

طراحی الگوریتم جدیدی برای حرکت دوبعدی توده‌ی ربات‌ها بر مبنای عدم برخورد با مانع مبتنی بر معادلات لاگرانژ

علیرضا خدایاری^۱

استادیار

در این مقاله الگوریتمی جدید برای رفتار توده‌ای از ربات‌ها با هدف تجمع توده در مرکز جرم آن در ابتدا و پس از آن حرکت به سمت نقطه‌ای خاص ارائه می‌شود. از آنجایی که معادله حرکت توده بر اساس معادلات لاگرانژ می‌باشد، بنابراین در الگوریتم ارائه شده با حداقل کردن انرژی، اعضای توده کوتاهترین مسیر ممکن را برای رسیدن به مقصد طی می‌نمایند. همچنین با فرض موانع در مسیر حرکت توده، با استفاده از عامل دافع خطی که در الگوریتم تعریف می‌شود و توسط سوئیچی فعال می‌شود، موضوع پایداری در عدم برخورد با موانع در حرکت تضمین می‌گردد و در نهایت معادلات ارائه شده توسط نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی و صحت‌گذاری می‌شود. نتایج حاصل از رفتار توده‌ی ربات‌ها بر مبنای الگوریتم ارائه شده، شبیه‌سازی و رفتار بهینه در الگوریتم ارائه شده با حداقل انرژی و عدم برخورد با موانع در طول مسیر توده‌ی ربات‌ها را نشان می‌دهد.

عباس پورمحمودی^۲

دانشجوی کارشناسی ارشد

واژه‌های راهنما: توده، توده‌ی ربات‌ها، الگوریتم حرکت توده، تجمع توده‌ی ربات‌ها

۱- مقدمه

علم مهندسی توده‌ی هوشمند، بر اساس الگو برداری از رفتار توده‌ای موجودات زنده توسعه یافته است، و برای حل مسائلی که برای یک عضو به تنهایی غیر ممکن است مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. رفتار توده‌ای در مهندسی، تحت عنوان "مهندسی توده"، دانشی فنی و کاربردی برای مدل سازی و تعیین کردن نیازها، طراحی، تشخیص، بررسی، اعتبار سنجی، عملکرد و نگه داری سیستم توده‌ی هوشمند است [۲]. به بیان دیگر مهندسی توده، طراحی قابل پیش بینی و قابل کنترل توده‌ها می‌باشد که با اهداف عمومی تعریف می‌شود و با کمترین شرایط قابل اثبات است [۳]. در پژوهش‌های انجام شده توده‌ی ربات‌ها از دو دیدگاه ماکروسکوپی و میکروسکوپی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد [۴]. در مدل سازی میکروسکوپی هر کدام از ربات‌ها

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، پردیس، ایران

khodayari@pardisiu.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

abbas_pm1988@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۹/۱۷، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۴/۲۲

به صورت فردی و تعامل ربات با ربات و ربات با محیط به طور دقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. سطح جزئیات در مدل میکروسکوپی و دقت در تحلیل و بررسی حرکت بسیار بالا است. در مدل سازی ماکروسکوپی مجموع توده به عنوان یک سیستم در نظر گرفته می‌شود. در روش‌های ماکروسکوپی با استفاده از معادلات دیفرانسیل^۱، کنترل کلاسیک و تئوری پایداری^۲ و سایر روش‌های متنوع دیگر به مدلسازی حرکت توده‌ی ربات‌ها پرداخته می‌شود [۴].

از اولین استفاده‌ها از معادلات دیفرانسیل برای مدل کردن سیستم توده‌ی ربات‌ها، مدل ارائه شده توسط Martinoli در سال (۱۹۹۹) بوده است ایشان با استفاده از معادلات دیفرانسیل، وظیفه خوشه‌ای^۳ را ارائه داد که بر اساس آن ربات‌ها به دور یک شیء جمع می‌شوند [۵]. Lerman در سال (۲۰۰۱) و Martinoli در سال (۲۰۰۴) با استفاده از معادله دیفرانسیل مدلی را ارائه دادند، که بر اساس آن دو ربات با مشارکت یکدیگر چوبی را از داخل یک سوراخ بیرون می‌آوردند [۶ و ۷].

Lerman و Galstyan در سال (۲۰۰۲) مدلی را برای جست و جو با وجود تداخل ارائه دادند، که در آن عملکرد اعضاء در جست و جو به صورت فرد به فرد به درستی مدل شده است [۸]. Trianni در سال (۲۰۰۲) با استفاده از معادلات دیفرانسیل مدل رفتار فرم زنجیری^۴ و رفتار تجمعی^۵ را با احتمالات محدود حالت‌های اعضاء ارائه داد [۹]. Campo و Dorigo در سال (۲۰۰۷) رفتار جمعی را برای عملکرد جست و جوی چندگانه^۶ (برای مثال جست و جو برای چند منبع غذایی) ارائه دادند [۱۰]. Winfield در سال (۲۰۰۹) با استفاده از معادلات دیفرانسیل مدلی را برای تجمع ربات‌ها با وجود عدم برخوردشان با یکدیگر ارائه داد [۱۱]. Liu و Winfield در سال (۲۰۱۰) مدل جست و جو دیگری را که شامل مجموعه‌ای از واحد-های انرژی بود ارائه داده است [۱۲]. غفاری و همکاران در سال (۲۰۰۹) مدلی را ارائه دادند که بر اساس منطق فازی کنترل می‌شود و در آن توده‌ی متشکل از چندین ربات حول یک جسم جمع می‌شوند [۱۳]. همچنین غفاری و همکاران در سال (۲۰۱۳) مدلی را ارائه داده‌اند که بر اساس آن توده‌ی متشکل از سه ربات که یکی از آنها فرمانده و دو تای دیگر پیرو می‌باشند، حول یک جسم جمع می‌شوند و آن را جابجا می‌نمایند [۱۴]. در سال (۲۰۰۹) مدلی توسط Ekayake ارائه شده است که بر اساس آن توده‌ی ربات‌ها توسط نیروهای مجازی به سمت الگویی مشخص حرکت می‌کنند و داخل آن قرار می‌گیرند. حرکت کلی این توده توسط سوئیچ‌هایی طراحی شده است که وظیفه آنها فعال و غیر فعال کرده نیروها می‌باشد [۱۵]. مدل ارائه شده بر اساس معادلات لاگرانژ توسط Gazi در سال (۲۰۰۲) و (۲۰۱۳) از دیگر پژوهش‌های انجام شده بر اساس معادلات دیفرانسیل بدست آمده از معادلات لاگرانژ می‌باشد که تجمع و حرکت به سمت نقطه هدف را ارائه می‌دهد [۱۶ و ۱۷].

در این مقاله با استفاده از روش انرژی، بر اساس معادله لاگرانژ که مبنای آن به کارگیری سرعت به جای نیرو می‌باشد، الگوریتم جدیدی برای حرکت توده‌ی ربات‌ها در قالب یک معادله دینامیکی طراحی شده است.

