

عبور مجموعه‌ی چندعضوی از گذرگاه باریک با استفاده از شبکه‌ی جهت‌دار

شهرام اعتمادی حقیقی (استادیار)

گروه مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

آریا آلستی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف، بهار ۱۳۹۴ (۱۳۹۴)
دربی ۳ - ۳۱، شماره ۱، ص. ۱۲۷-۱۳۵، (پادداشت‌نوی)

در مجموعه‌های روباتیکی چندعضوی که در آنها اعضا تنها به اطلاعات محلی در اطراف خود دسترسی دارند، عبور از موانع و گذرگاه‌های باریک مستلزم حذف اتصالات بین‌عضوی غیرضروری است. این امر در شبکه‌های غیرجهت‌دار نیازمند توافقات بین‌عضوی است، که انجام آن تنها با در اختیار داشتن اطلاعات اعضای غیرهمجوار میسر خواهد بود. لازمه‌ی دسترسی اعضا به این‌گونه اطلاعات، انتقال حجم زیاد اطلاعات شبکه در بین اعضای گروه است. در این مقاله یک روش کنترل توزیع‌شده‌ی پیرو-پیشرو ارائه می‌شود که بدون نیاز به اطلاعات اعضای غیرهمجوار، در بازه‌های زمانی کوتاه در برخی گره‌ها حرکات جهت‌دار اتفاق می‌افتد. عضوی که حرکت جهت‌دار انجام می‌دهد از بعضی اتصالات با اعضای همجوار صرف نظر می‌کند. نتیجه‌ی این حرکت ایجاد سیالیت در شبکه‌ی گروه است که منجر به عبور گروه از گذرگاه خواهد شد.

واژگان کلیدی: مجموعه چندعضوی روبات‌ها، کنترل توزیع‌شده، عبور از مانع، شبکه‌ی جهت‌دار.

۱. مقدمه

تحریکات و تعاملات بین‌عضوی تعیین‌کننده‌ی رفتارهای گروهی در شبکه‌های چندعضوی است که در برخی شرایط ممکن است به حرکات گروهی بی‌هدف نیز بینجامد.^[۱] اما حرکات گروهی هدف‌دار معمولاً توسط یک عامل خارجی ایجاد می‌شود. به‌عنوان مثال یک دسته پرنده در طول مهاجرت همواره به سوی هدفی یکتا و مشخص در پروازند؛ این هدف به قدری ارزشمند است که گاهی به نفع آن از حفظ برخی ارتباطات بین‌عضوی چشم‌پوشی می‌کنند. از چنین دیدگاهی، ایجاد حرکات گروهی هدف‌دار نیازی به راهبر (فیزیک‌ی) ندارد^[۱] چرا که تمام اعضای گروه تحت تأثیر یک محرک خارجی مشترک با نام «رهبر فرضی»^[۲-۵] هستند. اما سازوکارهای دیگری نیز در طبیعت وجود دارد که از طریق تحریک‌های موضعی باعث بروز حرکات‌های گروهی هدف‌دار می‌شوند. به‌عبارت ساده‌تر چنانچه اعضای یک گروه قابلیت تداوم و حفظ یکپارچگی را داشته باشند، آنگاه با هدایت عضو راهبر^[۵-۱۰] می‌توان حرکات گروهی هدف‌دار ایجاد کرد. بنابراین در این دیدگاه یا دسته‌بندی، تنها برخی از اعضا تحت تأثیر محرک خارجی یا رهبر فرضی قرار می‌گیرند.

الگوریتم‌های مبتنی بر حرکات گروهی جانداران به دلیل سازگار بودن با طبیعت حرکات گروهی از پتانسیل بالایی برای استفاده در سیستم‌های چندعضوی برخوردارند.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۴/۲، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۰/۱۶، پذیرش ۱۳۹۲/۱۱/۱۶.

setemadi@srbiau.ac.ir
aalasti@sharif.edu

این قابلیت باعث شده تا در برخی از روش‌ها با استفاده از الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم پرواز پرندهگان^۲، حرکات اعضا طراحی شود.^[۱۱] نتایج حاصل از انجام این روش‌ها، در مقایسه با روش‌های قبلی -- به‌خصوص در اهدافی مانند جست‌وجو -- بسیار موفقیت‌آمیز بوده است. روش مشابهی نیز مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب^۳ وجود دارد که برای تقسیم‌بندی یک گروه پرتعداد حول اهداف متعدد طراحی شده است.^[۱۲]

یکی از مهم‌ترین مدل‌های ارائه‌شده در حوزه‌ی مجموعه‌های چندعضوی شامل مجموعه‌ی از اعضا در صفحه است که با سرعت یکسان در حال حرکت‌اند.^[۱۳] در این مدل گسسته، زمان جهت‌گیری هر عضو در هر لحظه براساس قانون نزدیک‌ترین همسایه تعیین می‌شود. بررسی شرایط ناپایداری این مدل به‌کرات در مقالات انجام شده و نشان داده شده که با اصلاح قانون نزدیک‌ترین همسایه^[۱۴،۱۵] اعضای گروه هم‌گرایی پایدار دارند.

در سال‌های اخیر، استفاده از مفاهیم ترمودینامیکی مانند آنتروپی^۴ و مدل توزیع تصادفی برون^۵ در ایجاد مدل‌های پرتعداد و مطالعه‌ی رفتاری آنها، بسیار راه‌گشا بوده است. در این روش از رفتارهای تصادفی برون^۵ برای تخمین موقعیت اعضا استفاده می‌شود. قابلیت این روش‌ها چنان چشمگیر است که مبحثی به نام ترمودینامیک^۶ [۱۵] را در حوزه مجموعه‌های چندعضوی مطرح کرده است. از دیدگاه کلی در یک شبکه‌ی دینامیکی، مسائلی مانند پوشش یک‌نواخت و کامل محیط، دنبال کردن هدف، و... همگی در قالب یک هدف کلی قابل بیان‌اند.^[۱۶]

به عبارت ساده‌تر مسئله‌ی تخصیص وظایف در شبکه‌ی یک گروه، می‌تواند فارغ از نوع هدف مورد بررسی قرار گیرد. چنین رویکردی در طراحی الگوریتم‌های رفتاری اعضا در مجموعه‌های چندعضوی می‌تواند افق‌های جدیدی را در این زمینه بگشاید.

حفظ پایداری و اتصال کلی شبکه‌ی یک گروه دینامیک^۷ میبشود است که مورد توجه محققین مختلفی بوده است.^[۱۷,۱۴,۶,۱] عضوهای این گروه تنها از ارتباطات برد کوتاه برای ایجاد اتصال با اعضای مجاور سود می‌برند و تحت راهبری یکی از اعضا که ایفاگر نقش پیشرو است، حرکات هدف‌مند دارند. در این روش یک شبکه‌ی غیرجهت‌دار بین اعضا ایجاد می‌شود که در آن، حرکت هر عضو براساس گرادیان یک میدان پتانسیل فرضی انجام می‌گیرد. در همین راستا کمیته‌سازی اتصالات بین اعضا با حفظ کلیت گروه نیز مورد توجه بوده است.^[۱۹,۱۸]

عبور از موانع نیز همواره در دیدگاه‌های عملی مد نظر بوده،^[۲۰] اما عبور از میدان‌های پرمانع نیازمند کمیته‌سازی تعداد اتصالات بین عضوهاست. نقطه ضعف روش‌های موجود^[۱۹,۱۸] در این است که اگر قرار باشد هر عضو تنها به اطلاعات محلی در اطراف خود دسترسی داشته باشد، آنگاه برای کمیته‌شدن تعداد اتصالات، ضمن حفظ پایداری جمعی، باید اطلاعات زیادی بین اعضای گروه رد و بدل شود. در این مقاله هدف برآن است که با ارائه‌ی روشی هوش‌مند و بدون نیاز به سیلان اطلاعات در شبکه‌ی یک گروه، امکان کاهش تعداد اتصالات در وضعیت گذر از مانع را فراهم کنیم. جهت‌دار بودن رفتارها در برخی گره‌ها و عدم نیاز به توافق، مهم‌ترین نوآوری در این روش محسوب می‌شود.

