



Flocking of Quadcopter Robots Observing Safety Distance

Ali Ebrahimi¹, Mohammad Farrokhi^{2*}

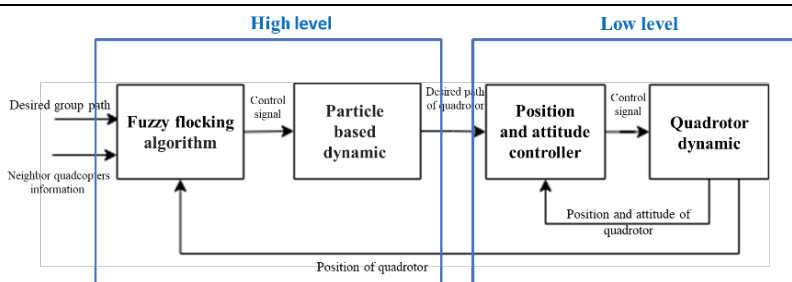
¹ M.Sc. Student, Faculty of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

² Professor, Faculty of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Fuzzy potential function.
- Two-level control
- Improved lattice
- Maintaining the safety range of quadcopter robots

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 6 January 2023

Received in revised form: 23 January 2023

Accepted: 25 February 2023

Available online: 25 February 2023

*Correspondence:

farrokhi@iust.ac.ir

How to cite this article:

A. Ebrahimi, M. Farrokhi. Flocking of quadcopter robots observing safety distance. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(3):17-32.

Keywords:

Flocking
Multi-agent systems,
Quadcopter
Fuzzy system

ABSTRACT

In this paper, a new method for flocking quadcopters is introduced. For this purpose, the idea of two-level control has been used, where the high-level controller is the same as the flocking algorithm and acts as the path designer of quadcopters. Moreover, tracking of the generated desired path is performed by a low-level controller. The main focus of this paper is on the high-level controller. A novel leaderless flocking algorithm is introduced, where new potential functions are generated using fuzzy logic to achieve a proper lattice. The introduced potential functions have a minimum value in the lattice positions. Therefore, the control signal minimizes its value by using the gradient-descent method to reach the desired situation. A safety radius is defined for every agent such that using the proposed flocking algorithm, the quadcopters do not enter each other's safety region. The stability and convergence of the structural and transitional dynamics of the system are shown. Finally, the proposed method is evaluated through simulations of five quadcopters. The results show that the proposed method provides better performance in creating a lattice, and maintaining obstacle as compared with recently published methods in literature.



حرکت گروهی ربات‌های پرنده چهارپره با حفظ فاصله‌ی ایمنی

علی ابراهیمی^۱، محمد فرخی^۲*

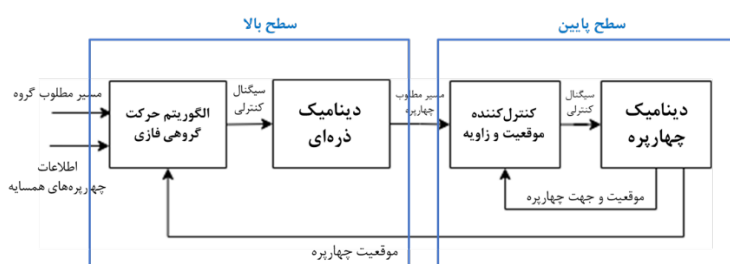
^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

برجسته‌ها

- تابع پتانسیل فازی
- کنترل دوسطحی
- بهبود شبکه‌بندی منظم
- حفظ محدوده ایمنی ربات‌های پرنده

