در نظر گرفته شده است.
- هر عضو موقعیت سایر اعضاء و موانع موجود بر مسیر حرکت را می‌داند.
- تاخیری در دریافت اطلاعات توسط اعضاء وجود ندارد.
- موقعیت اعضاء و موانع موجود در مسیر حرکت، توسط دستگاه مختصات عمومی[1] برای هر عضو تعریف شده است.

فرض‌های در نظر گرفته شده را می‌توان در فضاهای کوچک مثلا اتاق، توسط دوربین‌هایی که موقعیت اعضاء، موانع و نقطه‌ی هدف را شناسایی می‌کنند، ایجاد نمود. پس از شناسایی موارد ذکر شده، تمامی مختصات داده شده به صورت اطلاعات ورودی در الگوریتم پیشنهادی و یا مدل دینامیکی ارائه شده، قرار می‌گیرد، سپس معادله حرکت در حافظه‌ی ربات‌ها به صورت عددی حل می‌شود و نهایتاً مسیر حرکت هر عضو تعریف می‌شود، پس در این مرحله مسیر حرکت برای اعضای توده‌ی مورد نظر مشخص می‌شود. بنابرین امکان پیاده سازی چنین

1.Global coordinate

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

الگوریتمی وجود دارد، همچنین اگر حرکت در فضاهای بزرگ باشد، آنگاه می‌توان این فرضیات را توسط GPS[1] و یا UAV[2] ایجاد نمود.

موقعیت هر عضو توده در سه بعد در دستگاه کارتزین توسط $P_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ مشخص می‌شود. در معادله لاگرانژ، $q_i = P_i$ و $\dot{q}_i = v_i$ در نظر گرفته می‌شود، که در آن v_i نشان دهنده‌ی سرعت هر عضو می‌باشد. انرژی جنبشی به صورت $K_i(\dot{q}_i) = \frac{1}{2} m_i \dot{q}_i^T \dot{q}_i$ تعریف می‌شود که در آن m_i جرم هر عضو است. پس برای مجموع اعضای توده، انرژی جنبشی به صورت معادله‌ی (۱) بیان می‌شود.

$$K(\dot{q}) = \sum_{i=1}^{N} K_i(\dot{q}_i) = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} m_i \dot{q}_i^T \dot{q}_i = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} m_i v_i^T v_i \quad (۱)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K_i(\dot{q}_i)}{\partial \dot{q}_i}\right) = m_i \ddot{q}_i = m_i \dot{v}_i$$

توجه به این نکته ضروری است که انرژی پتانسیل در سیستم‌های بیولوژیکی داری منابع ملموس است، اما در مهندسی توده و رباتیک، انرژی پتانسیل را می‌توان به صورت مجازی برای هر یک از اعضاء و یا کل توده تعریف کرد[۱۸].

همانطور که اساس قانون دوم نیوتن نیرو می‌باشد، اساس معادله لاگرانژ انرژی است. لاگرانژیین عضو i مطابق با معادله‌ی (۲) است که پس از اعمال نتیجه‌ی معادله (۱) در آن، نتیجه به صورت معادله‌ی (۳) حاصل می‌شود. که در آن $p_i(q)$ نشان دهنده‌ی انرژی پتانسیل و Q_i مجموع عوامل ناپایستار می‌باشد[۱۸].

$$L_i(q, \dot{q}_i) = K_i(\dot{q}_i) - p_i(q) \quad (۲)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L_i}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L_i}{\partial q_i} = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K_i(\dot{q}_i)}{\partial \dot{q}_i}\right) + \frac{\partial p_i(q)}{\partial q_i} = Q_i \quad (۳)$$

با اعمال $m_i = 1$ برای همه‌ی اعضاء و همچنین $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K_i(\dot{q}_i)}{\partial \dot{q}_i}\right)$ که نتیجه‌ی معادله‌ی (۲) می‌باشد، معادله (۴) به صورت زیر حاصل می‌شود[۱۸].

$$\ddot{q}_i = Q_i - \frac{\partial p_i(q)}{\partial q_i} \quad (۴)$$

معادله (۴) معادله دیفرانسیلی است که می‌توان آن را با روش‌های عددی به سادگی حل نمود. تا بدین جا معادله دینامیکی برای حرکت توده‌ی ربات‌ها از معادله‌ی لاگرانژ نتیجه شده است. حال برای ایجاد حرکت هدف دار باید ترم $\frac{\partial p_i(q)}{\partial q_i}$ در معادله (۴) به نحوی طراحی و انتخاب شود که هدف مورد نظر را اغنا نماید. بنابراین در بخش بعد انرژی‌های پتانسیل مورد نیاز طراحی و در رابطه‌ی (۴) اعمال خواهد شد.

۳- طراحی الگوریتم جدید حرکت توده ربات‌ها بر مبنای عدم برخورد با مانع و عدم تمایل به تجمع

در این بخش طراحی الگوریتم جدید، برای حرکت توده ربات‌ها بر مبنای عدم برخورد با موانع در سه بعد انجام می‌شود. ابتدا حرکت توده‌ی ربات‌ها در صورت تمایل به تجمع ارائه می‌شود، سپس با طراحی ترم پتانسیل اعمال شده از جانب مانع به اعضاء، الگوریتم توسعه می‌یابد تا در شرایط بهینه، یعنی پوشش بیشتر فضای حرکتی توسط سوئیچی که تمایل به تجمع را فعال و غیر فعال می‌سازد، الگوریتم ارائه شود.

۳-۱ حرکت توده ربات‌ها در صورت وجود تمایل به تجمع

انرژی پتانسیل $p_i(q)$ می‌تواند دارای مولفه‌های متنوعی باشد که تاثیرات مختلفی را بر حرکت توده ایجاد نماید. از آنجایی که هدف از طراحی الگوریتم تجمع توده در نقطه‌ی هدف می‌باشد، بنابراین انرژی پتانسیل برای ایجاد تجمع در صورت عدم برخورد اعضاء با یکدیگر یعنی $p_a(q_i)$ و حرکت به سمت نقطه‌ی هدف یعنی $p_e(q_i, C_e)$، به صورت معادله‌های (۵) و (۶) طراحی شده است[۱۸].

$$p_a(q_i) = \sum_{j=1, j\neq i}^{N} \left[\frac{a}{2}\|q_i - q_j\|^2 - \frac{bc}{2} exp\left(-\frac{\|q_i - q_j\|^2}{c}\right)\right] \quad (۵)$$

$$p_e(q_i, C_e) = \frac{A_e}{2}\|q_i - C_e\|^2 \quad (۶)$$

که در آن $p_a(q_i)$ تابع پتانسیل برای ایجاد تجمع و تضمین عدم برخورد اعضاء با یکدیگرمی‌باشد (ترم خطی تجمع را ایجاد می‌کند و ترم نمایی عدم برخورد با یکدیگر را تضمین می‌نماید). $p_e(q_i, C_e)$ تابع پتانسیل جاذب به سمت نقطه‌ی هدف می‌باشد که در آنها a پارامتر عامل تجمع توده، c, b پارامترهای عامل دافع از هر عضو به سایر اعضاء برای تضمین عدم برخورد اعضاء با یکدیگر و A_e پارامتر عامل جاذب به سمت نقطه‌ی هدف می‌باشد. این پارامترها با شرط $a, b, c > 0$, $b > a$ و $A_e > 0$ طراحی و انتخاب می‌شوند. C_e نقطه‌ی هدف است که اعضاء به سمت آن حرکت خواهند کرد و N تعداد اعضای توده‌ی ربات‌ها می‌باشد. بنابراین $p_i(q) = p_a(q_i) + p_e(q_i, C_e)$ می‌باشد که با اعمال آن در معادله (۴) و لحاظ کردن $Q_i = -k\dot{q}_i\|\dot{q}_i\|$ به عنوان عامل میرا

1.Global Positioning System
2.Unmanned Aerial Vehicle

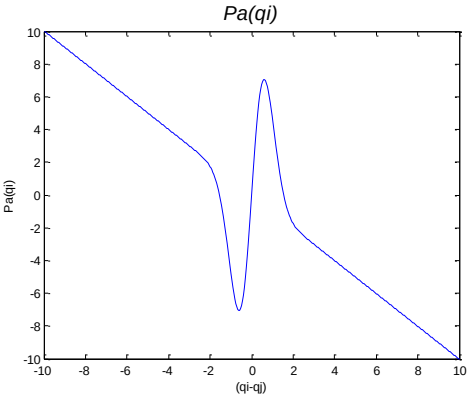
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

کننده جهت توقف اعضاء در نقطه‌ی هدف، معادله حرکت به صورت معادله (۷) حاصل می‌شود[۱۸].

$$\ddot{q}_i = Q_i \qquad (۷)$$

$$-\left(\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left[a - b\,exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)\right]\times(q_i-q_j) + A_e(q_i-C_e)\right)$$

رفتار عامل تجمع حول مرکز یعنی رابطه‌ی $\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left[a - b\,exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)\right]\times(q_i-q_j)$ در شکل ۱ با در نظر گرفتن $a=1$، $c=0.8$ و $b=20$ نشان داده شده است.