۳. تابع اثر مانع

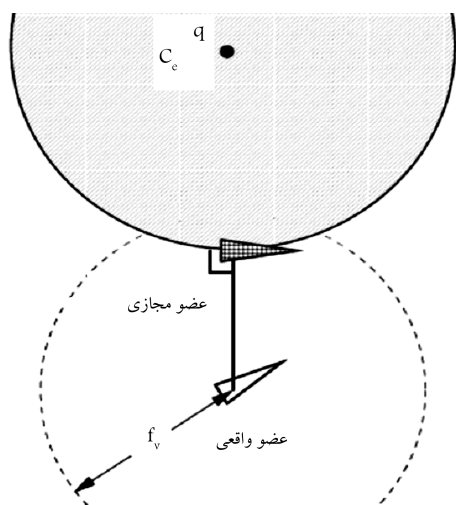
تابع اثر مانع دارای دامنه‌ی اثر نسبتاً کوچکی است. در واقع هدف اصلی عدم برخورد اعضا به مانع است که می‌تواند از طریق دافعه در فواصل بسیار نزدیک محقق شود. بهترین گزینه برای دست‌یابی به این هدف استفاده از پتانسیل دافع در محل مانع است. در این روش پس از تشخیص مانع توسط عضو، در محل مانع یک پتانسیل دافع قرار داده شده و گرادیان آن به‌عنوان تابع تحریک مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به محدودیت شعاع دایره‌ی مشاهده‌ی اعضا، تابع اثر مانع باید چنان طراحی شود که در فاصله‌ی برابر با شعاع دایره‌ی مشاهده‌ی اعضا به صفر میل کند. شدت تحریک این تابع با نزدیک شدن عضو به مانع شدیداً افزایش می‌یابد و شدت نهایی آن بر تمام تحریکات دیگر در هر شرایطی غالب است.

در یک مدل‌سازی مناسب باید امکان تداخل با موانع به‌طور کامل از میان برداشته شود. در این روش دافعه‌ی مانع روی مرز آن شدت می‌گیرد^[۱] و با غلبه بر اثر سایر تحریکات باعث عدم تداخل مسیر حرکت اعضا با مرز مانع می‌شود. نحوه‌ی کار بدین شکل است که در محل تقاطع مرز مانع و خط واصل بین عضو و مرکز مانع، یک عضو مجازی در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱). بنابراین تعداد همسایه‌های مجازی هر عضو به تعداد موانعی است که در آن لحظه در نزدیکی‌اش قرار دارد. تحریک این همسایگان مجازی تنها از نوع دافع است و هیچ عامل پایداری بین آنها وجود نخواهد داشت.

با استفاده از موقعیت عضو x^i و موقعیت مرکز مانع c_q^e ، موقعیت عضو مجازی بین عضو i و مانع q ، \hat{x}_q^i در هر لحظه مطابق رابطه ۲ محاسبه می‌شود:^[۲]

$$\hat{x}_q^i = \theta x^i + (1 - \theta) c_q^e \quad (2)$$

اگر R_k اندازه‌ی شعاع مانع باشد، آنگاه: $\theta = R_k / \|x^i - c_q^e\|$. اثر دفع‌کننده‌ی عضو مجازی \hat{x}_q^i روی عضو i را می‌توان با معادله‌ی مشابه



شکل ۱. نحوه‌ی ایجاد عضو مجازی روی مرز مانع.^[۲]

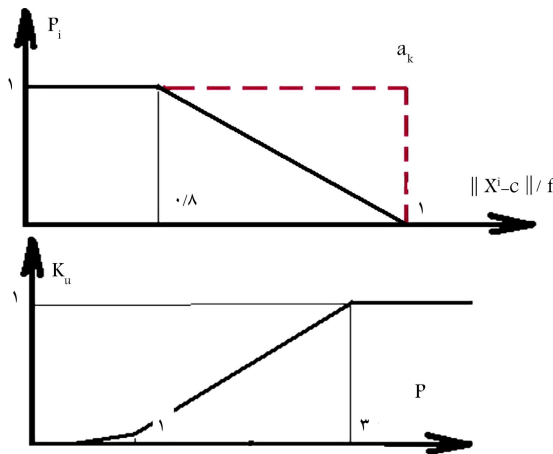
۲. فرضیات اولیه و قوانین رفتاری

یک مجموعه‌ی همگن با حداقل دو عضو را در نظر بگیرید که در آن تعداد اعضا با M مشخص می‌شود. اعضا بدون تأخیر حرکتی و بی‌بعد فرض می‌شود، که در این‌گونه مباحث فرضی متداول است.^[۸,۷,۳,۱] فضای مورد مطالعه یک فضای صفحه‌یی است و حرکات هر یک از اعضا تابعی از اثر هم‌زمان حداقل سه عامل متفاوت است: ۱. اثر عضو راهبر که در اینجا با شماره صفر به آن اشاره می‌شود؛ ۲. اثر عضو یا اعضای دیگر؛ ۳. اثر موانع محیطی. هر عضو محدودده‌ی مشاهده و نیز محدودده‌ی اثرپذیری محدودی دارد که در مباحث تحلیلی مانند اینجا می‌توان آنها را برابر فرض کرد. به‌عنوان مثال برای عضو شماره i چنانچه عامل تحریک مورد نظر از فاصله‌ی مشخص f دورتر باشد برای عضو شماره i قابل مشاهده نبوده و تأثیری بر حرکت آن نخواهد داشت. اثر عامل تحریک‌کننده در صورتی که قابل مشاهده باشد، به‌صورت بردار موازی خط واصل بین موقعیت عامل تحریک و موقعیت عضو i بیان می‌شود. رابطه‌ی کلی حاکم بر حرکت هر عضو در یک قالب حرکت سینماتیکی چنین فرض می‌شود:

$$\dot{X}^o = \Gamma u^o + \Omega^o$$

$$\dot{x}^i \Big|_{x^i \neq x^j} = \sum_{x^j \in N^i} G^{ij} + \Omega^i \quad (1)$$

بردار اثر عضو شماره z روی عضو شماره i توسط تابع G^{ij} بیان می‌شود و Ω^i بردار مجموعه اثرات عوامل محیطی یا همان موانع است. $G^{ij} = G(x^i, x^j) = (G_v^{ij}, G_r^{ij})^T$ یک تابع برداری است که اثر عضو همسایه‌ی مستقر در موقعیت $x^j = (x_v^j, x_r^j)^T$ را بیان می‌دارد. اعضای i و z همسایه‌اند اگر و فقط اگر $\|x^i - x^z\| \leq f$ ، که در آن $\|\cdot\|$ نشان‌گر نرم اقلیدسی است.



شکل ۲. ضریب تصحیح کنترلر.

K_u نیز کاهش می‌یابد و پیش از آن که P صفر شود، با صفر شدن ضریب K_u پیشروی کاملاً متوقف می‌شود. در این سیستم از فازی‌ساز و فازی‌زدای سینگلتنون استفاده شده است.

۵. تعامل بین‌عضوی جهت‌دار

محدودیت‌های ارتباطی بین اعضا و همگانی‌نبودن اثر عضو راهبر باعث می‌شود تا در مواجهه با گذرگاه‌های باریک، سیالیت لازم برای عبور وجود نداشته باشد. هنگام مواجهه با یک گذرگاه باریک معمولاً راهبر به دلیل جلودار بودن ابتدا وارد گذرگاه می‌شود اما در همان ابتدای گذرگاه متوقف می‌شود. برای درک این موضوع کافی است که شرایط عضو بعد از راهبر را تحلیل کنیم. این عضو از سمت جلو فقط با راهبر و از سمت عقب حداقل با یک عضو دیگر متصل است. شدت تحریک راهبر نباید بر شدت تحریکات بین‌عضوی غلبه داشته باشد زیرا در چنین شرایطی ممکن است راهبر و پیرو مستقیم آن از گروه جدا شده و سایر اعضا پشت گذرگاه باقی بمانند. بنابراین چنانچه در اینجا نیز از یک ساختار شبکه‌یی غیرجهت‌دار استفاده کنیم، آنگاه تعدد اتصالات بستی برای یک عضو پیرو، همواره گروه را پشت گذرگاه متوقف خواهد کرد. البته روش‌هایی برای کاهش تعداد اتصالات بین اعضا در یک شبکه‌ی غیرجهت‌دار پیشنهاد شده که مبنای آنها ایجاد توافق بر پایه‌ی حذف اتصال بین دو عضو همسایه است. در این روش‌ها دو عضو همسایه با این که در حوزه‌ی مشاهده‌ی یکدیگر قرار دارند، در یک تصمیم‌گیری توافقی اثرپذیری از یکدیگر را صفر می‌کنند. لازمه‌ی این‌گونه روش‌ها انتشار اطلاعات بین تمام اعضای گروه و تصمیم‌گیری‌های گروهی است که برای گروه‌های پرتعداد نیاز به انتقال اطلاعات وسیعی دارد.