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

*نویسنده مسئول:

farrokhi@iust.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

حرکت گروهی

سیستم‌های چندعاملی

ربات پرنده

سیستم فازی

چکیده

در این مقاله، به ارائه روشی برای حرکت گروهی ربات‌های پرنده چهارپره با حفظ فاصله ایمنی پرداخته شده است. برای این منظور، از ایده کنترل دوسطحی استفاده شده که در آن، کنترل‌کننده سطح بالا همان الگوریتم حرکت گروهی بوده و به‌عنوان طراح مسیر مطلوب ربات‌های چهارپره عمل می‌کند. ردیابی این مسیر مطلوب تولیدشده، توسط کنترل‌کننده سطح پایین انجام گرفته است. در کنترل‌کننده سطح بالا، الگوریتم حرکت گروهی جدیدی به‌صورت بدون پیشرو معرفی شده که در آن برای رسیدن به شبکه‌بندی منظم و حفظ فاصله‌ی ایمنی از توابع پتانسیل فازی بهره برده شده است. این توابع پتانسیل، در وضعیت شبکه‌بندی منظم، مقدار کمینه دارند. از این‌رو در سیگنال کنترلی، با استفاده از روش گرادیان نزولی سعی در کمینه کردن مقدار آن‌ها شده است. با سیگنال کنترلی معرفی شده، پایداری و همگرایی دینامیک ساختاری و انتقالی سیستم، در فضای بدون مانع اثبات شده است. در نهایت، عملکرد روش پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی حرکت گروهی پنج ربات چهارپره ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که روش پیشنهادی منجر به عملکرد بهتر در ایجاد شبکه‌بندی منظم و رعایت فاصله ایمنی در مقایسه با روش‌های چاپ‌شده اخیر در مقالات شده است.

۱- مقدمه

بررسی و کنترل حرکت گروهی برای اولین بار معرفی شد که در آن سه الگوریتم کنترلی مطرح می‌شود که دوتای اول برای فضای بدون مانع و الگوریتم سوم برای فضای با مانع ارائه شده است. از آن پس اغلب مراجع از این چارچوب استفاده کرده و به بقیه چالش‌ها در حرکت گروهی سیستم‌های چندعاملی پرداخته‌اند.

در مرجع [۵]، به بررسی الگوریتم الفتی صابر با فرض عدم اطلاع همه عامل‌ها از مسیر مطلوب پرداخته شده و نشان داده شده که برای حرکت گروهی، اطلاع بخشی از عامل‌ها کافی است. در مرجع [۶]، الگوریتم پیشرو-پیرو معرفی می‌شود که در آن، عامل حقیقی به‌عنوان پیشرو انتخاب شده و بقیه اعضای گروه باید آن را تعقیب کنند. در مرجع [۷]، راه‌حلی برای دنبال کردن چند عامل پیشرو با سرعت‌های متفاوت ارائه شده است. در مرجع [۸]، با استفاده از روش تطبیقی و شبکه‌های عصبی، الگوریتم حرکت گروهی برای مقابله با اغتشاش و عدم قطعیت دینامیک غیرخطی عامل‌ها معرفی شده است. در عمل، به خاطر وجود محدودیت‌های مخابراتی و ارتباطی، تأخیر در دریافت اطلاعات می‌تواند مشکل قابل توجهی در کنترل حرکت گروهی ایجاد کند. در مرجع [۹]، به این موضوع پرداخته شده و با ارائه راهکاری، تضمین عدم برخورد بین عامل‌ها داده شده است. از الگوریتم‌های یادگیری تقویتی عمیق در مرجع [۱۰] برای حل مسئله حرکت گروهی سیستم‌های چند رباتی در محیط‌های پیچیده استفاده شده است. مزیت این روش، عدم نیاز به محاسبات مربوط به مدل‌سازی و طراحی کنترل‌کننده است. الگوریتم حرکت گروهی با استفاده از کنترل بهینه در مرجع [۱۱] مطرح شده است که در آن، هدف، کمینه کردن انرژی مصرفی عامل‌ها است. تضمین می‌شود که الگوریتم کنترلی به کمینه محلی می‌رسد. در مرجع [۱۲] با استفاده از منطق فازی، تابع پتانسیل مربوط به قسمت سیگنال کنترلی عدم برخورد، تولید شده است. این کار، منجر به افزایش مقاومت در برابر نویز و رفتار نرم‌تری شده است. در این مرجع، توابع عضویت فازی از نوع گوسی انتخاب شده‌اند ولی در مورد نحوه انتخاب آن‌ها بحثی صورت نگرفته است. این توابع عضویت، ثابت در نظر گرفته شده و فقط برای فاصله شبکه‌بندی محدودی مناسب هستند.