¹ rate or differential equations

² classical control and stability theory

³ clustering task

⁴ chain formation behavior

⁵ aggregation behavior

⁶ multi-foraging

در این الگوریتم معادله حرکت کل توده توصیف می‌شود، بطوریکه در نهایت معادله حرکت نهایی، مشابه به معادله بدست آمده از روش نیوتن می‌باشد. در طراحی الگوریتم، حرکت توده در محیط‌هایی با وجود مانع نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. از اینرو در قسمت (۲) به ارائه فرضیات اساسی در طراحی الگوریتم جدید و بیان مختصات و معادلات کلی حرکت برای توده‌ی ربات‌ها پرداخته می‌شود و در قسمت (۳) طراحی الگوریتم حرکتی به نحوی صورت می‌گیرد که عدم برخورد با موانع موجود در مسیر حرکت تضمین گردد. در قسمت (۴) حرکت توده‌ی ربات‌ها بر مبنای الگوریتم طراحی شده شبیه‌سازی و صحنه گذاری 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 و همچنین مختصات و معادلات کلی حرکت که الگوریتم جدید بر مبنای آن توسعه یافته است، برای تفسیر بهتر بیان می‌شود. بنابراین 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 موقعیت موانع موجود بر سر راهشان توسط دستگاه مختصات عمومی^۱ برای هر عضو تعریف شده است.

در علم مهندسی توده، پایداری در الگوریتم حرکتی توده‌ی ربات‌ها به نحوی تعریف می‌شود که شامل مواردی همچون عدم برخورد با یکدیگر و عدم برخورد با مانع در طول مسیر حرکتی می‌باشد. همچنین پایداری با استفاده از روش پایداری لیپانوف قابل بیان است بدین صورت که هرگاه اعضای توده در راستای کاهش انرژی رفتار کنند، نشان دهنده‌ی این موضوع است که توده به سمت نقطه‌ی هدف حرکت می‌کند و هنگامی که به مانعی می‌رسند با رفتار در راستای افزایش میزان انرژی، از مسیر حرکت خود منحرف می‌شوند که این انحراف در تضمین عدم برخورد اعضای توده با مانع مطلوب می‌باشد. لذا در ادامه برای نشان دادن حرکت ایمن از قضیه لیپانوف استفاده می‌شود [۱۶].

مختصات کلی به این صورت تعریف می‌شود که موقعیت هر عضو توده در دو بعد توسط $P_i = (x_i, y_i)^T$ مشخص می‌شود و به صورت $q_i = P_i$ و $\dot{q}_i = v_i$ که در آن v_i نشان دهنده‌ی سرعت هر عضو است در معادله لاگرانژ ظاهر می‌شود. انرژی جنبشی به صورت $K_i(\dot{q}_i) = \frac{1}{2} m_i \dot{q}_i^T \dot{q}_i$ تعریف می‌شود. که این انرژی برای کل توده به صورت زیر بیان می‌شود [۱۷].

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

توجه به این نکته ضروری است که انرژی پتانسیل در سیستم‌های بیولوژیکی داری منابع ملموس است، اما در مهندسی توده و رباتیک، انرژی پتانسیل می‌تواند به صورت مجازی برای هر یک از اعضاء و یا کل توده تعریف شود [۱۷].

¹ global coordinate

همانطور که اساس قانون دوم نیوتن نیرو می‌باشد، اساس معادله لاگرانژ انرژی است. لاگرانژیین عضو i به فرم زیر است [۱۷].

$$L_i(q, \dot{q}_i) = K(\dot{q}_i) - p(q_i) \quad (۲)$$

که در آن ترم $p(q)$ نشان دهنده‌ی انرژی پتانسیل می‌باشد. معادلات حرکت هر عضو به صورت زیر بیان می‌شود.

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

همان طور که قبلاً گفته شد q_i مختصات هر عضو را نمایش می‌دهد و Q_i مجموع عوامل ناپایستار است. با اعمال لاگرانژیین اعضاء در معادلات حرکت رابطه‌ی زیر نتیجه می‌شود.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K(\dot{q}_i)}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial p(q_i)}{\partial q_i} = Q_i \quad (۴)$$

برای هر عضو i ترم دوم معادله (۴) به صورت ترم (۵) نتیجه می‌شود.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K(\dot{q}_i)}{\partial \dot{q}_i} \right) = m_i \ddot{q}_i = m_i \dot{v}_i \quad (۵)$$

در نهایت بر اساس معادلات لاگرانژ دینامیک حرکت اعضاء به صورت زیر بیان می‌شود.

$$m_i \ddot{q}_i = Q_i - \frac{\partial p(q_i)}{\partial q_i} \quad (۶)$$

متغیر m_i در معادله (۶) برای همه‌ی اعضاء برابر با واحد فرض می‌شود. بنابراین معادله به صورت زیر باز نویسی می‌شود.

$$\ddot{q}_i = Q_i - \frac{\partial p(q_i)}{\partial q_i} \quad (۷)$$

معادله دیفرانسیلی (۷) را می‌توان با روش‌های عددی به سادگی حل نمود [۱۷]. تا بدین جا معادله لاگرانژ برای حرکت توده‌ی ربات‌ها نتیجه شده است. حال برای ایجاد حرکت هدف‌دار باید ترم $\frac{\partial p(q)}{\partial q_i}$ در معادله (۷) به نحوی اتخاذ شود که هدف مورد نظر را اغنا نماید. بنابراین در قسمت بعد در طراحی الگوریتم، ترم‌هایی از انرژی‌های پتانسیل مورد نیاز طراحی و در رابطه‌ی (۷) اعمال خواهد شد.

۳- طراحی الگوریتم جدید حرکت توده‌ی ربات‌ها بر مبنای عدم برخورد با مانع

در این قسمت به طراحی الگوریتم جدیدی برای حرکت توده‌ی ربات‌ها بر مبنای عدم برخورد با موانع مبتنی بر معادلات لاگرانژ در دو بعد پرداخته می‌شود. در مرحله اول الگوریتم حرکت توده‌ی ربات‌ها با استفاده از توسعه معادلات لاگرانژ برای انرژی پتانسیل توده ارائه می‌شود و سپس با طراحی ترم پتانسیل اعمال شده از جانب مانع به اعضاء، الگوریتم توسعه می‌یابد تا در شرایط بهینه و بر مبنای عدم برخورد با مانع حرکت توده‌ی ربات‌ها ایجاد شود.