شکل ۱: رفتار ترم تجمع(بی بعد)

حرکت توده تحت تاثیر معادله (۷) به نحوی است که ابتدا در راستای کاهش ترم $\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left[a - b\,exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)\right]\times(q_i-q_j)$ عمل می‌نماید. که در نتیجه‌ی آن اعضای توده حول مرکز توده تجمع را ایجاد کنند و سپس توده با تمایل به کاهش انرژی و به دنبال آن کاهش ترم $A_e(q_i-C_e)$ به سمت نقطه‌ی هدف حرکت می‌نماید و نهایتاً تحت تاثیر عامل میرا کننده‌ی Q_i متوقف می‌شود. در بخش بعد معادله‌ی (۷) به نحوی تعمیم داده می‌شود که عدم برخورد با مانع نیز تضمین گردد.

۳-۲ حرکت در محیط با وجود مانع

در ادامه، حرکت توده‌ی ربات‌ها در صورت وجود مانع نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین باید عدم برخورد اعضای توده با موانع موجود در مسیر حرکت تضمین شود. لذا اعمال یک عامل دافع از سمت موانع مد نظر قرار می‌گیرد. در ابتدا، محدوده‌ی هر مانع توسط یک کره تخمین زده می‌شود. در این حالت حرکت پایدار برای توده‌ی ربات‌ها زمانی ایجاد می‌شود که اعضاء برخوردی با سطح کره نداشته باشند. در الگوریتم طراحی شده برای ایجاد حرکت پایدار، محدوده‌ی دیگری با نام محدوده‌ی دافع، به صورت کره با مرکز همان کره‌یی که محدوده‌ی مانع با آن تخمین زده شده است، فرض می‌شود که شعاعی بزرگتر از کره‌ی تخمینی برای مانع را دارد. هرگاه هر عضوی از توده داخل این محدوده قرار گیرد، عامل دافع از سمت مرکز کره به آن اعمال می‌شود تا در نتیجه‌ی آن عدم برخورد عضو با مانع ایجاد شود. به عبارت دیگر روی سطح کره بزرگتر سوئیچی قرار می‌گیرد تا در لحظه‌یی که هر عضو وارد محدوده‌ی دافع می‌شود، عامل دافع فعال گردد که این سازوکار روشی جدید و منحصر به فرد در ایجاد پایداری در حرکت توده‌ی ربات‌ها در رابطه با موضوع عدم برخورد با موانع موجود در مسیر حرکت می‌باشد. چرا که تا به حال، در الگوریتم‌های پیشنهادی پیشین (موارد [۸]، [۱۵] و[۱۸])، عوامل یا نیروهایی به صورت انتگرال روی سطح مانع تعریف شده و یا مانع به صورت جرم متمرکز در نظر گرفته شده است که به مراتب پیچیدگی محاسبات در آنها زیاد بوده و به موازات آن سرعت محاسبات در حافظه‌ی ربات‌ها نیز افزایش می‌یابد. در این الگوریتم‌ها عوامل دافع از سمت موانع معمولا به صورت توابع نمایی یا مجانب‌دار طراحی شده‌اند. این امر سبب شده است تا اعضایی که در فواصل دور از موانع نیز تحت تاثیر این عوامل قرار گیرند. هر چند که این تاثیر کوچک است، اما می‌تواند تا حدودی عضو را از مسیر مستقیم، که کوتاه‌ترین مسیر ممکن برای رسیدن به سمت نقطه‌ی هدف می‌باشد، منحرف سازد. اما در الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، عضو تنها لحظه‌یی از مسیر حرکت خود منحرف می‌شود که در محدوده‌ی دافع تعریف شده برای هر مانع قرار گیرد. همچنین در الگوریتم‌های پیشین از آنجایی که عوامل دافع به صورت توابع نمایی و مجانب‌دار می‌باشد. لذا برای هر مانع با اندازه‌های متفاوت باید پارامترهای تعیین کننده‌ی شدت عامل دافع به صورت جدا گانه تعریف شوند. در صورتی که در الگوریتم طراحی شده در این مقاله شبیه‌سازی برای موانع با اندازه‌های متفاوت با پارامترهای یکسان برای تمامی موانع انجام خواهد شد. تابع پتانسیل اعمالی از سمت مانع در الگوریتم طراحی شده به صورت معادله‌ی (۸) طراحی و انتخاب می‌شود.

$$p_{ok}(q_i, C_{ok}) = \sum_{k=1}^{M}\left[\frac{A_o}{2}\|q_i - C_{ok}\|^2\right] \qquad (۸)$$

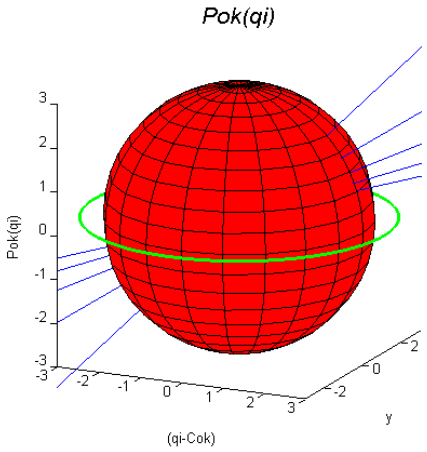
که در آن M تعداد موانع موجود در فضای حرکت، C_{ok} مرکز کره‌یی که مانع با آن تخمین زده شده و A_o پارامتر عامل دافع از جانب مرکز کره می‌باشد. گرادیان (۸) به صورت معادله‌ی (۹) حاصل می‌شود.

$$\frac{\partial p_o(q)}{\partial q_i} = \frac{\partial p_{ok}(q)}{\partial q_i} = \sum_{k=1}^{M}[A_o(q_i - C_{ok})] \qquad (۹)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

رفتار عامل دافع معادله‌ی (۹) از جانب مانع و تاثیر تغییر پارامتر A_o، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل۲: تاثیر تغییر پارامتر A_o و رفتار عامل دافع (۸) (بی بعد)

در شکل۲ دایره‌ی رسم شده حول کره، در اصل همان کره با شعاع بزرگتر است که پیش‌تر با نام محدوده‌ی دافع معرفی شده است و خط‌های مورب نشان دهنده‌ی مقادیر عامل دافع از جانب مرکز کره به اعضاء می‌باشد (که با توجه به تغییر پارامتر A_o رسم شده‌اند). عامل دافع در فاصله‌ای بیشتر از دایره‌ی رسم شده حول کره‌ی تخمینی دارای مقدار می‌باشد که در نتیجه‌ی آن روی اعضای موجود در بیرون از آن تاثیر می‌گذارد. لذا باید سوئیچی طراحی شود که در صورت وجود عضو در داخل محدوده‌ی دافع، عامل دافع را فعال نماید و لحظه‌یی که عضو از دایره خارج می‌شود، عامل دافع غیر فعال شود. در نتیجه در الگوریتم جدید، سوئیچی به صورت زیر تعریف می‌شود که در آن محدوده‌ی دافع همان دایره رسم شده حول کره در شکل۲ می‌باشد (همان طور که ذکر شد، این محدوده در حقیقت یک کره با همان مرکز کره‌ی تخمینی می‌باشد. اما برای نمایش و درک بهتر به صورت دایره رسم شده است). این سوئیچ بصورت زیر طراحی و بیان می‌شود.

$$neo(q_i, C_o) = \begin{cases} 1 & \text{عضو داخل محدوده دافع باشد} \\ 0 & \text{عضو داخل محدوده دافع نباشد} \end{cases}$$

با اعمال ضریب $neo(q_i, C_o)$ عامل دافع از مانع به صورت معادله‌ی (۱۰) نتیجه می‌شود. که در آن $neo(q_i, C_o)$ ضریب فعال ساز عامل دافع از سمت مانع است.

$$\frac{\partial p_{ok}(q)}{\partial q_i} = \sum_{k=1}^{M} \left(neo_k(q_i, C_{ok})\right)[A_o(q_i - C_{ok})] \qquad (۱۰)$$

در نهایت معادله حرکت کل توده به صورت معادله‌ی (۱۱) است، که با جایگذاری گرادیان‌های مربوط به هر ترم، نتیجه به صورت (۱۲) باز نویسی می شود.

$$\ddot{q}_i = Q_i - \left(\frac{\partial p_i(q)}{\partial q_i} + \frac{\partial p_e(q)}{\partial q_i} - \frac{\partial p_{ok}(q)}{\partial q_i}\right) \qquad (۱۱)$$

$$\ddot{q}_i = -k\dot{q}_i\|\dot{q}_i\| - \left(\{\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left[a - b\,exp\left(-\frac{\|q_i - q_j\|^2}{c}\right)\right] \times (q_i - q_j)\} + A_e(q_i - C_e) - \sum_{k=1}^{M}\left(neo_k(q_i, C_{ok})\right)[A_o(q_i - C_{ok})]\right) \qquad (۱۲)$$

بر اساس معادله‌ی (۱۲) هرگاه عضوی در محدوده‌ی دافع یک مانع قرار گیرد، ترم عامل دافع در آن فعال می‌شود. که سبب افزایش انرژی در حرکت توده می‌شود و معادله در راستای افزایش ترم $\sum_{k=1}^{M}\left(neo_k(q_i, C_{ok})\right)[A_o(q_i - C_{ok})]$ عمل می‌نماید و در نتیجه‌ی آن عضو از مانع دور می‌شود.