حرکت گروهی یکی از چالش‌های سیستم‌های چندعاملی محسوب می‌شود. این مسئله، یک نوع رفتار جمعی تعداد زیادی از عامل‌های در ارتباط با هم است که هدف آن‌ها: (۱) حرکت در کنار یکدیگر با فاصله یکسان، (۲) اجماع سرعت، (۳) عدم برخورد با یکدیگر و (۴) تعقیب مسیر مطلوب گروه می‌باشد. همچنین، برای رسیدن به این اهداف، عامل‌ها تنها از اطلاعات محلی خود استفاده می‌کنند.

این ایده، برای اولین بار از طبیعت الهام گرفته شد. برای مثال، موجودات زنده زیادی مثل پرندگان، ماهی‌ها، مورچه‌ها و نظایر آن‌ها برای ادامه زندگی خود در کارهای مختلفی مثل پیدا کردن غذا، شکار، فرار از شکارچی و مهاجرت، رفتار جمعی از خود نشان می‌دهند. در ابتدا محققان به دنبال مدل‌سازی حرکت گروهی حیوانات و پرندگان بودند. اولین بار، رینولدز سه قانون ابتکاری برای مدل‌سازی حرکت گروهی ابداع کرد [۱]. این سه قانون عبارت‌اند از انسجام، هماهنگی و عدم برخورد. پس از وی، افراد دیگری برای مدل‌سازی دقیق‌تر تلاش کردند که معروف‌ترین آن‌ها در مراجع [۲ و ۳] آمده است. در مرجع [۲]، مدل ذرات خودران معرفی می‌شود که در آن سرعت همگی عامل‌ها ثابت فرض شده و جهت حرکت هر عامل برابر با میانگین جهت حرکت عامل‌های همسایه در نظر گرفته شده است. در مرجع [۳]، برای مدل‌سازی حرکت گروهی، برای هر عامل، سه ناحیه تعریف می‌شود: ناحیه جذب، ناحیه جهت‌دهی و ناحیه دفع. اگر همسایه‌ای در هر کدام از این نواحی قرار بگیرد، عمل مرتبط با آن ناحیه نسبت به عامل متناظر انجام می‌شود. این مدل‌سازی نتایج خوبی در فضای دوبعدی و سه‌بعدی ارائه کرده است. در این مراجع، فقط در مورد مدل‌سازی اولیه حرکت گروهی بحث شده و موضوع کنترل حرکت گروهی در آن‌ها مطرح نشده است.

پس از مدل‌سازی‌های اولیه، محققان سعی در کشف روشی برای کنترل حرکت گروهی کردند که در این راستا، الگوریتم حرکت گروهی مطرح شده توسط الفتی صابر باعث ایجاد نقطه عطفی در این زمینه شد [۴]. در این مرجع، چارچوب

زوایای اولیه. در مراجع [۱۷-۱۹]، الگوریتم حرکت گروهی ربات‌های پرنده با استفاده از یادگیری تقویتی تولید می‌شود. پایه یادگیری تقویتی بر اساس کمینه یا بیشینه کردن تابع ارزش است. هر عملی که عامل‌ها انجام می‌دهند، پاداشی دارد که جمع این پاداش‌ها، تابع ارزش را می‌سازد. در الگوریتم حرکت گروهی، برای هر یک از اهداف موردنظر مثل انسجام، عدم برخورد با یکدیگر، عدم برخورد با موانع، هماهنگی سرعت و نظایر آن‌ها توابع پاداش تعیین می‌شود. به‌مرورزمان، ربات‌ها با آزمون و خطا یاد می‌گیرند تا رفتار مطلوب را انجام دهند. مزیت این روش‌ها عدم نیاز به محاسبات مدل‌سازی است؛ ولی درعین‌حال تضمین پایداری آن‌ها مشکل است. در مرجع [۲۰]، الگوریتمی برای ربات‌های پرنده معرفی می‌شود که برای گذر از راه‌های باریک و عدم برخورد با موانع با پهنای زیاد مناسب است. همچنین در آن، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترها استفاده شده است. در مرجع [۲۱]، روش جدیدی با عنوان کنترل پیش‌بین فضایی^۱ معرفی شده که در آن، تابع هزینه حرکت گروهی، به‌صورت توزیع یافته با رویکرد پیش‌بین کمینه می‌شود. همچنین در آن، برای محاسبه‌ی الگوریتم حرکت گروهی، فقط از موقعیت ربات‌های همسایه استفاده شده و فرض می‌شود کنترل‌کننده موقعیت هر چهارپره به‌صورت آماده موجود است. درنهایت، عملکرد روش پیشنهادی بدون تحلیل پایداری و فقط به‌صورت شبیه‌سازی و عملی آزمایش شده است. در مرجع [۲۲]، برای حرکت گروهی چهارپره‌ها، از فاصله اندازه‌گیری شده توسط حسگرها استفاده شده به‌طوری‌که حسگر فاصله‌سنج، دارای محدودیت حس بوده و می‌تواند زاویه دید خود را عوض کند. عملکرد روش پیشنهادی، بدون تحلیل ریاضی و صرفاً به‌صورت عملی نشان داده شده و باحالتی که حسگر ثابت باشد، مقایسه شده است.