۳-۱- طراحی الگوریتم مبتنی بر حرکت توده‌ی ربات‌ها به سمت نقطه‌ی هدف

با انتخاب ترم انرژی پتانسیل $p(q_i)$ در انواع متفاوت، می‌توان تاثیرات مختلفی را بر حرکت توده ایجاد نماید. از آنجایی که هدف از طراحی الگوریتم تجمع توده در نقطه‌ی هدف می‌باشد، بنابراین در الگوریتم ارائه شده

ترم انرژی پتانسیل برای ایجاد تجمع در صورت عدم برخورد اعضاء با یکدیگر $p_a(q_i)$ و حرکت به سمت نقطه‌ی هدف $p_e(q_i, C_e)$ ، به صورت زیر طراحی و انتخاب شده است [۱۷].

$$p_a(q_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \left[\frac{a}{2} \|q_i - q_j\|^2 + \frac{bc}{2} \exp\left(-\frac{\|q_i - q_j\|^2}{c}\right) \right] \quad (۸)$$

$$p_e(q_i, C_e) = \frac{A_e}{2} \|q_i - C_e\|^2 \quad (۹)$$

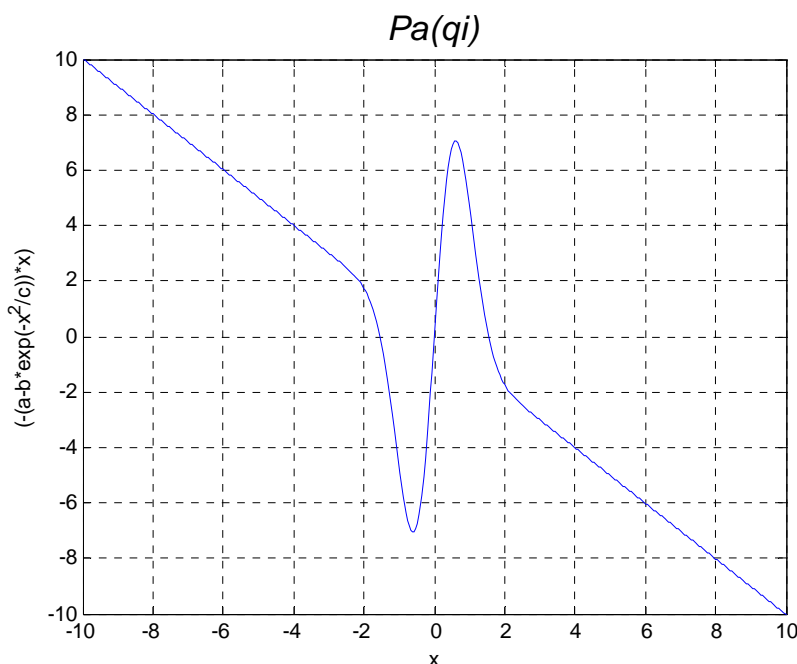
که در آن $p_a(q_i)$ تابع پتانسیل برای ایجاد تجمع و تضمین عدم برخورد اعضاء با یکدیگر (ترم خطی تجمع را ایجاد می‌کند و ترم نمایی عدم برخورد با یکدیگر را تضمین می‌نماید) می‌باشد. و $p_e(q_i, C_e)$ تابع پتانسیل جاذب به سمت نقطه‌ی هدف می‌باشد. که در آن a پارامتر عامل تمایل به تجمع، c, b پارامترهای عامل دافع برای تضمین عدم برخورد اعضاء با یکدیگر و A_e پارامتر عامل جاذب به سمت نقطه‌ی هدف است. که در آنها a, c, b, A_e با شرط $a, b, c > 0, b > a$ و $A_e > 0$ طراحی و انتخاب می‌شوند. و C_e نقطه‌ی هدف است که اعضاء به سمت آن حرکت خواهند کرد. بنابراین $p_i(q) = p_a(q_i) + p_e(q_i, C_e)$ می‌باشد که با اعمال آن در معادله (۷) (به صورت $\frac{\partial p_i(q)}{\partial q_i} = \frac{\partial p_a(q_i)}{\partial q_i} + \frac{\partial p_e(q_i, C_e)}{\partial q_i}$) و لحاظ کردن $Q_i = -k\dot{q}_i \| \dot{q}_i \|$ به عنوان عامل میرا کننده جهت توقف اعضاء در نقطه‌ی هدف، معادله حرکت به صورت معادله (۱۰) حاصل می‌شود [۱۷].

$$\ddot{q}_i = Q_i - \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N \left[a - b \exp\left(-\frac{\|q_i - q_j\|^2}{c}\right) \right] \times (q_i - q_j) + A_e(q_i - C_e) \right) \quad (۱۰)$$

در عبارت فوق ترم عامل تجمع توده $\left(\sum_{j=1, j \neq i}^N \left[a - b \exp\left(-\frac{\|q_i - q_j\|^2}{c}\right) \right] \times (q_i - q_j) \right)$ می‌باشد.

که رفتار ترم تجمع حول مرکز $p_a(q_i)$ توده در شکل (۱) نشان داده شده است. در این رابطه همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود اعضاء توده در صورت داشتن فاصله‌ی زیاد از یکدیگر به سمت هم جذب می‌شوند و پس از دستیابی به فاصله مناسب و طراحی شده، اعضاء یکدیگر را دفع خواهند کرد تا در نتیجه‌ی آن عدم برخورد با یکدیگر تضمین گردد.

حال به بررسی معادله (۱۰) پرداخته می‌شود. حرکت توده تحت تاثیر معادله (۱۰) 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. همانطور که گفته شد عملکرد اعضاء توده تحت تاثیر این عبارت به نحوی است که به سمت یکدیگر جذب می‌شوند و در صورتی که فاصله‌ی آن‌ها نسبت به یکدیگر مقدار کمی شود، عامل دافع یعنی $-b \exp\left(-\frac{\|q_i - q_j\|^2}{c}\right)$ اعضاء را از یکدیگر دفع می‌نماید تا عدم برخورد تضمین شود. در نتیجه‌ی آن اعضاء توده حول مرکز توده تمایل به تجمع را دارا می‌باشند و سپس اعضاء توده با کاهش ترم $A_e(q_i - C_e)$ با انتخاب کوتاه‌ترین مسیر ممکن به



شکل ۱- رفتار ترم تجمع در الگوریتم حرکتی توده‌ی ربات‌ها

سمت نقطه‌ی هدف حرکت می‌نماید. علت انتخاب کوتاه‌ترین مسیر ممکن در این است که توده در راستای کاهش انرژی رفتار می‌نماید. نهایتاً حرکت اعضاء تحت تاثیر عامل میرا کننده Q_i متوقف می‌شود. بنابراین تجمع توده در نقطه‌ی هدف به صورت ایمن نتیجه می‌شود. در قسمت بعد معادله‌ی (۱۰) به نحوی تعمیم داده می‌شود که عدم برخورد با مانع نیز تضمین گردد.