اما با نگاهی به آنچه که در طبیعت در گروه‌های پرتعداد، در گذر از گذرگاه‌های باریک اتفاق می‌افتد درمی‌یابیم که استفاده از یک شبکه‌ی غیرجهت‌دار تطبیق چندانی با رفتارهای همگانی موجودات حداقل در چنین شرایطی ندارد. علت آن است که برای یک عضو، حفظ اتصال با عضو پیشرو و پیرو از ارزش یکسانی برخوردار نیست. در طبیعت همواره هر عضو برای اتصال با عضو پیشرو اولویت بیشتری قائل است تا اتصال با عضو پیرو. بنابراین در مواجهه با یک گذرگاه باریک، اعضا با چشم‌پوشی از تعدادی از اتصالات‌شان با اعضای پیرو و اولویت قائل شدن برای عضو پیشرو، می‌توانند به نوبت از گذرگاه عبور کنند.

نکته‌ی حائز اهمیت این است که برخلاف موجودات زنده، عضو یک گروه از

معادله‌ی ۳ شبیه‌سازی کرد:

$$\tau_{iq} = \frac{x^i - \hat{x}_q^i}{(\|x^i - \hat{x}_q^i\|)^n} \quad (3)$$

که در آن $n \geq 2$ است. هرچه n بزرگ‌تر انتخاب شود، اثر دافعه‌ی مانع با فاصله گرفتن از آن شدیدتر افت می‌کند. مجموع اثرات موانع روی حرکت عضو شماره i را می‌توان توسط رابطه‌ی ۴ بیان کرد:

$$\Omega^i = \sum_{q=1}^N \tau_{iq} \quad (4)$$

که در آن N تعداد موانع است.

۴. الگوریتم حرکتی عضو راهبر

گرچه تمام اعضا دارای محدودیت ارتباطی فرض شده‌اند، اما حرکت گروهی تنها تحت تأثیر حرکت عضو راهبر اتفاق می‌افتد. مسیر دلخواه حرکت گروهی را می‌توان توسط بردار یک‌ه‌ی u^i که معرف راستای مطابوب حرکت عضو پیشرو است، بیان کرد. به دلیل وجود موانع نمی‌توان سرعت ثابتی برای حرکت گروهی پیش‌بینی کرد و سرعت حرکت عضو راهبر باید با توجه به شرایط لحظه‌یی تنظیم شود. از آنجا که اثر دافعه‌ی موانع باید بر هراتر دیگری غلبه داشته باشد، تحریکات بین‌عضوی نمی‌تواند اثر جاذبه‌یی نامحدود داشته باشد و لذا این تصور که اعضا در هر شرایطی اتصال خود را با عضو راهبر حفظ می‌کنند صحیح نیست، و در صورت زیاد بودن سرعت حرکت عضو راهبر قطعاً سایر اعضا جا خواهند ماند.

بنابراین نیازمند یک الگوریتم اصلاح‌کننده برای تعیین سرعت حرکت عضو راهبر، Γ هستیم به نحوی که در صورت کندشدن حرکت گروه، عضو راهبر با کم کردن سرعت و حتی توقف، فرصت جبران عقب‌افتادگی را برای گروه فراهم سازد. برای این کار، با استفاده از تعداد اعضای همسایه راهبر و با تعریف P به شکل زیر آغاز می‌کنیم.

$$P = \sum_{\substack{k=1 \\ k \in N^*}}^M p_k \quad (5)$$

که در آن: اگر $\|x^k - x^0\| \rightarrow 0$ آنگاه $p_k \rightarrow 1$ و اگر $\|x^k - x^0\| \rightarrow \infty$ آنگاه $p_k \rightarrow 0$.

بنابراین کاهش P (یعنی $P \rightarrow 0$) معیاری از نزدیک شدن به شرایط قطع ارتباط راهبر با پیروان مستقیم آن است. در این شرایط لازم است با محدود کردن سرعت راهبر، از وضعیت قطع اتصال گروه با راهبر ممانعت شود. برای این کار از ضریب تصحیح‌کننده‌ی $K_u \in [0, 1]$ استفاده می‌شود (شکل ۲). این ضریب توسط یک الگوریتم سوپروایزری فازی تعیین می‌شود و سرعت راهبر یعنی Γ را تعیین می‌کند. نقش این ضریب در رابطه‌ی ۶ نشان داده شده است.

$$\Gamma = K_u \cdot U_m \quad (6)$$

که در آن U_m یک سرعت پیش‌فرض برای عضو راهبر است و با توجه به شرایط بهینه حرکتی در محیط بدون مانع تعیین می‌شود.

در شرایط عادی ($P \geq 3$) که خطری اتصال گروه را تهدید نمی‌کند $K_u = 1$ است و راهبر گروه را با حداکثر سرعت به پیش می‌برد. چنانچه هرگونه عامل خارجی (نظیر موانع) باعث کندی حرکت گروه شود، P کاهش می‌یابد. با کاهش P ضریب

دست کم یک عضو تعقیب‌کننده باشد وگرنه بروز گسستگی بسیار محتمل است.

۶. الگوریتم هدایت گروه از گذرگاه باریک

به‌عنوان راهبر گروه، عضو پیشرو در موقعیت جلودار پیش از سایر اعضا از گذرگاه عبور، و مسیر حرکت سایر اعضا را تعیین می‌کند. برای این که معیاری از باریک بودن گذرگاه داشته باشیم باید بیان کمی از آن ارائه کنیم. معمولاً عرض گذرگاه ملاک ارزیابی قرار می‌گیرد. متداول است که گذرگاه‌هایی با عرض دو تا سه برابر شعاع حوزه‌ی مشاهده و اثر بین عضوی ($2f$ تا $3f$) به‌عنوان گذرگاه باریک شناخته می‌شود. ^[۱] در این مقاله گام فزاینده‌ایم و قصد داریم تا با ارائه‌ی الگوریتم مناسب، عبور گروه از گذرگاه‌هایی حتی به عرض f را نیز ممکن سازیم. به بیان دیگر هدف فراهم آوردن امکان عبور گروه از هر گذرگاهی است که یک عضو به‌تنهایی توانایی عبور از آن را دارد.

محل‌ی بودن اطلاعات اعضا در مورد محیط و عدم وجود عامل تأثیرگذار همگانی باعث می‌شود تا اعضا به‌تنهایی توانایی تشخیص جهت صحیح حرکت در مجاورت یک مانع را نداشته باشند. در گذر از فضای بین موانع همواره عضو پیشرو جلودار است و چنانچه این فضا باریک باشد، تمایل اعضا به حفظ اتصالات با اعضای مجاور مانع از همراهی آنها با پیشرو می‌شود. در چنین شرایطی الگوریتم سوپروایزری باعث توقف پیشرو و ممانعت از قطع ارتباط آن با گروه می‌شود، اما فاصله‌ی پیشرو با پیرو مستقیم خود، در مقدار غیرصفر ثابت باقی می‌ماند. در این شرایط اگر پیرو مستقیم پیشرو بتواند با حفظ حداقل یک اتصال در پشت سر خود، به سمت پیشرو حرکت کند، گام مثبتی در جهت عبور گروه از گذرگاه برداشته می‌شود. این عضو با عبور از گذرگاه، به‌عنوان جلودار اعضای بعدی مطرح می‌شود و می‌توان با ایجاد یک ساختار توزیع شده‌ی پیشرو - پیرو در گروه، پیکربندی گروه را به شکلی تغییر داد که امکان عبور از گذرگاه فراهم شود.