بامطالعه مراجع حرکت گروهی ربات‌های پرنده، می‌توان متوجه شد، تابه‌حال برای ربات‌های پرنده، محدوده‌ی ایمنی در نظر گرفته نشده است. این در حالی است که هر ربات پرنده با توجه به‌اندازه و دینامیک خود، نیاز به محدوده امن پرواز دارد. این منطقه‌ی امن در شرایطی که اغتشاش

همچنین در مرجع [۱۳] نیز از تابع پتانسیل فازی برای حرکت گروهی ربات‌های زیردریایی استفاده شده است.

یکی از کاربردهای اصلی مسئله‌ی حرکت گروهی سیستم‌های چندعاملی، در ربات‌های بدون سرنشین است که می‌تواند بهره‌وری آن‌ها را در مأموریت‌های مختلف افزایش دهد. در این مقاله، به بررسی حرکت گروهی برای ربات‌های پرنده، به‌خصوص ربات چهارپره، پرداخته می‌شود. ربات‌های پرنده به خاطر کاربردهای زیاد در زمینه‌های مختلف، توجه و محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند. این ربات‌ها می‌توانند در کاربردهای اضطراری، نظیر امداد و نجات، تحویل سریع کمک‌های اولیه، نظارت بر بلاها، و اتفاقات بحرانی، به‌سرعت وارد عمل شده و کمک بسزایی کنند. همچنین، در کاربردهای کشاورزی، توانایی سم‌پاشی زمین‌های وسیع در زمان کم را دارا هستند. عکس‌برداری و فیلم‌برداری هوایی از دیگر کاربردهای اصلی این ربات‌ها است که امروزه در صنایع مختلف مثل سینما استفاده می‌شود. حمل‌ونقل محموله‌های پستی، پخش زنده اتفاقات، آتش‌نشانی، نظارت بر ترافیک، تشکیل شبکه مخابراتی و نظایر آن‌ها از کاربردهای فراوان این ربات‌ها است. همه‌ی این کاربردها با درنظرگرفتن چند ربات پرنده و تشکیل کار گروهی، کارآمدی چند برابری خواهند داشت.

در مرجع [۱۴]، الگوریتم الفتی صابر [۴] بر روی ربات‌های چهارپره به‌صورت عملی پیاده‌سازی شد که در آن، خروجی الگوریتم حرکت گروهی به‌عنوان شتاب مطلوب، توسط روابط ریاضی به سیگنال کنترلی چهارپره تبدیل می‌شود. در مرجع [۱۵]، الگوریتم الفتی صابر [۴] کمی بهبود داده شده و به ربات‌های پرنده اعمال شده است. در این مرجع، ادعا می‌شود که گروه با دقت بیشتری سرعت مسیر مطلوب را دنبال کرده و ارتباط بین عامل‌ها با تأخیر کمتری اتفاق می‌افتد. در مرجع [۱۶]، از الگوریتم حرکت گروهی بر پایه تابع پتانسیل استفاده شده است. در این مرجع، در مورد نحوه اعمال سیگنال کنترلی حرکت گروهی به دینامیک چهارپره بحث شده و برای این منظور، دو راهکار ارائه و با هم مقایسه شده‌اند: (۱) تبدیل شتاب مطلوب به موقعیت مطلوب و سپس تحویل به کنترل‌کننده موقعیت چهارپره و (۲) تحویل مستقیم شتاب مطلوب به کنترل‌کننده با فرض کم بودن