۳-۲- طراحی الگوریتم حرکت در محیط با وجود مانع

در ادامه طراحی الگوریتم، حرکت توده‌ی ربات‌ها در صورت وجود مانع نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در طراحی این الگوریتم عدم برخورد اعضاء ربات‌ها با موانع موجود بر سر راهشان تضمین می‌گردد. از اینرو در طراحی، یک عامل دافع از سمت موانع مد نظر قرار می‌گیرد که این عامل با افزایش میزان انرژی در رفتار حرکتی توده‌ی ربات‌ها، سبب ایجاد ناپایداری می‌شود و این ناپایداری سبب می‌شود تا عدم برخورد اعضاء با موانع تضمین گردد. در نتیجه، طبق تعریف پایداری، برای حرکت توده‌ی ربات‌ها، این رفتار سبب تضمین عدم برخورد با موانع برای توده‌ی ربات‌ها می‌شود. محدوده‌ی هر مانع توسط یک دایره تخمین زده می‌شود. در این حالت حرکت ایمن برای توده زمانی ایجاد می‌شود که اعضاء برخوردی با محیط دایره نداشته باشند. در الگوریتم طراحی شده برای ایجاد چنین امنیتی دایره دیگری با همان مرکز دایره مانع فرض می‌شود که شعاعی بزرگتر از دایره تخمینی برای مانع را دارا می‌باشد. هرگاه هر عضوی از توده داخل این دایره قرار گیرد، عامل دافع از سمت مرکز دایره به آن اعمال و در نتیجه‌ی آن سبب عدم برخورد عضو با مانع شود. به عبارت دیگر روی محیط دایره بزرگتر سوئیچی قرار می‌گیرد تا در لحظه‌ی که هر عضو وارد محیط دایره بزرگتر می‌شود عامل دافع فعال گردد. تابع پتانسیل اعمالی از سمت مانع در الگوریتم طراحی شده به صورت زیر اتخاذ می‌شود.

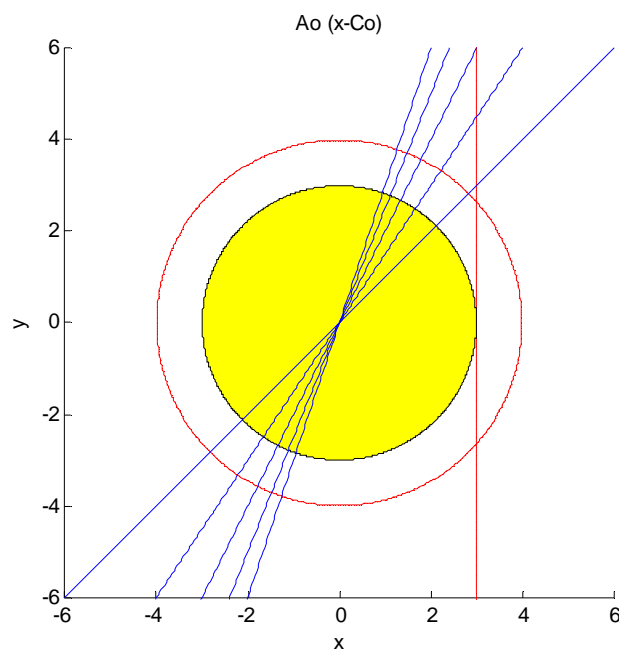
$$p_{ok}(q_i, C_{ok}) = \sum_{k=1}^M \left[\frac{A_o}{2} \|q_i - C_{ok}\|^2 \right] \quad (11)$$

که در آن M تعداد موانع موجود در محیط حرکت، C_{ok} مرکز دایره تخمینی، A_o پارامتر تعیین کننده شدت عامل دافع از جانب مرکز دایره می باشد و گرادیان آن به صورت زیر حاصل می شود.

$$\frac{\partial p_o(q)}{\partial q_i} = \frac{\partial p_{ok}(q)}{\partial q_i} = \sum_{k=1}^M [A_o(q_i - C_{ok})] \quad (12)$$

برای درک بهتر، رفتار عامل دافع در معادله (۱۲) از جانب مانع و تاثیر تغییر پارامتر A_o در شکل (۲) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود، مانع توسط دایره‌ی تو پر تخمین زده شده است که هدف عدم برخورد با آن است. دایره‌ی بزرگتر، فاصله‌ی ایمن تا محیط دایره تو پر را نشان می دهد و خطوط مورب نشان دهنده‌ی شدت عامل دافع از جانب مرکز دایره تو پر به ازای تغییرات A_o می باشد. خط مماس بر دایره تو پر نشان دهنده‌ی محدوده‌ی ایمن است که عضو اگر روی محور x قرار گیرد، نباید از آن خط به مانع نزدیک تر شود. عامل دافع در فاصله‌ی بیشتر از دایره‌ی بزرگتر نیز دارای مقدار می باشد که در نتیجه‌ی آن روی اعضای موجود در بیرون از آن تاثیر می گذارد، لذا در الگوریتم سوئیچی طراحی می شود که در صورت وجود عضو در داخل دایره‌ی بزرگتر عامل دافع را فعال نماید و لحظه‌ای که عضو از دایره‌ی بزرگتر خارج شد، عامل دافع غیر فعال شود. در نتیجه ضریب متغییر یا همان سوئیچی به صورت زیر تعریف شده است که در آن محدوده‌ی دافع همان دایره‌ی بزرگتر در شکل (۲) می باشد.



شکل ۲- تاثیر تغییر پارامتر A_o و رفتار عامل دافع (۱۲) در الگوریتم حرکتی توده‌ی ربات‌ها

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

که در آن $neo(q_i, C_o)$ عامل فعال کننده‌ی ترم دافع از سمت مانع می‌باشد. با اعمال ضریب $neo(q_i, C_o)$ عامل دافع از مانع به صورت زیر نتیجه می‌شود.

$$\frac{\partial p_{ok}(q)}{\partial q_i} = \sum_{k=1}^M (neo_k(q_i, C_{ok})) [A_o(q_i - C_{ok})] \quad (13)$$

در نهایت معادله حرکت کل توده به صورت زیر باز نویسی می‌شود.

$$\ddot{q}_i = Q_i - \left(\frac{\partial p_i(q)}{\partial q_i} + \frac{\partial p_e(q)}{\partial q_i} - \frac{\partial p_{ok}(q)}{\partial q_i} \right) \quad (14)$$

$$\ddot{q}_i = -k\dot{q}_i \|\dot{q}_i\|$$

$$- \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N \left[a - b \exp \left(- \frac{\|q_i - q_j\|^2}{c} \right) \right] \times (q_i - q_j) + A_e(q_i - C_e) \right) - \sum_{k=1}^M (neo_k(q_i, C_{ok})) [A_o(q_i - C_{ok})] \quad (15)$$

بر اساس معادله‌ی (۱۵) هرگاه عضوی که در محدوده‌ی یک مانع قرار گیرد، عامل دافع در آن فعال می‌شود. این موضوع سبب افزایش انرژی در حرکت توده می‌شود، در الگوریتم طراحی شده، این معادله در راستای افزایش ترم $\sum_{k=1}^M (neo_k(q_i, C_{ok})) [A_o(q_i - C_{ok})]$ عمل می‌نماید و در نتیجه‌ی آن عضو از مانع دور می‌شود. در طراحی الگوریتم، اثبات این موضوع در قالب قضیه زیر ارائه شده است.

قضیه: حرکت توده تحت تاثیر معادله‌ی (۱۵) در صورت وجود عضو در محدوده‌ی روشن شدن سوئیچ فعال ساز عامل دافع از سمت مانع، انحراف از مسیر به سمت نقطه‌ی هدف را دارد تا در نتیجه‌ی آن عدم برخورد با مانع تضمین گردد.