بررسی عددی نشان می‌دهد که در اثر حرکت، فاصله‌ی بین اعضا تغییر چندانی ندارد. اما تنها استناد به زیاد شدن فاصله، معیار مناسبی برای توجیه استفاده از ساختار توزیع شده‌ی پیشرو - پیرو نیست. بنابراین چنین عمل می‌کنیم: ابتدا عضوی را که مستقیماً تحت تأثیر پیشرو است مورد بررسی قرار می‌دهیم:

الف) اولین شرط این است که پیشرو در یک سو و سایر اعضای همسایه در سوی دیگر قرار گرفته باشند. بررسی در چنین شرطی بدین شکل است که عضو مورد نظر به‌صورت محلی و براساس دستگاه مختصات، زاویه‌ی قرارگیری همسایگان و پیشرو را محاسبه کرده و دو عضوی که پیشرو از نظر زاویه‌ی مابین آنها قرار دارد را مشخص می‌کند. چنانچه زاویه‌ی بین این دو عضو بزرگ‌تر از نیم‌صفحه باشد (شکل ۵)، عضو مورد نظر خود را به‌عنوان پیرو مستقیم عضو پیشرو شناسایی می‌کند. زاویه‌ی بین دو عضوی که در دو طرف پیشرو قرار گرفته‌اند را α نامیده و شرط فوق را به‌صورت $\alpha > 180^\circ$ بیان می‌کنیم. توجه داشته باشید که در محاسبه‌ی زاویه‌ی α تنها اعضای حقیقی ملاک‌اند و اعضای مجازی که برای جلوگیری از برخورد اعضا با موانع روی مرز آنها ایجاد می‌شوند، هیچ تأثیری در محاسبه‌ی α ندارند. در شکل ۵ اتصالاتی که یک سر آنها به مانع ختم شده، در واقع اتصال بین یک عضو حقیقی و یک عضو مجازی‌اند.

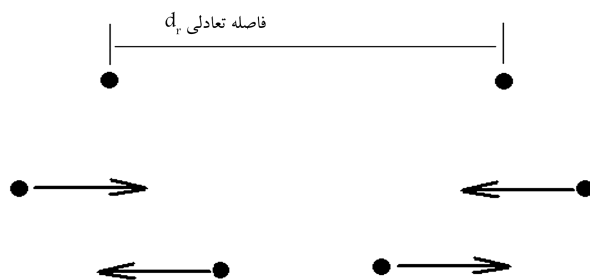
برای بیان ریاضی این شرط از شاخصی به‌نام «شاخص زاویه‌ی (AI)»^۱ استفاده می‌کنیم. این شاخص که دارای مقدار صحیح صفر یا ۱ است (شکل ۶) چنین تعریف می‌شود:

رویات‌ها حوزه‌ی مشاهده‌ی بسیار محدودی دارد و باید بتواند بدون استفاده از سیلان اطلاعات در گروه و توافق با اعضای مجاور، جهت مقابل و پشت سر را تعیین کند. بنابراین یک عضو نیاز دارد تا تنها با استفاده از هندسه‌ی موقعیت ظاهری اعضای مجاور عضو پیشرو را از اعضای پیرو خود تمیز دهد.

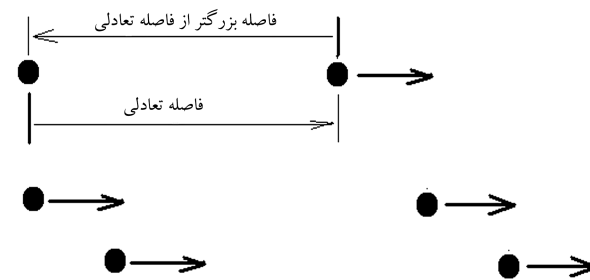
در یک شبکه‌ی بین‌عضوی غیرجهت‌دار، تمام اعضا در یک یکسانی از فاصله‌ی تعادلی با عضو همسایه دارند. چنانچه فاصله‌ی دو عضو از هم بیش از فاصله‌ی تعادلی باشد، هر دو نسبت به هم رفتار هم‌گرا بروز می‌دهند و اگر فاصله‌ی آنها کم‌تر از مقدار تعادلی باشد، هر دو نسبت به هم رفتار واگرا بروز خواهند داد (شکل ۳). همگونی رفتارها برای هر دو عضو همسایه باعث یکسان بودن ارزش اتصالات در جهات مختلف شده و شبکه‌ی حاصله را به‌عنوان یک شبکه‌ی غیرجهت‌دار مطرح می‌کند. مفهوم شبکه‌ی غیرجهت‌دار به‌زبان ریاضی از طریق توابع تحریک بیان می‌شود: $\forall i, j \in [1, M] : G^{ij} = G^{ji}$.

در یک شبکه‌ی جهت‌دار اعضا تحریکات مشابه از یکدیگر دریافت نمی‌کنند. فاصله‌ی بین اعضا نسبت به عضو دوم فاصله‌ی تعادلی محسوب می‌شود برای عضو دوم بیشتر یا کم‌تر از تعادل است و موجب می‌شود تا عضو دوم در تعادل قرار نگرفته و حرکت کند. در شکل ۴ این شرایط نشان داده شده است. در این شکل در شرایط اولیه عضو سمت چپ در تعادل است و عضو سمت راست در فاصله‌ی کم‌تر از تعادل قرار دارد که باعث حرکت آن به سمت راست برای رسیدن به تعادل می‌شود. این حرکت باعث ازدیاد فاصله‌ی بین دو عضو شده و عضو سمت چپ برای رسیدن به تعادل به سمت راست حرکت می‌کند. عدم توافق دو عضو روی اندازه فاصله‌ی تعادلی در این حالت به یک رفتار گریز و تعقیب بدل شده که مانند حالت قبل، به حرکت هر دو آنها -- حتی در نبود عامل تحریک خارجی مانند عضو راهبر -- می‌انجامد.

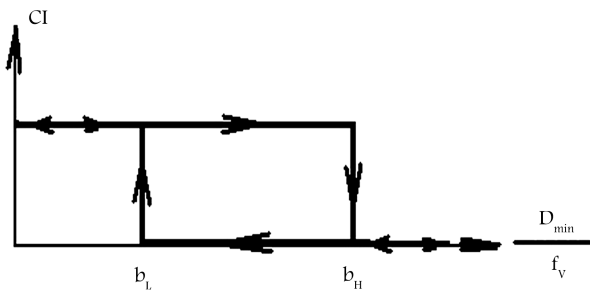
چنانچه حالت فوق در یک شبکه اتفاق بیفتد، آن شبکه از حالت غیرجهت‌دار خارج می‌شود و حتی بدون تحریک خارجی نیز حرکت می‌کند. در این حالت عضوی که عمل گریز را آغاز می‌کند باید همواره مراقب عدم قطع اتصال خود با



شکل ۳. رفتار بین‌عضوی در یک شبکه‌ی غیرجهت‌دار.



شکل ۴. رفتار بین‌عضوی در یک شبکه‌ی غیرجهت‌دار (الگوریتم تعقیب).



شکل ۸. نمایش تابع CI برحسب D_{min} .

برای بیان شرط دوم از شاخص فاصله‌ی پیشرو- پیرو (LFDI) استفاده می‌شود که می‌تواند مقدار صحیح صفر یا ۱ داشته باشد (شکل ۷). شکل ۷ گویای الگوریتم زیر است:

(i) اگر $\|x^i - x^o\| > a_H f$ است، آنگاه $LFDI = 1$.

(ii) اگر $\|x^i - x^o\| < a_L f$ است، آنگاه $LFDI = 0$.

(iii) اگر $a_L f < \|x^i - x^o\| < a_H f$ و $LFDI = 1$ است، آنگاه $LFDI = 1$.