^۱ Spatial Predictive Control

۲-۲- شبکه ارتباطی

با فرض این که تعداد عامل‌های حقیقی n باشد، مجموعه عامل‌ها با $\Omega_\alpha = \{1, \dots, n\}$ نشان داده می‌شود. برای هر عامل، ناحیه کروی شکلی به‌عنوان ناحیه همسایگی تعریف می‌شود که هر عامل دیگری که وارد آن شود، به‌عنوان همسایه شناخته می‌شود. مجموعه همسایه‌های عامل i ام به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega_\alpha^i = \{j : j \in \Omega_\alpha, j \neq i, \|\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j\| < r\} \quad (2)$$

که در آن شعاع همسایگی است؛ بنابراین، مجموعه جفت عامل‌هایی که باهم همسایه‌اند را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\Lambda_{\alpha\alpha} = \{(i, j), (j, i) : i \in \Omega_\alpha, j \in \Omega_\alpha^i\} \quad (3)$$

۲-۳- شبکه‌بندی منظم آلفا^۱

این شبکه‌بندی در واقع یک نوع ساختار منظم هندسی برای موقعیت عامل‌ها است که در آن، هر عامل با همه‌ی همسایه‌های خود فاصله یکسانی دارد. معادله ریاضی آن به‌صورت زیر است [۴]:

$$\forall j \in \Omega_\alpha^i, \|\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i\| = d \quad (4)$$

که در آن d فاصله شبکه‌بندی مطلوب است. در بعضی مواقع برای معادله شبکه‌بندی آلفا، آستانه‌ی خطایی تعیین می‌شود که رابطه‌ی آن به‌صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\forall j \in \Omega_\alpha^i, -\delta \leq \|\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i\| - d \leq \delta \quad (5)$$

که در آن δ آستانه تحمل است. به این حالت، شبکه‌بندی نیمه‌آلفا^۲ می‌گویند.

۲-۴- نرم سیگما

نرم درجه‌دو معمولی در صفر مشتق ندارد. از این‌رو، از نرم معرفی‌شده در مرجع [۴] استفاده می‌شود که در همه‌جا مشتق‌پذیر است. این نرم به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\|\mathbf{z}\|_\sigma = \frac{1}{\varepsilon} \left[\sqrt{1 + \varepsilon \|\mathbf{z}\|^2} - 1 \right] \quad (6)$$

که در آن برداری در فضای \mathbb{R}^D و ε ضریب ثابت و مثبت

خارجی یا درونی وجود دارد، بیشتر احساس نیاز می‌شود؛ زیرا در این شرایط، ربات پرنده دچار نوساناتی شده و ممکن است با بقیه ربات‌ها برخورد کند به‌خصوص زمانی که ربات‌های پرنده در فاصله‌ی نزدیک یکدیگر در حال حرکت هستند. از این‌رو، تعریف محدوده‌ی امن برای ربات‌های پرنده به‌طوری که در زمان حرکت گروهی، ربات‌ها وارد این محدوده یکدیگر نشوند، می‌تواند مفید واقع شود. در این مقاله، با استفاده از تابع پتانسیل فازی، این محدوده ایمنی در الگوریتم حرکت گروهی اعمال شده است.

ساختار این مقاله به این صورت است که در بخش دوم، مفاهیم اولیه‌ی موردنیاز ارائه خواهد شد. در بخش سوم، به الگوریتم حرکت گروهی پیشنهادی پرداخته و سپس پایداری آن نشان داده خواهد شد. در بخش چهارم، نحوه اعمال الگوریتم حرکت گروهی به ربات‌های پرنده چهارپره بحث خواهد شد. در بخش پنجم، نتایج شبیه‌سازی حرکت گروهی ربات‌های چهارپره آورده و بررسی خواهد شد و در نهایت در بخش ششم، نتیجه‌گیری انجام خواهد شد.