حال از آنجایی که هدف نهایی تجمع در نقطه‌ی هدف می‌باشد. لذا می‌توان الگوریتم را به نحوی تعمیم داد که توده در مسیر حرکت تمایلی به تجمع نداشته باشد و تنها حوالی نقطه‌ی هدف تجمع صورت گیرد. انتظار می‌رود که اعضاء در صورت نداشتن تمایل به تجمع در طول مسیر حرکت، آزادی عمل بیشتری را در انتخاب مسیر حرکت داشته باشند. بنابراین در بخش بعد سوئیچی طراحی می‌شود که ترم تمایل به تجمع را حوالی نقطه‌ی هدف فعال نماید.

۳-۳ طراحی سوئیچ فعال کننده ترم تمایل به تجمع

در الگوریتم ارائه شده مطلوب تجمع توده در نقطه‌ی هدف است. در معادله‌ی بدست آمده از قسمت قبل، ترم تمایل به تجمع در شروع حرکت فعال است، که در نتیجه‌ی آن توده ابتدا تمایل به تجمع را در شروع حرکت دارد و سپس به سمت نقطه‌ی هدف حرکت می‌نماید. این امر سبب می‌شود که اعضاء هنگامی که به یک مانع می‌رسند فقط و فقط از یک سمت آن حرکت نمایند که در نتیجه‌ی آن عضوی که تمایل به عبور از کنار مانع را دارد، ابتدا باید به توده ملحق شود و سپس از کنار مانع عبور نماید. اما حرکت به نحوی دیگر نیز قابل اجرا است و آن هم به این صورت است که توده در مسیر حرکت تمایل به تجمع را نداشته باشد که در این صورت اعضاء با آزادی عمل بیشتری حرکت خواهند کرد و فضای بیشتری را در حرکت خود پوشش خواهند داد و پس از

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

قرار گیری حوالی نقطه‌ی هدف، تمایل به تجمع فعال می‌شود. این سازوکار نیز در الگوریتم جدید ارائه شده در این مقاله نسبت به الگوریتم‌های پیشین، منحصر به فرد می‌باشد. پس ابتدا محدوده‌ی تجمع توده حوالی نقطه‌ی هدف در قالب قضیه ۱ تعریف و اثبات می‌شود.

قضیه ۱- اگر اعضای توده تمایل به تجمع به سمت یکدیگر را نداشته باشند، آنگاه همه‌ی اعضای توده در محدوده‌ی نابرابری (۱۳) قرار می‌گیرند.

$$\|e_{cei}\| \leq \frac{1}{D}\frac{(N-1)}{NA_e}\left(b\left(\sqrt{\frac{c}{2}}\right)exp\left(-\frac{1}{2}\right)\right) \quad (۱۳)$$

که در آن D بعد فضای حرکت توده‌ی ربات‌ها می‌باشد.

اثبات قضیه ۱- معادله حرکت توده تحت تاثیر عامل دافع جهت عدم برخورد اعضاء با یکدیگر و عامل جاذب از سمت نقطه هدف به صورت معادله‌ی (۱۴) باز نویسی می‌شود.

$$\ddot{q}_i = -k\dot{q}_i\|\dot{q}_i\| \quad (۱۴)$$

$$\left(\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left[-b\,exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)\right]\times(q_i-q_j)+A_e(q_i-C_e)\right)$$

با توجه به معادله‌ی دینامیکی فوق، محل توقف اعضاء در محدوده‌یی است که $\ddot{q}_i = 0$ و $\dot{q}_i = 0$ باشد. بنابراین عبارت داخل پرانتز به صورت معادله‌ی (۱۵) برابر با صفر قرار داده شود.

$$\left(\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left[-b\,exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)\right]\times(q_i-q_j)+A_e(q_i-C_e)\right)=0 \quad (۱۵)$$

عبارت $\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left[b\,exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)\right]\times(q_i-q_j)$ دارای مقدار حداکثری است که در $\sqrt{\frac{c}{2}}$ اتفاق می‌افتد (این مقدار با مشتق گیری از عبارت $\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left[b\,exp\left(-\frac{\|y\|^2}{c}\right)\right]\times(y)$ بدست می‌آید، یعنی مقدار حداکثر این عبارت است). با اعمال این مقدار، عبارت (۱۵) به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\left(\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left[-b\,exp\left(-\frac{\sqrt{\frac{c}{2}}^2}{c}\right)\right]\times\left(\sqrt{\frac{c}{2}}\right)+A_e(q_i-C_e)\right)=0$$

فاصله‌ی حداکثر $(q_i - C_e)$ برای دورترین عضو در یک بعد N برابر می‌شود. پس:

$$\left((N-1)\left[-b\,exp\left(-\frac{1}{2}\right)\right]\times\left(\sqrt{\frac{c}{2}}\right)+N\times A_e(q_i-C_e)\right)=0$$

$$(q_i-C_e)=\frac{(N-1)}{N\times A_e}\left(b\left(\sqrt{\frac{c}{2}}\right)exp\left(-\frac{1}{2}\right)\right)$$

اما چون فضای حرکت توده‌ی ربات‌ها بیشتر از یک بعد است، پس می‌توان محدوده را برای D بعد به صورت زیر محدود کرد:

$$\|e_{cei}\| \leq \frac{1}{D}\frac{(N-1)}{N\times A_e}\left(b\left(\sqrt{\frac{c}{2}}\right)exp\left(-\frac{1}{2}\right)\right)$$

بنابراین فاصله‌ی هیچ یک از اعضاء تا نقطه‌ی هدف بیشتر از سمت راست نابرابری (۱۳) نخواهد شد. در نتیجه محدوده‌ی قرار گیری اعضاء در صورت عدم وجود عامل تمایل به تجمع بدست آمده است.▲

لازم به ذکر است که محدوده‌ی فوق یک محدوده‌ی تقریبی و با ضریب اطمینان بالا است. و از آنجایی که مقدار فاصله‌ی دور ترین عضو تا نقطه‌ی هدف به صورت دقیق قابل محاسبه نیست، بنابراین پارامترهای A_e ، b و c به صورت تابعی از تعداد اعضاء انتخاب می‌شوند که این انتخاب نیز براساس شبیه سازی و آزمایش باید صورت گیرد.

در قضیه‌ی زیر همگرایی اعضاء به سمت نقطه‌ی هدف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

قضیه ۲- اگر توده‌ی ربات‌ها تمایل به تجمع حول یکدیگر را نداشته باشند، آنگاه اعضای توده با حرکتی پایدار به سمت نقطه‌ی هدف همگرا می‌شوند.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

اثبات قضیه۲- معادله حرکت توده تحت تاثیر عامل دافع جهت عدم برخورد اعضاء با یکدیگر و عامل جاذب از سمت نقطه هدف به صورت معادله‌ی زیر باز نویسی می‌شود.

-

$$\ddot{q}_i = -k\dot{q}_i\|\dot{q}_i\| - \left(\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left[-b\,exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)\right]\times (q_i-q_j) + A_e(q_i-C_e)\right)$$

تابع لیاپانوف به صورت زیر انتخاب می‌شود.

$$V_i = \frac{a}{2}e_{1i}{}^{\mathsf{T}}e_{1i} + \frac{1}{2}e_{2i}{}^{\mathsf{T}}e_{2i} = \frac{a}{2}\|e_{1i}\|^2 + \frac{1}{2}\|e_{2i}\|^2$$

که در آن معادلات حالت به صورت زیر است.

$$\dot{q}_{1i} = q_{2i} = \dot{e}_{1i} = e_{2i}$$

$$\ddot{q}_{1i} = \dot{q}_{2i} = \dot{e}_{2i}$$

$$\dot{q}_{2i} = -k\dot{q}_{1i}\|\dot{q}_{1i}\| + b\sum_{j=1,j\neq i}^{N} exp\left(-\frac{\|q_{1i}-q_{1j}\|^2}{c}\right)(q_{1i} - q_{1j}) + A_e(q_i - C_e)$$

با مشتق گیری از تابع لیاپانوف انتخاب شده در مسیر حرکت اعضای توده، عبارت زیر حاصل خواهد شد.

$$\dot{V}_i = [a\dot{e}_{1i}{}^{\mathsf{T}}e_{1i} \quad \dot{e}_{2i}{}^{\mathsf{T}}e_{2i}]$$

$$\dot{e}_{1i}{}^{\mathsf{T}} = e_{2i}{}^{\mathsf{T}}$$

$$\dot{e}_{2i}{}^{\mathsf{T}} = \dot{q}_{2i}{}^{\mathsf{T}}$$

$$\dot{V}_i = [ae_{1i} \quad e_{2i}]\times$$

$$\left[-k\dot{q}_{1i}\|\dot{q}_{1i}\| + b\sum_{j=1,j\neq i}^{N} exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)(q_i-q_j)^{\mathsf{T}} - \right. \quad e_{2i}{}^{\mathsf{T}}$$

$$= -k\dot{q}_{1i}\|\dot{q}_{1i}\|e_{2i} + ae_{1i}e_{2i}{}^{\mathsf{T}} + b\sum_{j=1,j\neq i}^{N} exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)(q_i - q_j)^{\mathsf{T}}e_{2i} - A_e(q_i-C_e)^{\mathsf{T}}e_{2i}$$