(iv) اگر $a_L f < \|x^i - x^o\| < a_H f$ و $LFDI = 0$ است، آنگاه $LFDI = 0$.

$LFDI = 1$ بیان‌گر برقراری شرط دوم و $LFDI = 0$ بیان‌گر عدم برقراری شرط دوم است. بنابراین تا زمانی که $LFDI = 1$ و $AI = 1$ باشند، شرایط برای حرکت پیرو به دنبال پیشرو آماده است و با صفر شدن هریک از دو ضریب مذکور، حرکت پیرو متوقف خواهد شد.

(ج) شرط سوم عدم قطع اتصال با اعضای پشتی را تضمین می‌کند. برقراری همزمان دو شرط اول باعث آماده شدن شرایط برای حرکت عضو به سمت پیشرو و چشم‌پوشی موقت از برقرار نگه داشتن اتصال‌ها با اعضای همسایه می‌شود. اما این حرکت نباید به قطع کامل ارتباط عضو با سایر اعضا منجر شود. برای بررسی این شرط، عضو پیرو، که موقعیت آن با x^f نمایش داده می‌شود، همواره کم‌ترین اندازه فاصله‌اش با سایر اعضای همسایه یعنی $\|x^f - x^i\|$ ، $D_{min} = \min_{i \in N_f} \{\|x^f - x^i\|\}$ را ملاک قرار داده و پایش می‌کند. چنانچه این فاصله از یک حد بحرانی بیشتر شود، حرکت خود به سمت پیشرو را متوقف می‌سازد. باز هم به دلیل جلوگیری از بروز نوسانات نامطلوب از حلقه‌ی هیستریزس با کران بالا و پایین b_L و b_H استفاده می‌شود که همواره $b_L < b_H < 1$ است. این حلقه در شکل ۸ نشان داده شده و حاصل آن شاخص اتصال (CI) است. مقدار شاخص اتصال ممکن است صفر یا ۱ باشد و تغییرات آن تابع الگوریتم زیر است:

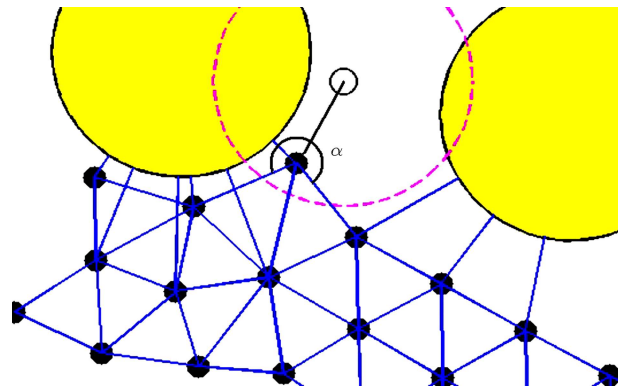
(i) اگر $D_{min} > b_H f_v$ است، آنگاه $CI = 0$.

(ii) اگر $D_{min} < b_L f_v$ است، آنگاه $CI = 1$.

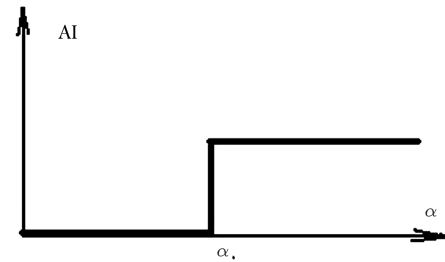
(iii) اگر $b_L f_v < D_{min} < b_H f_v$ و $CI = 0$ است، آنگاه $CI = 0$.

(iv) اگر $b_L f_v < D_{min} < b_H f_v$ و $CI = 1$ است، آنگاه $CI = 1$.

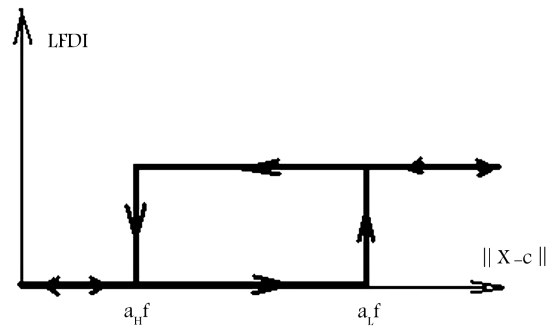
$CI = 1$ بیان‌گر برقراری شرط سوم و برقراری اتصال با اعضای پشتی است و $CI = 0$ به مفهوم عدم برقراری شرط سوم یا بالا بودن احتمال قطع ارتباط عضو پیرو با بقیه‌ی گروه است.



شکل ۵. نمایش زاویه‌ی α در مورد اتصال عضو- پیشرو.



شکل ۶. نمایش تابع شاخص زاویه‌ی برحسب α .



شکل ۷. نمایش تابع LFDI برحسب $\|x^i - x^o\|$.

$$AI = \frac{1}{2} \{1 + \text{sign}(\alpha - \alpha^o)\} \quad (7)$$

$AI = 1$ نشان‌دهنده‌ی برقراری شرط اول، و $AI = 0$ نشان‌دهنده‌ی عدم برقراری آن است.

(ب) شرط دوم این است که عضو پیشرو از پیرو مستقیم خود فاصله بگیرد. فاصله گرفتن پیشرو از پیرو مستقیم خود معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که گروه پشت موانع متوقف است. بنابراین چنانچه این فاصله از یک حد بحرانی بیشتر شود (و شرط اول نیز برقرار باشد)، پیرو می‌تواند با اولویت دادن به اتصالش با پیشرو، به سمت آن حرکت کند تا گام مثبتی در راستای عبور گروه از مانع برداشته شود.

اما این شرط به یک رفتار نوسانی منجر خواهد شد چرا که به محض بزرگ تر شدن فاصله‌ی پیشرو و پیرو از حد بحرانی، پیرو به سمت پیشرو حرکت کرده و فاصله از حد بحرانی کوچک‌تر می‌شود. بنابراین استفاده از یک حلقه‌ی هیستریزس برای جلوگیری از رفتارهای نوسانی نامطلوب الزامی است. این حلقه در شکل ۷ نشان داده شده است. دو کران بالا و پایین حلقه‌ی هیستریزس توسط ضرایبی از شعاع دایره‌ی اثر پیشرو تعیین می‌شود که هر دو دارای مقدار مثبت کوچک‌تر از واحدند. این دو ضریب a_H و a_L هستند و همواره $a_H > a_L > 1$.

چنین الگوریتمی باعث می‌شود تا هر عضوی که به‌عنوان پیرو حرکات جهت‌دار بروز می‌دهد، چند لحظه بعد به‌عنوان پیشرو هدایت دنباله‌ی خود را به عهده بگیرد. به این ترتیب یک ساختار توزیع شده‌ی پیشرو - پیرو در شبکه ایجاد شده و با خروج بعضی از گره‌های شبکه‌ی گروه از حالت غیرجهت‌دار، پیکربندی شبکه‌ی گروه در جهت عبور از گذرگاه متحول می‌شود. بنابراین الگوریتم راهبری برای عبور از گذرگاه، در قالب سه شرط قابل ارائه است. این الگوریتم توسط هر یک از اعضا بررسی می‌شود و به‌واسطه‌ی آن هر عضو تعیین می‌کند که آیا می‌تواند به‌عنوان یک پیرو، حرکات جهت‌دار انجام دهد یا خیر:

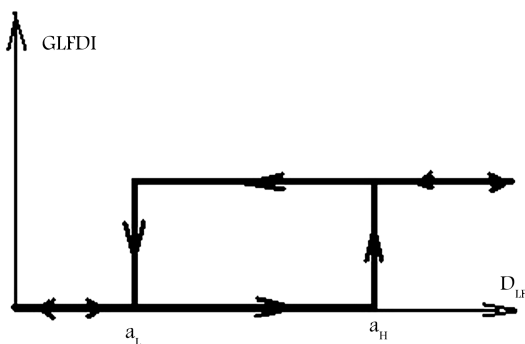
الف) تعیین یک کاندیدا به‌عنوان عضو پیشرو. هر عضو، به‌عنوان مثال عضو α ، در هر لحظه فاصله با همسایگان را کنترل می‌کند. چنانچه طول یکی از اتصال‌ها با همسایگان به‌اندازه‌ی بزرگ شود که LFDI برای آن عضو برابر ۱ شود، آن عضو به‌عنوان پیشرو برای عضو α کاندیدا می‌شود. در صورتی که عضو در دایره‌ی اثر پیشرو قرار داشته باشد تنها طول اتصال با پیشرو را پایش کرده و از سایر اعضا صرف‌نظر می‌کند. شکل تعمیم‌یافته‌ی شاخص فاصله‌ی پیشرو - پیرو 11 یا GLFDI در شکل ۱۰ نشان داده شده که بیان‌گر الگوریتم ۹ است. در اینجا D_{LF} برابر است با اندازه‌ی بی‌بعد شده بین پیشرو (حقیقی یا مجازی) و پیرو که همواره کوچک‌تر از واحد است. در مورد پیشرو حقیقی $D_{LF} = \|x^i - x^0\|/f$ و در مورد پیشرو مجازی $D_{LF} = \|x^i - x^j\|/f$ است که در آن $i \in N_i$ است.

$$\begin{aligned} & \text{(i) اگر } D_{LF} > a_H \text{ آنگاه } \text{GLFDI} = 1 \\ & \text{(ii) اگر } D_{LF} < a_H \text{ آنگاه } \text{GLFDI} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

(iii) در غیر این صورت مقدار GLFDI بدون تغییر باقی می‌ماند (مقدار ابتدایی GLFDI به‌صورت پیش فرض برابر صفر است).

بنابراین، با استناد به اتصال‌هایی که طول آنها افزایش یافته، برای هر عضو تعدادی کاندیدای پیشرو مجازی مشخص می‌شود که موقعیت آنها را با مجموعه $\{x^L\}$ نمایش می‌دهیم.

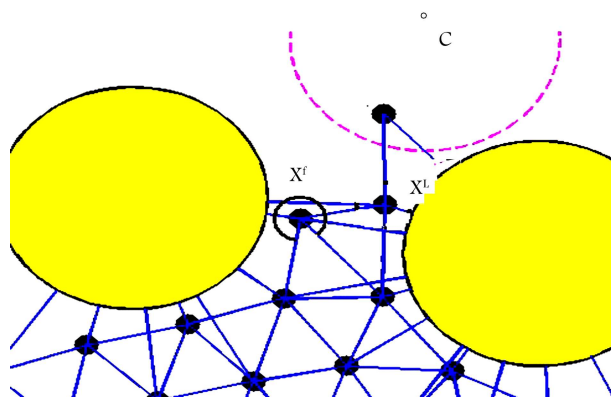
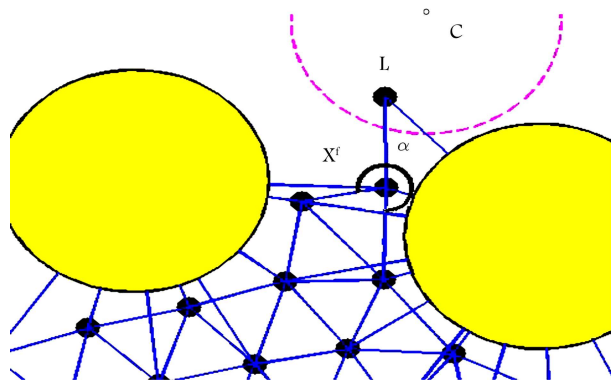
ب) تثبیت یک عضو به‌عنوان پیشرو. از میان مجموعه کاندیداها، یعنی $\{x^L\}$ ، تنها یک کاندیدا را می‌توان به‌عنوان پیشرو تعیین کرد که موقعیت آن با x^L نشان داده خواهد شد. این کاندیدا عضوی است که شاخص زاویه (AI) برای آن برابر ۱ است و سایر کاندیداها به‌دلیل این که شاخص زاویه برای آنها برابر صفر است، شرایط لازم را کسب نمی‌کنند. برای تمام همسایه‌های عضو α شاخص زاویه از رابطه‌ی ۷ و مطابق آنچه که در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده محاسبه می‌شود. همسایه‌هایی که شاخص زاویه برای آنها برابر ۱ است مجموعه‌ی تشکیل می‌دهند که موقعیت اعضای آنها با $\{x^L\}$ نمایش داده می‌شود. بنابراین موقعیت پیشرو



شکل ۱۰. نمایش تابع GLFDI برحسب D_{LF} .

سه شرط فوق که هر یک با یک شاخص بیان شده‌اند شرایطی هستند که در صورت برقراری همزمان باعث می‌شوند عضو پیرو با حفظ اتصالش به گروه به سمت عضو پیشرو حرکت کند. در واقع با این کار در محل عضو پیرو شبکه حالت جهت‌دار پیدا کرده و عضو پیرو با لحاظ کردن اولویت برای اتصال خود با پیشرو نسبت به سایر اتصالات، به سمت پیشرو حرکت می‌کند. این حرکت تا زمانی که ترکیب عطف شاخص‌های CI، LFDI، AI ارزش یک داشته باشد ادامه یافته و به محض صفر شدن ارزش یکی از شاخص‌ها، که به صفر شدن ترکیب عطف آنها می‌انجامد، متوقف می‌شود. ترکیب عطف به صورت زیر تعریف می‌شود: (CI and LFDI and AI)

اما این تنها آغاز حرکت است. برای عبور گروه از گذرگاه باید رفتار پیرو توسط اعضای بعدی تکرار شود تا منجر به تحول اساسی در پیکربندی شبکه‌ی گروه شود. اما اعضای بعدی لزوماً تحت تأثیر مستقیم راهبر نیستند و این مسئله لزوم ایجاد ساختار توزیع شده پیشرو - پیرو در شبکه‌ی گروه را تقویت می‌کند. نگاهی به الگوریتم سه‌بخشی فوق نشان می‌دهد که حرکت پیرو به سمت پیشرو تنها به‌دلیل پیشگیری از قطع اتصال با دنباله‌ی خود در حالی متوقف می‌شود که فاصله‌ی پیرو با دنباله‌اش بیش از مقدار تعادلی d_r است (شکل ۹الف). در اینجا برای ادامه‌ی حرکت لازم است عضوی که برای راهبر به‌عنوان پیرو به‌شمار می‌رفته، خود نقش پیشرو را برای دنباله‌اش ایفا کند. بنابراین از دیدگاه دنباله، این عضو که موقعیت آن اکنون دیگر با x^L مشخص می‌شود (شکل ۹ب)، نقش پیشرو را دارد و خود دنباله نیز به‌عنوان پیرو، باید با اولویت قائل شدن برای متصل شدن با این پیشرو مجازی، به سمت آن حرکت کند. در اینجا نیز همان الگوریتمی که باعث حرکت پیرو به سمت پیشرو شده بود، باعث حرکت پیرو جدید به سمت پیشرو جدید (یا x^L) می‌شود. موقعیت پیرو جدید با x^f نمایش داده می‌شود (شکل ۹ب).



شکل ۹. نمایش زاویه‌ی α و نحوه‌ی تعیین پیشرو - پیرو در شبکه‌ی غیرجهت‌دار.

۷. شبیه‌سازی و بحث

برای ارزیابی الگوریتم ارائه شده و بررسی کارایی آن در عبور دادن گروه از یک گذرگاه باریک، حرکت یک مجموعه‌ی ۲۴ عضوی از اعضا در محیط نرم‌افزاری متلب شبیه‌سازی شده است. شرایط اولیه‌ی قرارگیری اعضا به‌گونه‌ی است که هر عضو به بیش از یک عضو همسایه متصل است. دو عضو همسایه در صورتی که فاصله‌ی آنها بیش از f باشد تأثیری بر رفتار حرکتی یکدیگر ندارند و اصطلاح متصل در مورد آنها به کار نمی‌رود. در این شبیه‌سازی f برابر ۲ متر انتخاب شده است. در شکل ۱۱ اعضا با نقاط و اتصالات بین عضوی با خطوط واصله بین آنها نمایش داده شده است.