اثبات: برای الگوریتم طراحی شده تابع لیاپانوف به صورت زیر انتخاب شده است (اثبات با فرض وجود یک عضو در نزدیکی یک مانع انجام می‌شود و از آنجایی که عضو و موقعیت مانع دلخواه بوده پس نتیجه برای تمامی اعضاء صادق است).

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

که در آن $a > 0$ است و معادلات حالت به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} \dot{q}_{1i} &= \dot{q}_{2i} = \dot{e}_{1i} = e_{2i} \\ \dot{q}_{1i} &= \dot{q}_{2i} = \dot{e}_{2i} \end{aligned}$$

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

با مشتق گیری از تابع لیاپانوف انتخاب شده در مسیر حرکت اعضاء و فرض فعال بودن سوئیچ $(neo_k(q_i, C_{ok}))$ عبارت زیر حاصل خواهد شد.

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

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

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= [ae_{1i} \quad e_{2i}] \begin{bmatrix} e_{2i}^T \\ A \end{bmatrix} \\ &= -k\dot{q}_{1i}\|\dot{q}_{1i}\|e_{2i} + ae_{1i}e_{2i}^T - aNe_{1i}^T e_{2i} \\ &\quad + b \sum_{j=1, j \neq i}^N \exp\left(-\frac{\|q_i - q_j\|^2}{c}\right) (q_i - q_j)^T e_{2i} - A_e(q_i - C_e)^T e_{2i} \\ &\quad + [A_o(q_i - C_{ok})]e_{2i} \end{aligned}$$

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

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

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

عبارت $k\|\dot{q}_{1i}\|^2$ همیشه مثبت و تابع تجمع نیز همیشه مثبت است، که مقدار حداکثر آن در $\|q_i - q_j\| = \delta$ رخ می دهد. این مقدار برابر با فاصله یی است که با مساوی صفر قرار دادن عبارت $p_a(q_i)$ نتیجه می شود که حاصل آن دارای دو مقدار $\left\{ \|q_i - q_j\| = 0 \text{ or } \|q_i - q_j\| = \sqrt{c \ln\left(\frac{b}{a}\right)} = \delta \right\}$ است و چون اعضاء روی یکدیگر قرار نمی گیرند تا مقدار $\|q_i - q_j\| = 0$ حاصل شود، بنابراین مقدار حداکثر برابر با δ است. با در نظر گرفتن این موضوع، داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &\leq - \left[k \|\dot{q}_{1i}\|^2 + (N-1)a\delta - b(N-1)\delta \exp\left(-\frac{\delta^2}{c}\right) + A_e \|q_i - C_e\| \right. \\ &\quad \left. - [A_o \|q_i - C_{ok}\|] \right] \|e_{2i}\| \\ \dot{V}_i &\leq - \left[k \|\dot{q}_{1i}\|^2 + (N-1) \left(a\delta - b\delta \exp\left(-\frac{\delta^2}{c}\right) \right) + A_e \|q_i - C_e\| \right. \\ &\quad \left. - [A_o \|q_i - C_{ok}\|] \right] \|e_{2i}\| \\ \dot{V}_i &\leq - \left[k \|\dot{q}_{1i}\|^2 + (N-1) \left(a\delta - b\delta \exp\left(-\frac{\sqrt{c \ln\left(\frac{b}{a}\right)^2}}{c}\right) \right) + A_e \|q_i - C_e\| \right. \\ &\quad \left. - [A_o \|q_i - C_{ok}\|] \right] \|e_{2i}\| \\ \dot{V}_i &\leq - \left[k \|\dot{q}_{1i}\|^2 + (N-1) \left(a\delta - b\delta \left(\frac{a}{b}\right) \right) + A_e \|q_i - C_e\| - [A_o \|q_i - C_{ok}\|] \right] \|e_{2i}\| \\ \dot{V}_i &\leq - [k \|\dot{q}_{1i}\|^2 + A_e \|q_i - C_e\| - [A_o \|q_i - C_{ok}\|]] \|e_{2i}\| \end{aligned}$$

هدف عدم برخورد با مانع می‌باشد و از آنجایی که عامل دافع در صورت وجود عضو در منطقه‌ی ایمن تعریف شده برای مانع فعال می‌شود. پس با شرط $[A_o \|q_i - C_{ok}\|] > k \|\dot{q}_{1i}\|^2 + A_e \|q_i - C_e\|$ انرژی توده‌ی در حال حرکت افزایش یافته و معادله در مسیر حرکت توده ناپایدار می‌شود و در نتیجه قضیه اثبات و عدم برخورد با مانع تضمین می‌گردد. با توجه به الگوریتم ارائه شده و قضیه بیان شده، حرکت توده‌ی ربات‌ها با شرط تجمع و عدم برخورد با مانع تضمین می‌گردد. برای بررسی بهتر معادلات و الگوریتم ارائه شده، حرکت توده‌ی ربات‌ها تحت تاثیر معادلات ارائه شده در فضای نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی می‌شود و نتایج حاصل از الگوریتم ارائه شده در طراحی حرکت توده‌ی ربات‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴- شبیه‌سازی الگوریتم طراحی شده و بررسی نتایج

در این قسمت 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 نقطه هدف نتایج حاصل از الگوریتم ارائه شده تحت شرایط اولیه بررسی می‌شود. سپس در مرحله دوم با شبیه‌سازی الگوریتم تعمیم یافته در حرکت توده‌ی ربات‌ها در حضور موانع نتایج کلی الگوریتم ارائه شده در حرکت کلی توده‌ی ربات‌ها و پایداری حرکتی آن بررسی می‌شود.

۴-۱- شبیه‌سازی الگوریتم برای تجمع و حرکت توده به سمت نقطه‌ی هدف

الگوریتم جدید پیشنهادی در فضای نرم افزار با معادله (۱۰) به نحوی انجام می‌شود که در آن توده دارای ۲۰ عضو می‌باشد و نقطه هدف مورد نظر $C_e = [y \quad y]$ است. و همچنین موقعیت اولیه هر یک از اعضاء به صورت تصادفی انتخاب شده است. در این شبیه‌سازی برای بررسی بهتر عملکرد الگوریتم، سرعت اولیه برای تمامی اعضاء صفر در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی معادله با روش رانگ کاتا مرتبه ۴ با گام ۰/۰۵ حل گردیده است و پارامترها مطابق با جدول (۱) طراحی و انتخاب شده است.