از آنجایی که به ازای همه‌ی q_i و q_j ترم $b\,exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right) >$ 0 است. پس $\dot{V}_i$ را می‌توان به صورت زیر محدود کرد.

$$\dot{V}_i \leq -k\|\dot{q}_{1i}\|\|\dot{q}_{1i}\|\|e_{2i}\| + a\|e_{1i}\|\|e_{2i}\| + b\sum_{j=1,j\neq i}^{N} exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)\|q_i - q_j\|\|e_{2i}\| - A_e\|q_i - C_e\|\|e_{2i}\|$$

$$\dot{V}_i \leq -\left[k\|\dot{q}_{1i}\|^2 - a\|e_{1i}\| - b\sum_{j=1,j\neq i}^{N} exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)\|q_i - q_j\| + A_e\|q_i - C_e\|\right]\|e_{2i}\|$$

عبارت $k\|\dot{q}_{1i}\|^2$ همیشه مثبت می‌باشد. تابع تجمع، یعنی $-a\|e_{1i}\| - b\sum_{j=1,j\neq i}^{N} exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)\|q_i - q_j\|$ دارای مقدار حداقلی به اندازه‌ی $\|q_i - q_j\| = \delta$ است. این مقدار حداقل، برابر با فاصله‌یی است که با مساوی صفر قرار دادن عبارت $p_a(q_i)$ نتیجه می‌شود که حاصل آن دارای دو مقدار $\{\|q_i - q_j\| = 0 \; or \; \|q_i - q_j\| = \sqrt{c\,ln(b)} = \delta\}$ است و چون اعضاء روی یکدیگر قرار نمی‌گیرند تا مقدار $\|q_i - q_j\| = 0$ حاصل شود، بنابراین مقدار حداقل برابر با δ است. با در نظر گرفتن این موضوع، نتیجه‌ی زیرحاصل می‌شود:

$$\dot{V}_i \leq -\left[k\|\dot{q}_{1i}\|^2 - a\delta - b\,(N-1)\square\, exp\left(-\frac{\delta^2}{c}\right) + A_e\|q_i - C_e\|\right]$$

$$\dot{V}_i \leq -\left[k\|\dot{q}_{1i}\|^2 - a\delta - (N-1)b\square\, exp\left(-\frac{\sqrt{c\,ln(b)}^2}{c}\right) + A_e\|q_i - C_e\|\right]\|e_{2i}\|$$

$$\dot{V}_i \leq -\left[k\|\dot{q}_{1i}\|^2 - a\delta - b\square\left(\frac{1}{b}\right) + A_e\|q_i - C_e\|\right]\|e_{2i}\|$$

$$\dot{V}_i \leq -\left[k\|\dot{q}_{1i}\|^2 - a\delta - \square + A_e\|q_i - C_e\|\right]\|e_{2i}\|$$

$$\dot{V}_i \leq -\left[k\|\dot{q}_{1i}\|^2 - \square(a+1) + A_e\|q_i - C_e\|\right]\|e_{2i}\|$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

مشتق تابع لیاپانوف در مسیر حرکت هر عضو با شرط $k\|\dot{q}_{1i}\|^2 + A_e\|q_i - C_e\| > (a+1)$ منفی معین است. پس معادله حرکت ارائه شده در جهت کاهش انرژی و به موازات آن در جهت کاهش ترم $A_e\|q_i - C_e\|$ رفتار می‌نماید. در نتیجه، اعضای توده به سمت نقطه‌ی هدف همگرا می‌شوند. ▲

در بخش بعد با شبیه‌سازی نشان داده می‌شود که توده تحت تاثیر معادله‌ی (۱۴) به سمت نقطه‌ی هدف حرکت می‌نماید و حوالی آن متوقف می‌شود و در نهایت برای هیچ یک از اعضاء، فاصله تا نقطه‌ی هدف بیشتر از نابرابری (۱۳) نمی‌شود. حال سوئیچی به صورت زیر طراحی می‌شود که ترم تمایل به تجمع را حول نقطه‌ی هدف فعال نماید.

$$nea(for\ all\ the\ q_i, C_e) = 1$$

هنگامی که همزمان برای همه‌ی اعضاء

$$\|e_{cei}\| \le \frac{1}{D}\frac{(N-1)}{N \times A_e}\left(b\left(\sqrt{\frac{c}{2}}\right)exp\left(-\frac{1}{2}\right)\right)$$

$$nea(for\ all\ the\ q_i, C_e) = 0$$

هنگامی که حتی برای یک عضو

$$\|e_{cei}\| > \frac{1}{D}\frac{(N-1)}{N \times A_e}\left(b\left(\sqrt{\frac{c}{2}}\right)exp\left(-\frac{1}{2}\right)\right)$$

سوئیچ فوق در صورتی فعال می‌شود که تمامی اعضای توده در محدوده‌ی $\|e_{cei}\| \le \frac{1}{D}\frac{(N-1)}{N \times A_e}\left(b\left(\sqrt{\frac{c}{2}}\right)exp\left(-\frac{1}{2}\right)\right)$ قرار گیرند. در نهایت معادله حرکت توده با اعمال سوئیچ فوق به صورت معادله‌ی (۱۶) باز نویسی می‌شود.

$$\ddot{q}_i = -k\dot{q}_i\|\dot{q}_i\| \qquad (۱۶)$$

$$\left(\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left[\{nea(for\ all\ the\ q_i, C_e) \times a - b\ exp\left(-\frac{\|q_i - q_j\|^2}{c}\right)\right] \times (q_i - q_j)\} + A_e(q_i - C_e) - \sum_{k=1}^{M}\left(neo_k(q_i, C_{ok})\right) * [A_o(q_i - C_{ok})]\right)$$

در الگوریتم پیشنهادی که معادله دینامیکی (۱۶) می‌باشد، توده با معادله‌ی مذکور به نحوی عمل می‌نماید که در آن اعضاء به سمت نقطه‌ی هدف حرکت می‌نمایند و در صورت نزدیک شدن بیش از حد به یکدیگر، عامل دافع جهت عدم برخورد اعضاء با یکدیگر فعال می‌شود و اعضاء را از هم دور می‌نماید تا برخوردی بین اعضاء صورت نگیرد. همچنین عدم برخورد اعضاء با موانع موجود بر مسیر حرکت نیز توسط عامل دافع از سمت موانع که با سوئیچی فعال می‌شود، تضمین شده است. نهایتا عامل تمایل به تجمع برای اعضاء، حول نقطه‌ی هدف فعال می‌شود و اعضاء پس از تجمع حول نقطه‌ی هدف متوقف می‌شوند.

در قضیه۲ پایداری حرکت در صورت عدم وجود عامل تمایل به تجمع اثبات شد، حال در ادامه پایداری معادله‌ی (۱۶) در صورت وجود عامل تمایل به تجمع اثبات می‌شود.

اثبات پایداری معادله‌ی (۱۶)- معادله‌ی (۱۶) در صورت وجود عامل تمایل به تجمع و عدم وجود مانع به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\ddot{q}_i = -k\dot{q}_i\|\dot{q}_i\| \qquad (۱۶)$$

$$-\left(\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\left[\{a - b\ exp\left(-\frac{\|q_i - q_j\|^2}{c}\right)\right] \times (q_i - q_j)\} + A_e(q_i - C_e)\right)$$

تابع لیاپانوف به صورت زیر انتخاب می‌شود.

$$V_i = \frac{a}{2}e_{1i}{}^{\mathrm{T}}e_{1i} + \frac{1}{2}e_{2i}{}^{\mathrm{T}}e_{2i} = \frac{a}{2}\|e_{1i}\|^2 + \frac{1}{2}\|e_{2i}\|^2$$

معادلات حالت به فرم زیر است.

$$\dot{q}_{1i} = q_{2i} = \dot{e}_{1i} = e_{2i}$$

$$\ddot{q}_{1i} = \dot{q}_{2i} = \dot{e}_{2i}$$

$$\dot{q}_{2i} = -k\dot{q}_{1i}\|\dot{q}_{1i}\| - aNe_{1i} + b\sum_{j=1,j\neq i}^{N} exp\left(-\frac{\|q_{1i} - q_{1j}\|^2}{c}\right)(q_{1i} - q_{1j}) + A_e(q_i - C_e)$$

با مشتق گیری از تابع لیاپانوف انتخاب شده در مسیر حرکت اعضاء، عبارت زیر حاصل می‌شود.