در شبیه‌سازی شکل ۱۱ دو مانع محدب دایره‌شکل بسیار نزدیک به هم با قطر ۴ متر نیز در نظر گرفته شده است. باید توجه داشت که تعدد مانع در صورتی که فاصله‌ی گذرگاهی بین آنها بزرگ باشد ارزش عملی خاصی نداشته و با مسئله‌ی عدم برخورد به یک مانع هیچ تفاوتی نخواهد داشت. فاصله‌ی گذرگاهی بین مانع تنها پارامتر مهم و تعیین‌کننده در رفتار گروهی خواهد بود. این که یک گروه از اعضا بدون بهره‌مندی از الگوریتم ارائه شده در این مطالعه قابلیت عبور از چه گذرگاهی را دارد، به متغیرهای متنوعی همچون شرایط اولیه‌ی قرارگیری اعضا نسبت به هم، تعداد اتصالات و صلیبیت گروه، شدت و ضعف توابع تعاملی بین اعضا و... وابسته بوده و غیرقابل پیش‌بینی است. اما به‌عنوان معیاری از توانایی این الگوریتم در عبور از مانع، فضای گذرگاهی بین دو مانع برابر f در نظر گرفته شده که کم‌ترین فاصله‌ی گزارش شده در سایر مطالعات است. در شکل ۱۱ اتصالات بین بعضی اعضا و مانع نشان‌دهنده‌ی اتصالات این اعضا و اعضای مجاری روی محیط مانع است. در واقع این خطوط بیان‌گر این واقعیت‌اند که تنها اعضای محدودی که در مجاورت مانع‌اند وجود مانع را حس کرده و در الگوریتم حرکتی خود لحاظ کرده‌اند و اعضای دیگر به دلیل فاصله‌ی بیش از شعاع حوزه‌ی مشاهده، اطلاعی از وجود مانع ندارند. برای جلوگیری از تکرار مکررات، تابع تحریک بین عضوی^[۲۱] به‌گونه‌ی انتخاب

فرضی به این صورت حاصل می‌شود: $x^L = \{\hat{x}^L\} \cap \{x^L\}$ که تنها حاوی یک عضو خواهد بود. چنانچه حاصل عبارت فوق تهی باشد، به مفهوم عدم وجود پیشرو برای عضو i ام است. اما در صورت وجود x^L ، این همسایه به‌عنوان پیشرو فرضی تلقی شده و عضو i ام به‌عنوان پیرو، به‌صورت جهت‌دار به سوی آن حرکت خواهد کرد. در این صورت موقعیت عضو i ام با x^f شناسایی می‌شود.

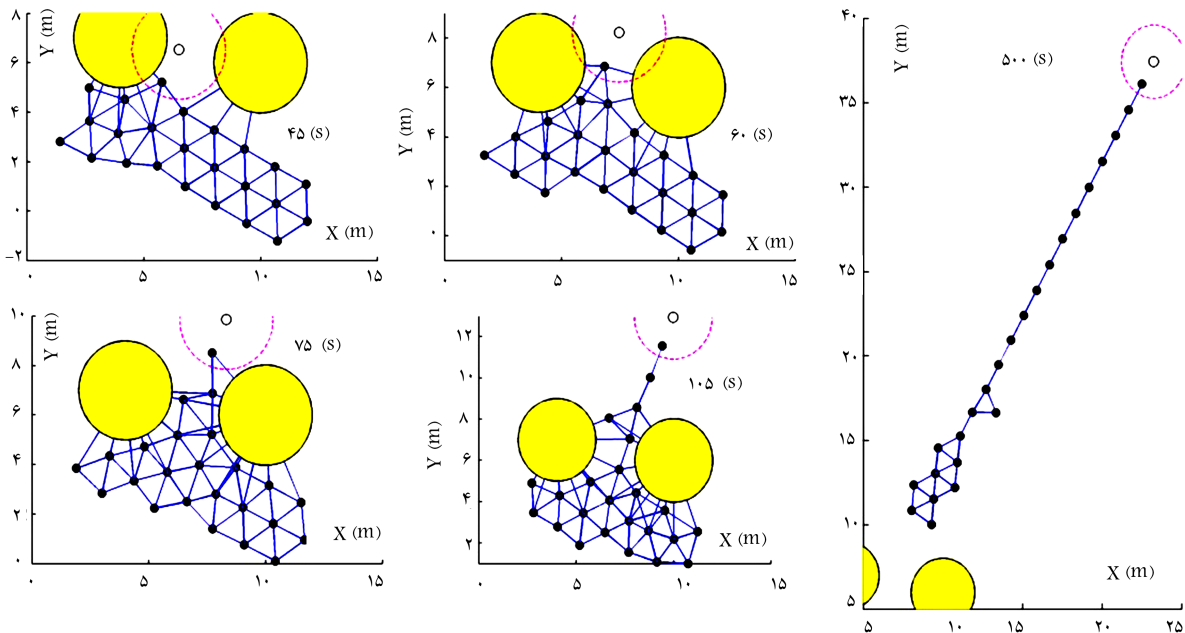
ج) شرط برقراری اتصال - پیرو (x^f) برای یکی از همسایگان یعنی (x^L) اولویت قائل شده و به‌سوی آن حرکت می‌کند. اما این حرکت پیرو نباید باعث قطع تمامی اتصالات دیگر شود. بنابراین براساس مقدار $D_{\min} = \min_{x^j \neq x^L} \{\|x^f - x^j\|\}$ شاخص اتصال (CI) محاسبه می‌شود که غیرصفر بودن آن نشان از برقراری اتصال دارد.

با توجه به این که هر یک از سه شرط یادشده توسط یک شاخص به‌صورت کمی قابل پایش‌اند، و با توجه به لزوم برقراری هر سه آنها، شرط این که عضو i ام به‌عنوان پیرو، حرکت جهت‌دار انجام دهد به‌راحتی با محاسبه‌ی رابطه‌ی ۱۰ تحت عنوان شرط پیروی جهت‌دار^{۱۲} (یا DFI) شناخته می‌شود، قابل بررسی است:

$$DFI = GLFDI \cdot AI \cdot CI \quad (10)$$

در صورت برقراری هر سه شرط، $DFI = 1$ است و عضو i ام در جهت حرکت جهت‌دار انجام می‌دهد. چنانچه هر یک از سه شرط برقرار نباشد، شاخص مربوطه صفر شده و باعث صفر شدن DFI و توقف حرکت جهت‌دار عضو مربوطه می‌شود.

الگوریتم فوق باعث می‌شود تا در صورت لزوم در بعضی از گره‌ها، شبکه جهت‌دار شود و اتصالات در آن گره ارزش یکسانی نداشته باشد، که این ترفند به تغییر پیکربندی شبکه و عبور گروه از گذرگاه می‌انجامد.



شکل ۱۱. عبور گروه از گذرگاهی به عرض f (o: عضو پیشرو، نقاط: اعضای گروه).

مطرح شده در این نوشتار منطبق است و می‌تواند نتایج مشابهی ایجاد کند با این تفاوت که در مطالعه‌ی یادشده، هر عضو علاوه بر اطلاعات اعضای مجاور باید از طریق این اعضا اطلاعات مربوط به سایر اعضای گروه را نیز دریافت کند که با زیاد شدن تعداد اعضای گروه حجم اطلاعات انتقالی بین اعضا به شدت افزایش می‌یابد.

- روش ارائه شده در این مقاله با استفاده از اطلاعات محلی در اطراف هر عضو و بدون نیاز به انتقال اطلاعات حجیم بین اعضا، و همچنین تنها با استفاده از ارتباطات برد کوتاه، می‌تواند با حذف اتصالات‌های بین‌عضوی غیرضروری، صلبیت گروه را کاهش داده و منجر به عبور گروه از فضاهای گذرگاهی باریک شود که این نقطه‌ی قوت اصلی الگوریتم ارائه شده است.