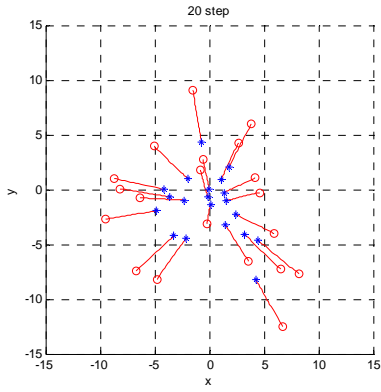
جدول ۱- مقادیر پارامترهای الگوریتم حرکتی در سناریوی حرکت توده‌ی ربات‌ها

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

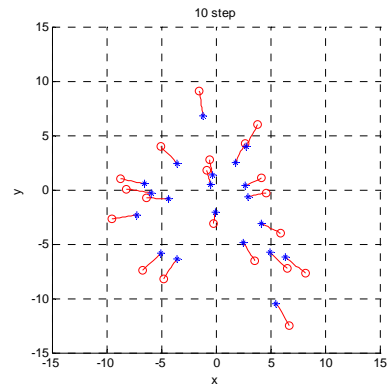
نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرکت توده‌ی ربات‌ها با استفاده از الگوریتم طراحی شده در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود اعضاء توده‌ی ربات‌ها از موقعیت اولیه، که با دایره‌های تو خالی نمایش داده شده‌اند، بر مبنای الگوریتم حرکتی طراحی شده مسیر حرکتی را، که با خط متصل از دایره‌های تو خالی به ضربدرها نمایش داده شده است، طی می‌نمایند. همچنین موقعیت نهایی اعضاء توده، با ضربدر نمایش داده شده‌اند. در شکل (۳-الف) شبیه‌سازی حرکت توده بر مبنای الگوریتم طراحی شده پس از ۱۰ مرحله، شکل (۳-ب) پس از ۲۰ مرحله، شکل (۳-ج) پس از ۵۰ مرحله، شکل (۳-د) پس از ۱۰۰ مرحله، شکل (۳-ه) پس از ۲۰۰ مرحله، شکل (۳-و) پس از ۶۰۰ مرحله، شکل (۳-ز) موقعیت نهایی اعضاء توده و در شکل (۳-ح) تغییرات سرعت اعضاء نمایش داده شده است. بنابراین همانطور که مشاهده می‌شود حرکت کلی توده‌ی ربات‌ها تحت عملکرد الگوریتم ارائه شده صحنه گذاری شد و در آن اعضاء ابتدا به سمت یکدیگر حرکت کرده و تجمع را ایجاد می‌کنند و سپس به سمت نقطه‌ی هدف حرکت می‌نمایند. اما از آنجایی که حرکت توده همیشه در محیط‌های بدون مانع نمی‌باشد، در نتیجه پایداری حرکت توده در صورت وجود مانع نیز باید تضمین شود. در قسمت بعد بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی در حرکت کلی توده‌ی ربات‌ها در محیط با مانع پرداخته می‌شود.

۴-۲- شبیه‌سازی الگوریتم برای حرکت توده‌ی ربات‌ها در حضور مانع

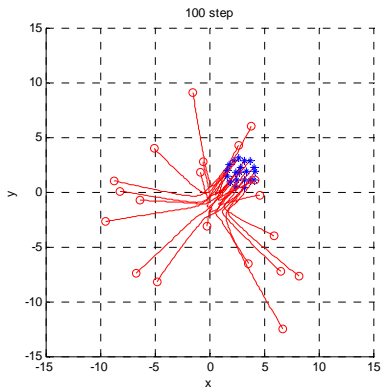
برای بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده شبیه‌سازی معادله حرکت (۱۵) به نحوی انجام می‌شود که در آن توده دارای ۲۰ عضو می‌باشد و اعضاء در موقعیت‌های ابتدایی به صورت تصادفی با فرض سرعت اولیه صفر برای تمامی اعضاء قرار می‌گیرند. توده حرکتی را با تضمین عدم برخوردشان با یکدیگر (توسط عامل دافع موجود بین اعضاء که سبب عدم برخورد اعضاء با یکدیگر می‌شود) و عدم ارتعاش اعضاء (توسط عامل میرا کننده) به سمت نقطه‌ی هدف یعنی C_e انجام می‌دهد و نهایتاً حول نقطه‌ی هدف تجمع می‌یابند.