$$\dot{V}_i = [a\dot{e}_{1i}{}^{\mathrm{T}}e_{1i} \quad \dot{e}_{2i}{}^{\mathrm{T}}e_{2i}]$$

$$\dot{e}_{1i}{}^{\mathrm{T}} = e_{2i}{}^{\mathrm{T}}$$

$$\dot{e}_{2i}{}^{\mathrm{T}} = \dot{q}_{2i}{}^{\mathrm{T}}$$

$$\dot{V}_i = [ae_{1i} \quad e_{2i}]$$

$$* \begin{bmatrix} e_{2i}{}^{\mathrm{T}} \\ -k\dot{q}_{1i}\|\dot{q}_{1i}\| - aNe_{1i}{}^{\mathrm{T}} + b\sum_{j=1,j\neq i}^{N} exp\left(-\frac{\|q_i - q_j\|^2}{c}\right)(q_i - q_j)^{\mathrm{T}} - A_e(q_i - C_e)^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

$$= -k\dot{q}_{1i}\|\dot{q}_{1i}\|e_{2i} + ae_{1i}e_{2i}^{\top} - aNe_{1i}^{\top}e_{2i} + b\sum_{j=1,j\neq i}^{N} exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)(q_i - q_j)^{\top}e_{2i} - A_e(q_i - C_e)^{\top}e_{2i}$$

از آنجایی که ترم $b\ exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right) > 0$ به ازای همه‌ی q_i و q_j است. پس $\dot{V}_i$ می‌تواند به صورت زیر محدود باشد.

$$\dot{V}_i \leq -k\|\dot{q}_{1i}\|\|\dot{q}_{1i}\|\|e_{2i}\| - (N-1)a\|e_{1i}\|\|e_{2i}\| + b\sum_{j=1,j\neq i}^{N} exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)\|q_i - q_j\|\|e_{2i}\| - A_e\|q_i - C_e\|\|e_{2i}\|$$

$$\dot{V}_i \leq -\left[k\|\dot{q}_{1i}\|^2 + (N-1)a\|e_{1i}\| - b\sum_{j=1,j\neq i}^{N} exp\left(-\frac{\|q_i-q_j\|^2}{c}\right)\|q_i - q_j\| + A_e\|q_i - C_e\|\right]\|e_{2i}\|$$

عبارت $k\|\dot{q}_{1i}\|^2$ همیشه مثبت است. تابع تجمع نیز همیشه مثبت است، و دارای مقدار حداقلی به اندازه‌ی $\|q_i - q_j\| = \delta$ است. این مقدار حداقل، برابر با فاصله‌یی است که با مساوی صفر قرار دادن عبارت $p_a(q_i)$ در صورت وجود عامل تمایل به تجمع، نتیجه می‌شود که حاصل آن دارای دو مقدار $\|q_i - q_j\| = 0\ or\ \|q_i - q_j\| = \sqrt{c\ ln\left(\frac{b}{a}\right)} = \delta$ است و چون اعضاء روی یکدیگر قرار نمی‌گیرند تا مقدار

$\|q_i - q_j\| = 0$ حاصل شود، بنابراین مقدار حداقل برابر با δ است. با در نظر گرفتن این موضوع، نتیجه‌ی زیرحاصل می‌شود:

$$\dot{V}_i \leq -\left[k\|\dot{q}_{1i}\|^2 + (N-1)a\delta - b\ (N-1)\square\ exp\left(-\frac{\delta^2}{c}\right) + A_e\|q_i - C_e\|\right]\|e_{2i}\|$$

$$\dot{V}_i \leq -\left[k\|\dot{q}_{1i}\|^2 + (N-1)\left(a\delta - b\square\ exp\left(-\frac{\sqrt{c\ ln\left(\frac{b}{a}\right)}^2}{c}\right)\right) + A_e\|q_i - C_e\|\right]\|e_{2i}\|$$

$$\dot{V}_i \leq -\left[k\|\dot{q}_{1i}\|^2 + (N-1)\left(a\delta - b\square\ \left(\frac{a}{b}\right)\right) + A_e\|q_i - C_e\|\right]\|e_{2i}\|$$

$$\dot{V}_i \leq -[k\|\dot{q}_{1i}\|^2 + A_e\|q_i - C_e\|]\|e_{2i}\|$$

مشتق تابع لیاپانوف در مسیر حرکت هر عضو منفی معین است. پس معادله حرکت ارائه شده در جهت کاهش انرژی که به دنبال آن کاهش ترم $A_e\|q_i - C_e\|$ است، رفتار می‌نماید. در نتیجه معادله‌ی(۱۶) پایدار است.

برای درک بهتر این موضوع، شبیه‌سازی در حالت تمایل به تجمع در شروع حرکت و عدم تمایل به تجمع در شروع حرکت (در این حالت تجمع فقط حوالی نقطه‌ی هدف انجام می‌شود) در بخش بعد انجام می‌شود. همچنین برای درک بهتر، در فضای بدون مانع نیز شبیه‌سازی‌ها تکرار خواهند شد.

٤- شبیه سازی الگوریتم طراحی شده و بررسی نتایج

در این بخش با هدف بررسی کارایی و عملکرد الگوریتم جدید طراحی شده، در دو مرحله به شبیه‌سازی و بررسی نتایج در حرکت توده‌ی ربات‌ها پرداخته می‌شود. در مرحله اول با شبیه‌سازی معادلات تجمع و حرکت توده به سمت نقطه‌ی هدف، نتایج حاصل از الگوریتم ارائه شده

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

تحت شرایط اولیه بررسی می‌شود. سپس در مرحله دوم با شبیه‌سازی الگوریتم تعمیم‌یافته در حرکت توده ربات‌ها در حضور موانع، نتایج کلی الگوریتم ارائه شده بررسی می‌شود. در حالت تجربی، الگوریتم در حافظه‌ی ربات‌ها تعریف می‌شود و موقعیت‌های اولیه‌ی ربات‌ها در الگوریتم به صورت اطلاعات ورودی، وارد می‌شود، سپس الگوریتم پیشنهادی در بازه‌های زمانی مشخص در حافظه‌ی ربات‌ها به صورت عددی حل می‌شود و نهایتا مسیر حرکت ربات‌ها مشخص خواهد شد. در این پژوهش نیز شبیه‌سازی به صورت مرحله‌یی انجام می‌شود. برای درک بهتر رفتار توده در حرکت، نتایج شبیه‌سازی پنج ربات به صورت تصادفی بر حسب زمان نیز نشان داده خواهد شد.

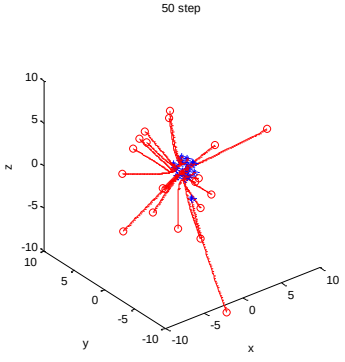
٤-١ شبیه‌سازی تجمع و حرکت به سمت نقطه‌ی هدف

شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی در فضای نرم‌افزار متلب با معادله (٧) و با انتخاب پارامترها با توجه به جدول ١ انجام شده است. تعداد اعضای توده ٢٠ عضو می‌باشد و همچنین موقعیت اولیه هر یک از اعضاء به صورت تصادفی انتخاب شده است. در این شبیه‌سازی سرعت اولیه برای تمامی اعضاء صفر در نظر گرفته شده است و اعضاء از حالت سکون شروع به حرکت می‌نمایند.

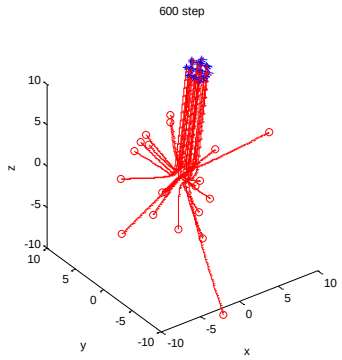
جدول١: مقادیر پارامترهای الگوریتم حرکتی

پارامتر	نماد	مقدار
جاذب به هدف	A_e	١
عدم برخورد	c	٠/٠٨
عدم برخورد	b	٢٠
تمایل به تجمع	a	١
میرایی	k	٥

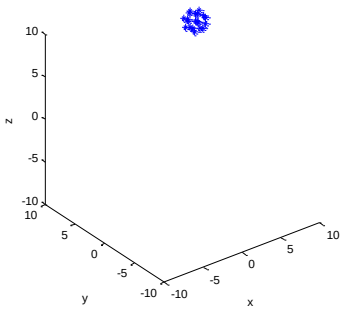
در این شبیه‌سازی، معادله با روش رانگ کوتا مرتبه ۴ با گام ٠/٠٥ حل گردیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم حرکتی در سه بعد در شکل ٣ نشان داده شده است. همچنین مختصات نقطه‌ی تجمع $C_e = \begin{bmatrix} ٧ & ٧ & ٧ \end{bmatrix}$ انتخاب شده است.