۸. نتیجه‌گیری

الگوریتم توزیع شده‌ی پیشرو- پیرو طراحی شده در این نوشتار با استفاده از اطلاعات کاملاً محلی شبکه، گروه را در برخی از گره‌ها از حالت غیرجهت‌دار خارج می‌کند. این فرایند باعث می‌شود تا گروه قابلیت عبور از گذرگاه‌های باریک را داشته باشد. مهم‌ترین برتری این روش بر روش‌های متداول، سادگی آن و عدم نیاز به تبادل حجم زیاد اطلاعات بین اعضا است، که از دیدگاه عملی در مقایسه با سایر روش‌های موجود بسیار چشمگیر به نظر می‌رسد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از حمایت مرکز بررسی‌های استراتژیک ریاست جمهوری از این پژوهش صمیمانه تشکر می‌کنند.

شده که در آن فاصله‌ی تعادلی بین اعضا $3f/4$ است و در فواصل کوچک‌تر از آن برای جلوگیری از برخورد، دافعه‌ی بین‌عضوی به شکل نمایی افزایش می‌یابد و در فواصل بیش از $3f/4$ و کم‌تر از f جاذبه‌ی بین‌عضوی به صورت خطی افزایش می‌یابد. تعامل با اعضای مجازی نیز تنها به صورت دافعه در مجاورت موانع ایجاد می‌شود که از نظر شدت، بر اثرات بین‌عضوی غلبه دارد. باید توجه داشت که رفتار خطی یا غیرخطی در تعامل بین‌عضوی تأثیری در عملکرد الگوریتم ارائه شده در این مقاله ندارد.

در شکل ۱۱ لحظاتی از شبیه‌سازی حرکت گروه نمایش داده شده است. مقایسه‌ی لحظات مختلف نشان می‌دهد که پس از عبور عضو پیشرو از گذرگاه، اعضای پشتی به نوبت و براساس موقعیت قرارگیری، مطابق الگوریتم ارائه شده عکس‌العمل نشان داده و با حفظ اتصال اعضای گروه از گذرگاه عبور می‌کنند که انتظارات را برآورده کرده و عملکرد الگوریتم را تأیید می‌کند.

گرچه مقایسه‌ی کمی نتایج با سایر روش‌ها به دلیل تفاوت نوع و محدودیت‌های ارتباطات بین‌عضوی، غیرممکن است اما به صورت کیفی و در مقام مقایسه با سایر روش‌های قدرتمند، موارد زیر قابل توجه‌اند:

- روش ارائه شده در مطالعات پیشین^[۲] نیز قابلیت عبور اعضا از گذرگاه باریک را ارائه می‌دهد، اما به دلیل ساختار ضعیف بین‌عضوی، اتصال کلی گروه از بین رفته و در نهایت به دلیل وجود یک ارتباط همگانی تجمیع‌کننده، پس از عبور از موانع و پس از طی زمان متناهی، اعضا در موقعیت نهایی جمع می‌شوند. در اینجا ارتباط تجمیع‌کننده‌ی همگانی وجود ندارد و تنها با تکیه بر ارتباطات کوتاه‌برد بین اعضا نمی‌توان از روشی استفاده کرد که در آن اعضا به راحتی از تمامی اتصالات‌های خود با گروه چشم‌پوشی کنند.

- روش ارائه شده در مطالعه‌ی دیگری^[۱۸] تا حد زیادی با محدودیت‌های ارتباطی

پانویس‌ها

1. virtual leader
2. particle swarm optimization
3. glow-worm swarm optimization
4. Entropy
5. Brownian random dispersal
6. system thermodynamic
۷. ۲۴ گروهی که معادله حاکم بر حرکت اعضای آن از رسته دو باشد.
8. angular index
9. leader-follower distance index (LFDI)
10. connectivity index
11. generalized leader-follower distance index
12. directional following index

منابع (References)

1. Dimarogonas, D.V. and Kyriakopoulos, K.J. "A connection between formation infeasibility and velocity alignment in kinematic multi-agent systems", *Automatica*, **44**(10), pp. 2648-2654 (2008).

2. Olfati Saber, R. "Flocking for multi agent dynamic systems: Algorithms and theory", *IEEE T. Automat. Contr.*, **51**(3), pp. 401-420 (2006).
3. Porfiri, M., Roberson D.G. and Stilwell, D.J. "Tracking and formation control of multiple autonomous agents: A two-level consensus approach", *Automatica*, **43**, pp. 1318-1328 (2007).
4. Su, H., Wang X. and Yang, W. "Flocking in multi-agent systems with multiple virtual leaders", *Asian J. Control*, **10**(2), pp. 238-245 (2008).
5. Su, H. and Wang, X. "Flocking of multi-agents with a virtual leader", *IEEE T. Automat. Contr.*, **54**(2), pp. 293-307 (2009).
6. Jadbabaie, A., Lin, J. and Morse, A.S. "Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules", *IEEE Transactions on Automatic Control*, **48**(6), pp. 988-1001 (2003).
7. Hong, Y., Chen G. and Bushnell, L. "Distributed observers design for leader-following control of multi-agent networks", *Automatica*, **44**, pp. 846-850 (2008).

8. Su, H., Wang X. and Yang, G. "A connectivity-preserving flocking algorithm for multi-agent systems based only on position measurements", *Int. J. Control*, **82**(7), pp. 1334-1343 (2009).
9. Vatanaka, R., Etemadi, Sh., Alasty, A. and Vossoughi, Gh.R. "Adaptive critic-based neuro-fuzzy controller in multi-agents: Distributed behavioral control and path tracking", *J. Neurocomputing*, **88**, pp. 24-35 (2012).
10. Etemadi, Sh., Vatanaka, R., Alasty, A., Vossoughi, Gh.R. and Boroushaki, M. "Leader connectivity management and flocking velocity optimization using the particle swarm optimization method", *J. Scientia Iranica B*, **19**(5), pp. 1251-1257 (2012).
11. Atyabi, A., Phon-Amnuaisuk, S. and Kuan Ho, Ch. "Navigating a robotic swarm in an uncharted 2D landscape", *Applied Soft Computing*, **10**, pp. 149-169 (2010).
12. Krishnanand, K.N. and Ghose, D. "Theoretical foundations for rendezvous of glowworm-inspired agent swarms at multiple locations", *Robot. Auton. Syst.*, **56**, pp. 549-569 (2008).
13. Vicsek, T., Czirok, A., Jacob, E.B., Cohen, I. and Schochet, O. "Novel type of phase transitions in a system of self-driven particles", *Physical Review Letters*, **75**, pp. 1226-1229 (1995).
14. Tanner, H.G. Jadbabaie, A. and Pappas, G.J. "Flocking in fixed and switching networks", *IEEE Trans. Autom. Control*, **52**(6), pp. 863-868 (2007).
15. Haddad, W.M. and Hui, Q. "Complexity, robustness, self-organization, swarms, and system thermodynamics", *Nonlinear Anal-Real.*, **10**, pp. 531-543 (2009).
16. Zavlanos, M.M. and Pappas, G.J. "Dynamic assignment in distributed motion planning with local coordination", *IEEE Transactions on Robotics*, **24**(1), pp. 232-242 (2008).
17. Zavlanos, M.M. and Pappas, G.J. "Potential fields for maintaining connectivity of mobile networks", *IEEE Transaction On Robotics*, **23**(4), pp. 812-816 (2007).
18. Zavlanos, M.M. and Pappas, G.J. "Distributed connectivity control of mobile networks", *IEEE Transaction On Robotics*, **24**(6), pp. 1416-1428 (2008).
19. Zavlanos, M.M., Tanner, H.G., Jadbabaie, A. and Pappas, G.J. "Hybrid control for connectivity preserving flocking", *IEEE Transactions On Automatic Control*, **54**(12), pp. 2869-2875 (2009).
20. Vatanakhah, R., Etemadi, Sh., Alasty, A., Vossoughi, Gh.R. and Boroushaki, M. "Active leading through obstacles using ant-colony algorithm", *J. Neurocomputing*, **88**, pp. 67-77 (2012).
21. Etemadi, S., Alasty, A. and Vossoughi, G.R. "Flocking coordination using active leader and local information", *Asian J. Control*, **13**(6), DOI: 10.1002/asjc.200 (2010)