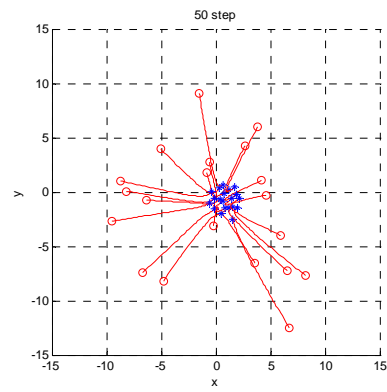
(ب) موقعیت اعضا پس از ۲۰ مرحله



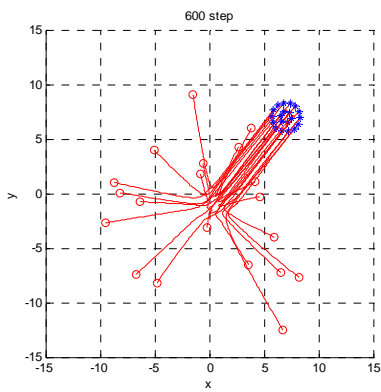
(الف) موقعیت اعضا پس از ۱۰ مرحله



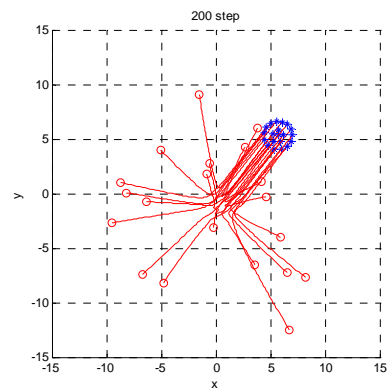
(د) موقعیت اعضا پس از ۱۰۰ مرحله



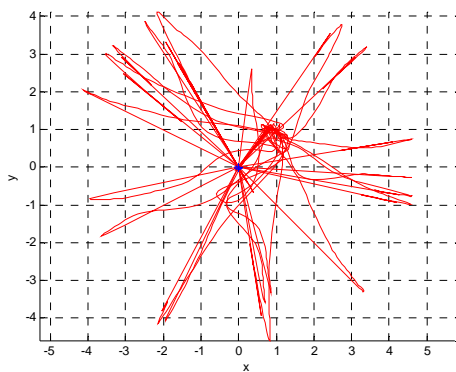
(ج) موقعیت اعضا پس از ۵۰ مرحله



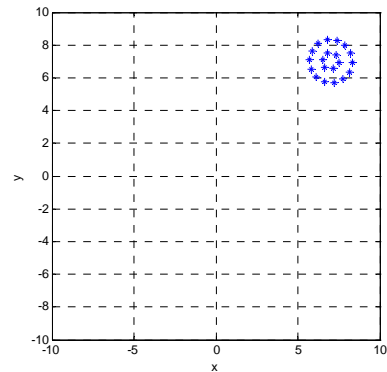
(و) موقعیت اعضا پس از ۶۰۰ مرحله



(ه) موقعیت اعضا پس از ۲۰۰ مرحله



(ح) تغییرات سرعت اعضا



(ز) موقعیت نهایی اعضا

شکل ۳- شبیه‌سازی حرکت توده در محیط بدون مانع

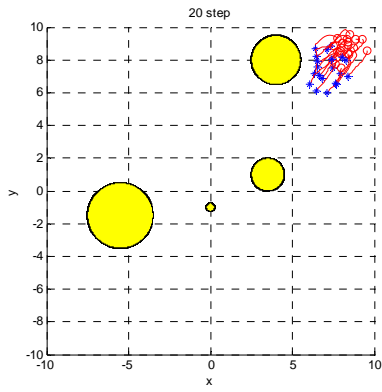
در این وضعیت فرض اساسی آن است که در فضای حرکت توده‌ی ربات‌ها موانعی نیز وجود دارد، که با دایره‌هایی تخمین زده شده‌اند و عدم برخورد با آنها نیز تضمین شده است. دایره‌ی فعال کننده‌ی عامل دافع برای موانع با شعاع $\|R_0 + 1\|$ (که در آن R_0 شعاع مانع می‌باشد) طراحی شده است. در این شبیه‌سازی معادله با روش رانگ کاتا مرتبه ۴ با گام $0/05$ حل گردیده است. و پارامترها مطابق با جدول (۱) طراحی و انتخاب شده است. مختصات نقطه‌ی هدف $C_e = [-8 \quad -8]$ می‌باشد و سرعت اولیه برای تمامی اعضاء صفر در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرکت توده‌ی ربات‌ها با استفاده از الگوریتم طراحی شده در شکل (۴) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود اعضای توده‌ی ربات‌ها از موقعیت اولیه، که با دایره‌های تو خالی نمایش داده شده‌اند، بر مبنای الگوریتم حرکتی طراحی شده مسیر حرکتی را، که با خط متصل از دایره‌های تو خالی به ضربدرها نمایش داده شده است، طی می‌نمایند. همچنین موقعیت نهایی اعضای توده، با ضربدر نمایش داده شده‌اند. دایره‌های تو پر نشان دهنده موانعی است که در مسیر حرکت توده به صورت تصادفی طراحی شده‌اند. در شکل (۴-الف) شبیه‌سازی حرکت توده بر مبنای الگوریتم طراحی شده پس از ۱۰ مرحله، شکل (۴-ب) پس از ۲۰ مرحله، شکل (۴-ج) پس از ۵۰ مرحله، شکل (۴-د) پس از ۱۰۰ مرحله، شکل (۴-ه) پس از ۲۰۰ مرحله، شکل (۴-و) پس از ۶۰۰ مرحله و در شکل (۴-ز) موقعیت نهایی اعضای توده نمایش داده شده است. بنابراین شبیه‌سازی، صحت معادله (۱۵) را نشان می‌دهد که در صورت وجود عضو در محدوده‌ی مانع عامل دافع فعال شده و سبب افزایش انرژی توده و در نتیجه‌ی آن دفع عضو از محدوده‌ی مانع می‌شود. بنابراین الگوریتم ارائه شده تجمع را در ابتدا برای توده‌ی ربات‌ها با وجود ترم $\frac{\partial p_a(q_i)}{\partial q_i}$ ایجاد می‌نماید و پس از آن توسط عامل جاذب به سمت نقطه‌ی هدف، یعنی عبارت $\frac{\partial p_e(q_i C_e)}{\partial q_i}$ به سمت هدف حرکت می‌نماید و از آنجایی الگوریتم در راستای کاهش انرژی رفتار می‌نماید. لذا کوتاه‌ترین مسیر ممکن برای رسیدن به نقطه‌ی هدف توسط اعضای توده انتخاب می‌شود. در ادامه وجود موانع نیز مد نظر قرار گرفته است که در صورت نزدیک شدن اعضای توده به سمت آنها و ورود اعضای توده به محدوده‌ی دافع هر مانع، عامل دافع یعنی $\frac{\partial p_{ok}(q)}{\partial q_i}$ عضو را از محدوده دور می‌نماید.

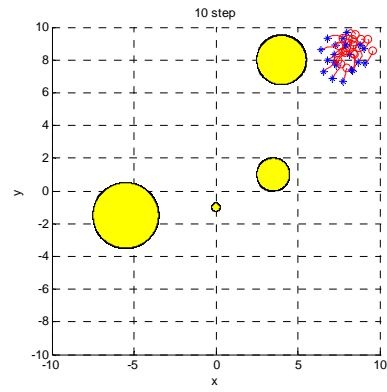
شکل (۴) شبیه‌سازی حرکت به سمت نقطه‌ی هدف و دوری از موانع موجود بر مسیر حرکت را نشان داده است. در نهایت الگوریتم ارائه شده توانایی این را دارد که حرکت ایمن را برای توده‌ی ربات‌ها تضمین نماید.

۵- نتیجه‌گیری

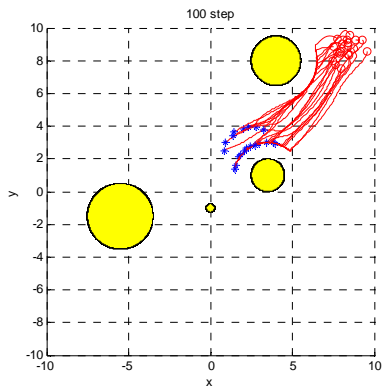
در این مقاله الگوریتم جدیدی برای حرکت توده‌ی ربات‌ها ارائه شد تا توسط آن توده متشکل از چندین عضو تحت تاثیر آن با تمایل به تجمع و عدم برخورد با یکدیگر به سمت نقطه‌ی هدف با انتخاب کوتاه‌ترین مسیر ممکن حرکت نمایند. از آنجایی که حرکت توده اکثراً در محیط‌هایی با وجود مانع می‌باشد، لذا معادله با وجود عامل دافع از سمت مانع طراحی شد. بدلیل تاثیر آن رو هر عضو در فواصل زیاد از مانع در الگوریتم، سوئیچی برای فعال سازی عامل دافع طراحی گردید.