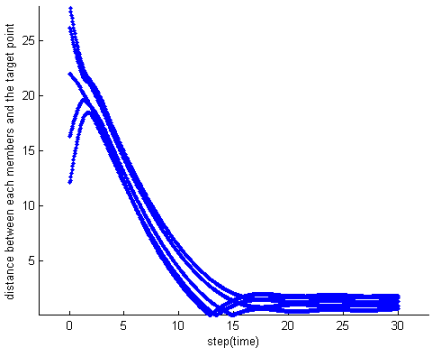
(الف) موقعیت اعضاء پس از ٥٠ مرحله



(ب) موقعیت اعضاء پس از ٦٠٠ مرحله



(ج) موقعیت نهایی اعضاء



(د) فاصله‌ی پنج عضو با نقطه‌ی هدف بر حسب زمانی

شکل٣: شبیه‌سازی حرکت توده در محیط بدون مانع در صورت تمایل به تجمع

همانطور که در شکل ٣ مشاهده می‌شود، اعضای توده با تمایل به تجمع به سمت نقطه هدف حرکت می‌نمایند و تغییرات موقعیت اعضاء با پیشرفت زمان در شکل‌های (٣-الف) و (٣-ب) در مراحل مختلف نشان داده شده است. در این شکل‌ها ضربدرها موقعیت نهایی اعضاء در هر مرحله و دایره‌های کوچک تو خالی موقعیت اولیه هر عضو و خطوط متصل از دایره‌های کوچک به ضربدرها مسیر حرکت اعضاء را نمایش می‌دهد. شکل (٣-ج) نشان دهنده‌ی موقعیت نهایی اعضاء می‌باشد. همچنین در شکل (٣-د)، برای درک بهتر، پنج عضو به صورت تصادفی از تعداد بیست عضو انتخاب شده‌اند و فاصله آنها با نقطه‌ی هدف نشان داده شده است. همانطور که در شکل (٣-د) مشاهده می‌شود، اعضاء ابتدا

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

تمایل به کاهش فاصله با یکدیگر را دارند که علت این رفتار وجود عامل جاذب بین اعضاء می‌باشد و پس از آن تمایل به کاهش فاصله تا نقطه‌ی هدف ایجاد می‌شود. از آنجایی که حرکت توده همیشه در محیط‌های بدون مانع نمی‌باشد، در نتیجه پایداری توده در صورت وجود مانع نیز باید تضمین شود. در قسمت بعد به بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده پرداخته می‌شود و نتایج شبیه‌سازی حرکت توده‌ی ربات‌ها در فضایی با مانع ارائه می‌شود.

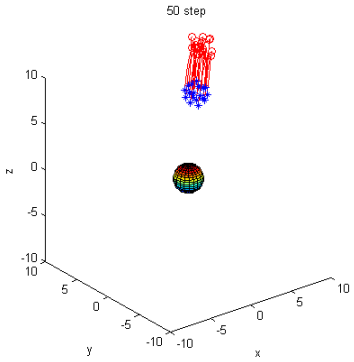
٤-١ شبیه‌سازی حرکت توده ربات ها در حضور مانع در صورت تمایل به تجمع

برای بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده، شبیه‌سازی معادله حرکت (۱۲) با توده‌ای ۲۰ عضوی انجام می‌شود که تمامی اعضاء در موقعیت‌های ابتدایی به صورت تصادفی و با سرعت اولیه صفر قرار دارند. توده مورد نظر، با تضمین عدم برخورد اعضاء با یکدیگر (توسط عامل دافع موجود بین اعضاء که سبب عدم برخورد اعضاء با یکدیگر می‌شود) و عدم ارتعاش اعضاء (توسط عامل میرا کننده) به سمت نقطه‌ی هدف یعنی C_e حرکت می‌کند و در آخر حول نقطه‌ی هدف تجمع می‌یابد. در این شبیه-سازی، در مسیر حرکت موانعی وجود دارد که با کره تخمین زده می-شوند و عدم برخورد با آنها نیز تضمین می‌شود. شبیه‌سازی حرکت توده در سه بعد با انتخاب پارامترها مطابق با جدول ۲ انجام می‌شود. همچنین محدوده‌ی فعال کننده‌ی عامل دافع برای مانعی با شعاع R_o برابر با کره‌یی به شعاع $\|R_o+1\|$ در نظر گرفته می‌شود.

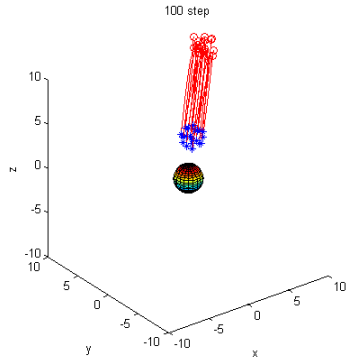
جدول۲: مقادیر پارامترهای الگوریتم حرکتی

پارامتر	نماد	مقدار
جاذب به هدف	A_e	۱
دافع از مانع	A_o	۳۰
عدم برخورد	c	۰/۸
عدم برخورد	b	۲۰
تمایل به تجمع	a	۱
میرایی	k	۵

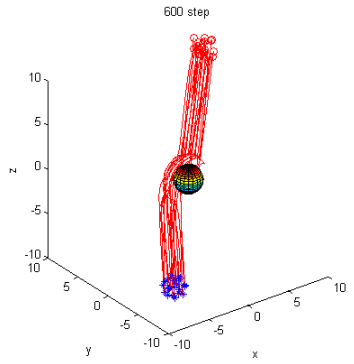
نتیجه شبیه‌سازی در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین مختصات نقطه‌ی تجمع $C_e=\begin{bmatrix}-۸ & -۸ & -۸\end{bmatrix}$ در نظر گرفته شده است.



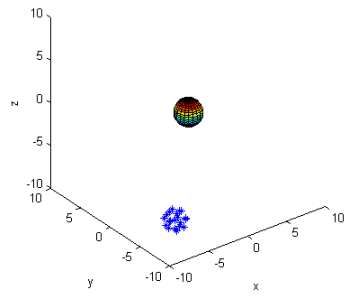
(الف) موقعیت اعضاء پس از ۵۰ مرحله



(ب) موقعیت اعضاء پس از ۱۰۰ مرحله



(ج) موقعیت اعضاء پس از ۶۰۰ مرحله



(د) موقعیت نهایی اعضاء

شکل۴: شبیه‌سازی حرکت توده در محیط با مانع در صورت تمایل به تجمع

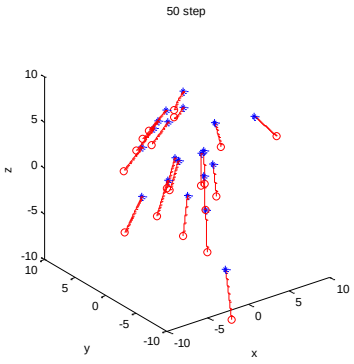
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

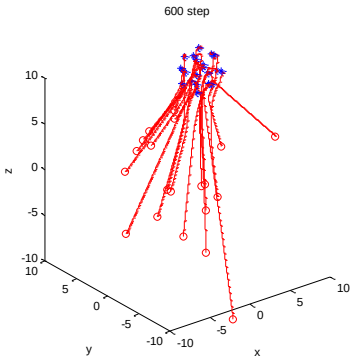
شبیه‌سازی تغییرات موقعیت اعضاء بر مبنای زمان در شکل‌های(۴-الف تا ج) در مراحل مختلف نشان داده شده است. در این شکل‌ها ضربدرها موقعیت نهایی اعضاء در هر مرحله، دایره های تو خالی موقعیت اولیه هر عضو، خطوط متصل از دایره‌های کوچک و تو خالی به ضربدر-ها مسیر حرکت اعضاء و کره، مانع موجود بر مسیر حرکت اعضاء می‌باشد. شکل (۴-د) نشان دهنده‌ی موقعیت نهایی اعضاء است. نتیجه شبیه-سازی نشان می‌دهد که با وارد شدن عضوی به محدوده‌ی مانع، عامل دافع فعال شده و سبب افزایش انرژی توده و در نتیجه‌ی آن دفع عضو از محدوده‌ی مانع می‌شود. درنتیجه، الگوریتم ارائه شده این توانایی را دارد که حرکت پایدار را برای توده‌ی ربات‌ها تضمین نماید. از طرفی مشاهده می‌شود که توده تنها از یک سمت مانع عبور کرده است و علت آن، همانطور که انتظار می‌رفت، داشتن تمایل به تجمع توده می‌باشد. در بخش بعد شبیه‌سازی معادله‌ی (۱۶) انجام خواهد شد، تا تاثیر عدم تمایل به تجمع در حرکت توده بررسی شود.

٤-٣ شبیه‌سازی حرکت به سمت نقطه‌ی هدف در صورت عدم تمایل به تجمع

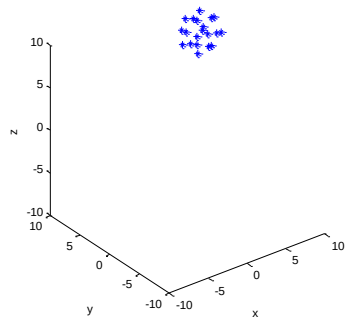
در این بخش، شبیه‌سازی به نحوی انجام می‌شود تا صحت قضیه۱ را نشان دهد (در فضای بدون وجود مانع). عملکرد الگوریتم ارائه شده با شبیه‌سازی معادله حرکت (۱۶) بررسی می‌شود، به نحوی که توده با ۲۰ عضو که در آن اعضاء در موقعیت‌های ابتدایی به صورت تصادفی با فرض سرعت اولیه صفر برای تمامی اعضاء قرار می‌گیرند. حرکت توده در سه بعد با انتخاب پارامترها مطابق با جدول۲ انجام می‌شود و همچنین مختصات نقطه‌ی تجمع $C_e = \begin{bmatrix} ۷ & ۷ & ۷ \end{bmatrix}$ در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی نیز معادله با روش رانگ کوتا مرتبه ۴ با گام ۰/۰۵ حل گردیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم حرکتی در سه بعد، در شکل ۵ نشان داده شده است.



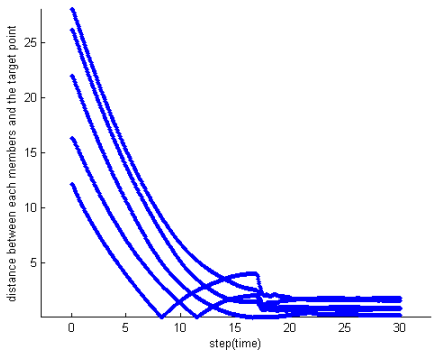
(الف) موقعیت اعضاء پس از ۵۰ مرحله



(ب) موقعیت اعضاء پس از ۶۰۰ مرحله



(ج) موقعیت نهایی اعضاء



(د) فاصله‌ی پنج عضو با نقطه‌ی هدف بر حسب مرحله‌ی زمانی

شکل۵: شبیه‌سازی حرکت توده در صورت عدم تمایل به تجمع

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، اعضای توده در ابتدا با عدم تمایل به تجمع به سمت نقطه هدف حرکت می‌کنند و تغییرات موقعیت اعضاء با پیشرفت زمان در شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) در مراحل مختلف نشان داده شده است. در این شکل‌ها ضربدرها موقعیت نهایی اعضاء در هر مرحله و دایره‌های تو خالی موقعیت اولیه هر عضو و خطوط متصل از دایره‌های توخالی به ضربدرها مسیر حرکت اعضاء می‌باشد. شکل (۵-ج) نشان دهنده‌ی موقعیت نهایی اعضاء است. همچنین در شکل (۵-د) برای درک بهتر، فاصله‌ی پنج عضو که به صورت تصادفی از تعداد بیست عضو انتخاب شده‌اند با نقطه‌ی هدف نشان داده شده است.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

همانطور که در شکل (۵-د) مشاهده می‌شود اعضاء تمایل به کاهش فاصله با یکدیگر را ندارند و از ابتدا تمایل به کاهش فاصله تا نقطه‌ی هدف را دارند که علت این رفتار عدم وجود عامل جاذب بین اعضاء می‌باشد. محدوده‌ی $\|e_{cei}\|$ طبق نابرابری (۱۵) با لحاظ شدن پارامترهای انتخابی، برابر با ۲/۴۲۹۵ است. و مقدار $\|e_{cei}\|$ در پایان شبیه‌سازی برای هر عضو در جدول۳ نشان داده شده است.

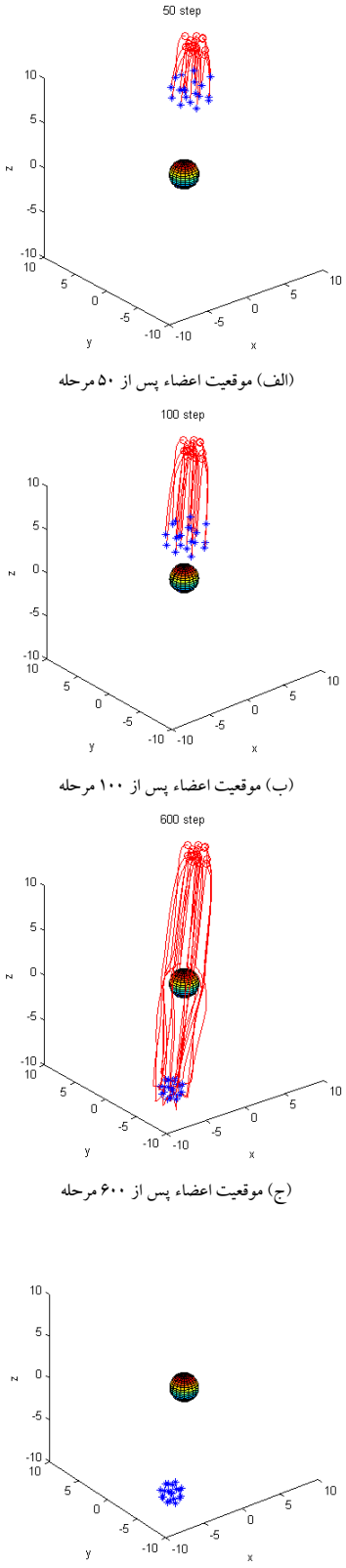
جدول۳: فاصله‌ی هر عضو تا C_e ($\|e_{cei}\|$)

شماره‌ی هر عضو	فاصله‌ی $\|e_{cei}\|$	شماره‌ی هر عضو	فاصله‌ی $\|e_{cei}\|$
۱	۱/۸۶۶۹	۱۱	۲/۲۲۷۱
۲	۰/۶۸۱۲	۱۲	۱/۸۶۳۴
۳	۲/۲۴۴۱	۱۳	۱/۹۵۱۲
۴	۲/۱۸۲۰	۱۴	۱/۹۲۶۸
۵	۲/۰۵۲۰	۱۵	۱/۹۷۸۲
۶	۰/۶۸۲۶	۱۶	۲/۱۵۶۰
۷	۲/۰۴۰۹	۱۷	۲/۲۳۵۳
۸	۲/۲۸۶۵	۱۸	۲/۲۶۸۷
۹	۲/۰۷۳۹	۱۹	۲/۲۴۸۳
۱۰	۱/۸۳۰۶	۲۰	۲/۰۹۰۸

همانطور که مشاهده می‌شود، فاصله‌ی هیچ یک از اعضاء از C_e بیشتر از ۲/۴۲۹۵ نشده است. پس محدوده‌ی همگرایی و یا به عبارت دیگر قرار گیری اعضاء در محدوده‌ی نابرابری (۱۳) در صورت عدم تمایل به تجمع اعضاء حول یکدیگر بدست آمده است. در بخش بعد مشابه همین شبیه‌سازی امّا در فضایی با وجود مانع انجام می‌شود.

٤-٤ شبیه‌سازی حرکت توده ربات ها در حضور مانع در صورت عدم تمایل به تجمع

در این بخش شبیه‌سازی رفتار توده تحت تاثیر معادله (۱۶) به نحوی انجام می‌شود که در آن توده‌ی تشکیل شده از ۲۰ عضو تمایل به تجمع را فقط در محدوده‌ی نقطه‌ی هدف داشته باشد. در نتیجه اعضاء با آزادی عمل بیشتری از کنار مانع عبور خواهند کرد. حرکت توده در سه بعد با انتخاب پارامترها مطابق با جدول ۲ انجام می‌شود. همچنین محدوده‌ی فعال کننده‌ی عامل دافع برای موانع، کره‌یی با شعاع $\|R_o + 1\|$ در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی معادله با روش رانگ کوتا مرتبه ۴ با گام ۰/۰۵ حل گردیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم حرکتی در سه‌بعد در شکل۶ نشان داده شده است. همچنین مختصات نقطه‌ی هدف برای شبیه‌سازی به صورت $C_e = \begin{bmatrix} -8 & -8 & -8 \end{bmatrix}$ در نظر گرفته شده است و سرعت اولیه اعضاء برابر با صفر می‌باشد.



(الف) موقعیت اعضاء پس از ۵۰ مرحله

(ب) موقعیت اعضاء پس از ۱۰۰ مرحله

(ج) موقعیت اعضاء پس از ۶۰۰ مرحله

(د) موقعیت نهایی اعضاء

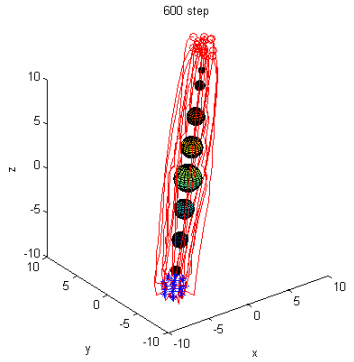
شکل۶: شبیه‌سازی حرکت توده در محیط با مانع در صورت عدم تمایل به تجمع

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

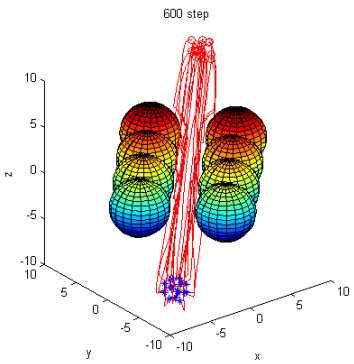
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

شبیه‌سازی تغییرات موقعیت اعضاء با پیشرفت زمان در شکل‌های (۶-الف تا ج) در مراحل مختلف نشان داده شده است شکل (۶-د) نشان دهنده‌ی موقعیت نهایی اعضاء است. شبیه‌سازی معادله (۱۶) نشان می‌دهد که در صورت وجود عضو در محدوده‌ی مانع ترم دافع فعال شده و سبب افزایش انرژی توده و در نتیجه‌ی آن دفع عضو از محدوده‌ی مانع می‌شود. مطابق با انتظار، اعضای توده از اطراف مانع با مسیرهای دلخواه عبور کرده‌اند. این امر سبب می‌شود که اعضای توده با آزادی عمل بیشتر مسیر خود را انتخاب نمایند که در نتیجه‌ی آن محدوده‌ی بیشتری را در طول مسیر پوشش می‌دهند و در نهایت اعضاء در نقطه‌ی هدف تجمع می نمایند. در الگوریتم ارائه شده می‌توان موانع موجود را در کنار یکدیگر به نحوی قرار داد تا کره‌هایی که موانع با آنها تخمین زده شده‌اند روی یکدیگر اثر همپوشانی داشته باشند. در این صورت می‌توان موانع با شکل‌ها مختلف را توسط این کره‌ها تخمین زد و حرکت ایمن را برای توده ربات‌ها ایجاد نمود. نمونه‌هایی از این کاربرد در شکل ۷ نشان داده شده است.