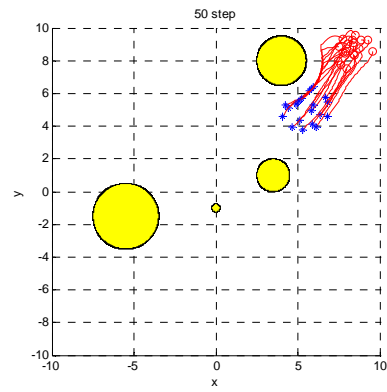
(ب) موقعیت اعضاء پس از ۲۰ مرحله



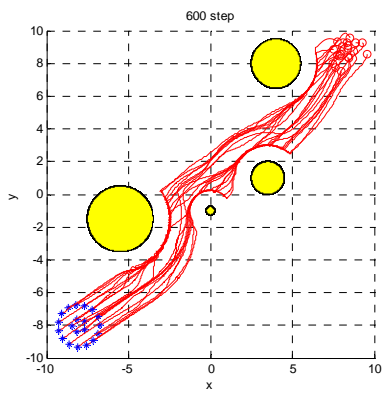
(الف) موقعیت اعضاء پس از ۱۰ مرحله



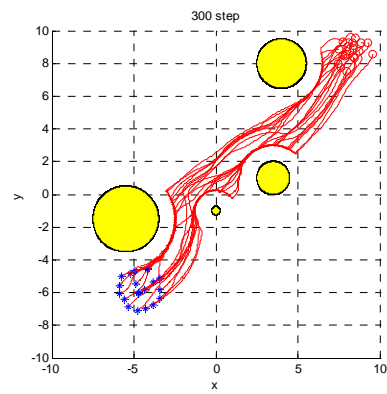
(د) موقعیت اعضاء پس از ۱۰۰ مرحله



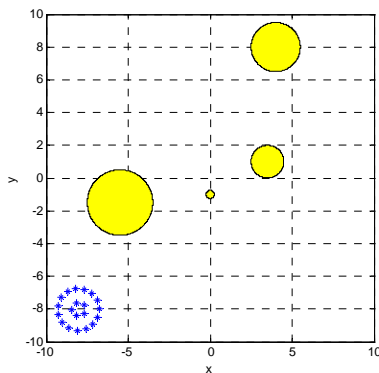
(ج) موقعیت اعضاء پس از ۵۰ مرحله



(و) موقعیت اعضاء پس از ۶۰۰ مرحله



(ه) موقعیت اعضاء پس از ۳۰۰ مرحله



(ز) موقعیت نهایی اعضاء

شکل ۴- شبیه‌سازی حرکت توده در محیط با مانع

موضوع پایداری الگوریتم برای حرکت توده‌ی ربات‌ها بر مبنای عدم برخورد با موانع اثبات گردید. در نهایت الگوریتم ارائه شده توسط نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی و صحنه گذاری شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی رفتار پایدار و بهینه توده در حرکت با حداقل انرژی و عدم برخورد با موانع در طول مسیر حرکت توده‌ی ربات‌ها را نشان داد. کاربرد الگوریتم ارائه شده در مواردی همچون جست و جو، نظارت بر محیط زیست و همچنین نقشه برداری می‌باشد.

مراجع

- [1] Jens, K., Graeme, D.R., and Stefan, K., "Swarm Intelligence in Animals and Humans", Trends in Ecology and Evolution, Vol. 25, No.1, pp. 28-34, (2010).
- [2] Yan-fei, Z., and Xiong-min, T., "Overview of Swarm Intelligence", International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010), pp. 400-401, Taiyuan, China, (2010).
- [3] Kazadi, S., "Swarm Engineering", Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, (2000).
- [4] Brambilla, M., Ferrante, E., Birattari, M., and Dorigo, M., "Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective", Swarm Intelligence, Vol. 7, pp. 1-41, (2013).
- [5] Martinoli, A., Ijspeert, A.J., and Mondada, F., "Understanding Collective Aggregation Mechanisms: from Probabilistic Modeling to Experiments with Real Robots", Robotics and Autonomous Systems, Vol. 29, No. 1, pp. 51-63, (1999).
- [6] Lerman, K., Galstyan, A., Martinoli, A., and Ijspeert, A.J., "A Macroscopic Analytical Model of Collaboration in Distributed Robotic Systems Artificial Life", Vol. 7, No. 4, pp. 375-393, (2001).
- [7] Martinoli, A., Easton, K., and Agassounon, W., "Modeling Swarm Robotic Systems: A Case Study in Collaborative Distributed Manipulation", The International Journal of Robotics Research, Vol. 23, No. 4-5, pp. 415-436, (2004).
- [8] Lerman, K., and Galstyan, A., "Mathematical Model of Foraging in a Group of Robots: Effect of Interference. Autonomous Robots", Vol. 13, No. 2, pp. 127-141, (2002).
- [9] Trianni, V., Labella, T.H., Gross, R., Sahin, E., Dorigo, M., and Deneubourg, J.L., "Modeling Pattern Formation in a Swarm of Self-assembling Robots", (Technical Report TR/IRIDIA/2002-12), IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, Belgium, (2002).
- [10] Campo, A., and Dorigo, M., "Efficient Multi-foraging in Swarm Robotics", In Lecture Notes in Artificial Intelligence, Advances in Artificial Life, Proceedings of ECAL, Berlin: Springer, Vol. 4648, pp. 696-705, (2007).
- [11] Winfield, A. F. T., "Towards an Engineering Science of Robot Foraging", In Distributed Autonomous Robotic Systems Berlin: Springer, Vol. 8, pp. 185-192, (2009).

- [12] Liu, W., and Winfield, A., "Modeling and Optimization of Adaptive Foraging in Swarm Robotic Systems", International Journal of Robotics Research, Vol. 29, No. 14, pp. 1743–1760, (2010).
- [13] Khozee, A., Aminaiee, A. H., and Ghaffari, A., "A Swarm Robotic Approach to Distributed Object Pushing using Fuzzy Controllers", Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand, February 21-26, (2009).
- [14] Ghaffari, A., and Esfahanian, M. R., "Using Swarm Robots Based on Leader-followers Method for Spherical Object Manipulation", Proceeding of the 2013 RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics, Tehran, Iran, February 13-15, (2013).
- [15] Ekanayake, S.W., "Formation of Networked Mobile Robots", Submitted in Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy, Deakin University, Melbourne, Australia, (2009).
- [16] Gazi, V., "Stability Analysis of Swarms", Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of the Ohio State University, (2002).
- [17] Gazi, V., "On Lagrangian Dynamics Based Modeling of Swarm Behavior", Physica D: Nonlinear Phenomena, Vol. 260, pp. 159-175, (2013).

فهرست نمادهای انگلیسی

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 : نقطه‌ی هدف

C_{ok} : مرکز هر مانع

C_o : مرکز هر مانع

k : پارامتر میرا کننده‌ی انرژی

K_i : انرژی جنبشی

M : تعداد موانع

m_i : جرم اعضاء

N : تعداد اعضای توده‌ی ربات‌ها

$neo(q_i, C_o)$: سوئیچ فعال کننده‌ی عامل دافع از سمت مانع

R_o : شعاع دایره 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 هر عضو

Q_i : میراکننده‌ی انرژی

v_i : سرعت هر عضو

Abstract

In this paper, a new algorithm is presented for the swarm behavior of robots in order to initially aggregate the swarm in its center and subsequently move toward a given target point. Since the equation representing the swarm movement is based on Lagrange equations, the member of the swarm take the shortest distance to reach their destination providing that the amount of energy found in above-mentioned algorithm is minimized. In addition, assuming that there are obstacles on the path of the swarm movement, the algorithm applies a linear repulsive force, activated by a switch, to avoid the contact between the members and obstacles. Finally, the presented equations are simulated and validated through MATLAB software. The results obtained from the swarm behavior of robots are simulated on the basis of the algorithm, and the optimized behavior of the algorithm is shown when the amount of energy is minimized and there is no contact with the obstacle.