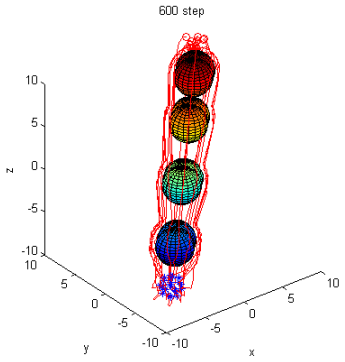
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با ایجاد اثر همپوشانی کره‌های تخمینی، موانع با شکل‌های پیچیده ایجاد شده است. برای مثال ایجاد یک راهروی تنگ و یا موانع به صورت پله‌یی، که این موضوع یکی از مزیت‌های مهم الگوریتم پیشنهادی می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل۷- نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم ارائه شده برای موانع متفاوت

۵-نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا الگوریتمی ارائه شد تا توسط آن توده متشکل از چندین عضو تحت تاثیر آن با داشتن تمایل به تجمع و عدم برخورد با یکدیگر به سمت نقطه‌ی هدف با انتخاب کوتاه‌ترین مسیر حرکت نمایند، که این الگوریتم در قالب معادله دینامیکی(۷) ارائه شده است. از آنجایی که حرکت توده در بیشتر مواقع، در فضاهایی با وجود مانع می‌باشد، لذا معادله با وجود نیروی دافع از سمت مانع بازنویسی شد. بدلیل تاثیر آن رو هر عضو در فواصل زیاد از مانع، سوئیچی برای فعال سازی نیروی دافع طراحی گردید و در نتیجه‌ی آن معادله دینامیکی(۱۲) حاصل شد. همچنین حرکت در دو حالت نیز بررسی شد که در ابتدا تمایل به تجمع برای توده در شروع حرکت لحاظ شد و پس از آن با طراحی سوئیچی، ترم تمایل به تجمع تنها در حوالی نقطه‌ی هدف فعال گردید. که در نهایت این امر منجر به آن شد که در حالت دوم اعضای توده آزادی عمل بیشتری در انتخاب مسیر به سمت نقطه‌ی هدف را داشته باشند، که به موازات آن عدم برخورد اعضاء با یکدیگر با اطمینان بیشتری تضمین خواهد شد و همچنین فضای بیشتری در طول مسیر حرکت توسط اعضای توده پوشش داده می‌شود. تمامی موارد ذکر شده مزیت‌های الگوریتم پیشنهادی، که همان معادله دینامیکی(۱۶) است، نسبت به الگوریتم‌های پیشین(موارد [۸] و [۱۵-۱۸]) می‌باشد. در نهایت کره‌هایی که توسط آنها موانع موجود در مسیر حرکت، تخمین زده شدند را می‌توان به گونه‌یی کنار یکدیگر قرار داد تا شکل‌های متفاوت را ایجاد نمایند، که این مورد نیز نوآوری و مزیت الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. که در شبیه‌سازی پایانی عدم برخورد اعضاء با موانعی با چیدمان و شکل‌های مختلف نشان داده شد. الگوریتم پیشنهادی برای مواردی از جمله نقشه برداری، جست‌وجو، شناسایی و نظارت بر محیط و پوشش یا حمله‌های توده‌ای و حفاظت یا انهدام یک هدف به صورت همزمان می‌باشد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

٦-فهرست علائم

a	پارامتر عامل تمایل به تجمع
A_e	پارامتر عامل جاذب به سمت نقطه هدف
A_o	پارامتر عامل دافع از سمت مانع
b	پارامترهای عامل دافع جهت عدم برخورد
c	پارامترهای عامل دافع جهت عدم برخورد
C_e	نقطه ی هدف
C_{ok}	مرکز هر مانع
D	فضای حرکتی
k	پارامتر میرا کننده ی انرژی
K_i	انرژی جنبشی
M	تعداد موانع
m_i	جرم اعضاء
N	تعداد اعضای توده ی ربات ها
neo	سوئیچ فعال کننده ی عامل دافع از سمت مانع
nea	سوئیچ فعال کننده ی عامل تجمع
R_o	شعاع کره تخمینی
$p_a(q_i)$	تابع پتانسیل تجمع
$p_e(q_i, C_e)$	تابع پتانسیل جاذب از سمت هدف
$p_o(q_i, C_o)$	تابع پتانسیل دافع از سمت مانع
P_i	مختصات هر عضو
q_i	مختصات هر عضو
$\dot{q}_i$	سرعت هرعضو
Q_i	میراکننده ی انرژی
v_i	سرعت هرعضو

٧-مراجع

[1] E. Şahin and A. Winfield, Special issue on swarm robotics. Swarm Intelligence, 2(2), 69-72, 2008.

[2] R. Groß, M. Bonani. F. Mondada and M. Dorigo, *"Autonomous self-assembly in swarm-bots"*. IEEE transactions on robotics, 22(6), 1115-1130, 2006.

[3] H. Hamann and H. Wörn, *"An analytical and spatial model of foraging in a swarm of robots"*. In International Workshop on Swarm Robotics (pp. 43-55). Springer Berlin Heidelberg, 2006.

[4] E. Bonabeau, M. Dorigo and G. Theraulaz, Swarm intelligence: from natural to artificial systems (No. 1). Oxford university press, 1999.

[5] G. Beni and J. Wang, *"Swarm intelligence in cellular robotic systems"*. In Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics? (pp. 703-712). Springer Berlin Heidelberg, 1993.

[6] K. Jin, P. Liang and G. Beni, *"Stability of synchronized distributed control of discrete swarm structures"*. In Robotics and Automation, 1994. Proceedings., IEEE International Conference on (pp. 1033-1038). IEEE, 1994.

[7] A. S. Barrera, A. López-López and G. R Gómez, *"Self-organization of agents for collective movement based on particle swarm optimization: A qualitative analysis"*.In Electrical Communications and Computers (CONIELECOMP), 21st International Conference on (pp. 71-76). IEEE, 2011.

[8] H. Hashimoto, S. Yokota, A. Sasaki, Y. Ohyama, and H. Kobayashi,.*"Cooperative interaction of walking human and distributed robot maintaining stability of swarm".* In Human System Interactions, HSI'09. 2nd Conference on (pp. 24-27). IEEE, 2009.

[9] G. Beni and P. Liang, *"Pattern reconfiguration in swarms-convergence of a distributed asynchronous and bounded iterative algorithm"* . IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12(3), 485-490, 1996.

[10] Liu, Yang, Kevin M. Passino, and Marios Polycarpou. "Stability analysis of one-dimensional asynchronous swarms." *Automatic Control, IEEE Transactions on* 48.10 (2003): 1848-1854.

[11] A. Okubo, *"Dynamical aspects of animal grouping: swarms, schools, flocks, and herds"* . Advances in biophysics, 22, 1-94, 1986.

[12] S. Gueron, S. A. Levin, and D. I. Rubenstein, *"The dynamics of herds: from individuals to aggregations"*. Journal of Theoretical Biology, 182(1), 85-98, 1996.

[13] W. Pan and Y. Zheng, *"Stability analysis of general swarm with Gaussian attractant/repellent profiles and interaction time delays".* In Control Conference (CCC), 2013 32nd Chinese (pp. 1224-1229). IEEE, 2013.

[14] Z. Xue and J. Zeng, *"Swarm Dynamics Behavior Analysis and Coordinated Control of Limited-Range Perceived Agents"*. In C]//Proceeding of the Second International Symposium on Networking and Network Security (ISNNS'10), Jinggangshan, PR China (pp. 85-88), 2010.

[15] S. W. Ekanayake, Formation of Networked Mobile Robots. Deakin University, Victoria, 2009.

[16] D. H. Kim, H. O. Wang, G. Ye and S. Shin, *"Decentralized control of autonomous swarm systems using artificial potential functions: Analytical design guidelines"*. In Decision and Control, 2004. CDC. 43rd IEEE Conference on (Vol. 1, pp. 159-164). IEEE, 2004.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]

[17] V. Gazi and K. M. Passino, *"Stability analysis of swarms"*. IEEE Transactions on Automatic Control, 48(4), 692-697, 2003.

[18] V. Gazi, *"On Lagrangian dynamics based modeling of swarm behavior"*. Physica D: Nonlinear Phenomena, 260, 159-175, 2013.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.2.8]