۲- مفاهیم اولیه

در این بخش، به مفاهیم اولیه‌ای که در ادامه کار نیاز خواهد شد، پرداخته می‌شود.

۲-۱- دینامیک ذره‌ای

برای بررسی الگوریتم‌های حرکت گروهی، از مدل‌های ذره‌ای استفاده می‌شود که متداول‌ترین آن‌ها مدل انتگرالی درجه‌دو است [۴]. در این مدل، سیگنال کنترلی به‌عنوان شتاب در نظر گرفته می‌شود. با توجه به این که از این مدل به‌عنوان تقریب ساده‌شده‌ی دینامیک اصلی عامل‌ها استفاده خواهد شد، در این مقاله، برای تقریب بهتر، پارامتر جرم نیز به آن اضافه‌شده. دینامیک ذره‌ای جرم‌دار به‌صورت زیر است:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{p}_i \\ \dot{\mathbf{p}}_i = \frac{1}{m} \mathbf{u}_i \end{cases} \quad (1)$$

که در آن m جرم عامل، $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^D$ موقعیت، $\mathbf{p}_i \in \mathbb{R}^D$ سرعت و $\mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^D$ سیگنال کنترلی عامل i ام است که در آن‌ها، D بُعد فضای کاری است.

¹ α -lattices

² quasi α -lattices

آن، مناسب‌بودن سیستم‌های فازی برای تولید هر نوع تابع غیرخطی است. مزیت این کار، طراحی تابع پتانسیل دلخواه با حساسیت به فواصل خاص مثل فاصله‌ی ایمنی است. همچنین، از آنجایی‌که از این الگوریتم برای ربات‌های چهارپره استفاده خواهد شد، در تولید توابع پتانسیل با منطق فازی می‌توان محدودیت‌های دینامیکی مختص چهارپره را نیز در نظر گرفت. رابطه‌ی این تابع پتانسیل به صورت زیر است:

$$V(\mathbf{q}) = \sum_{(i,j) \in \Lambda_{aa}} \int_{\|\mathbf{q}_i\|_\sigma}^{\|\mathbf{q}_j\|_\sigma} f(s) ds \quad (11)$$

که در آن $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{nd}$ موقعیت تمام عامل‌ها در کنار هم در یک بردار است. همچنین $\mathbf{q}_{ij} = \mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i$ و $f(s)$ خروجی سیستم فازی است. ساختار کلی قوانین این سیستم فازی به صورت زیر است:

$$\text{IF } s \text{ is } \mu^l, \text{ THEN } y^l = h^l \quad (12)$$

که در آن l شماره قاعده، s ورودی سیستم فازی، μ^l تابع عضویت فازی ورودی، y^l خروجی سیستم فازی و h^l مرکز تابع عضویت خروجی است. ورودی سیستم فازی به عنوان فاصله بین دو عامل در نظر گرفته شده است. در سیستم فازی مدنظر، از موتور استنتاج ضرب ممدانی، فازی‌گر تکین و فازی‌زدای میانگین مرکز استفاده شده است. در نتیجه، خروجی سیستم فازی به صورت زیر خواهد بود [۲۳]:

$$f(s) = \frac{\sum_{i=1}^M h^i \mu^i(s)}{\sum_{i=1}^M \mu^i(s)} \quad (13)$$

که در آن M تعداد قوانین فازی است. همان‌طور که گفته شد، ورودی سیستم فازی، فاصله بین دو عامل است. برای این ورودی، پنج تابع عضویت از جنس مثلثی و دوزنقه‌ای انتخاب می‌شود (شکل ۱). این توابع عضویت به ترتیب خیلی نزدیک^۱، نزدیک^۲، متوسط^۳، عادی^۴ و دور^۵ می‌باشند. مراکز این توابع عضویت، بافاصله یکسان از

است. گرادیان این نُرم به صورت زیر است:

$$\nabla \|\mathbf{z}\|_\sigma = \frac{\mathbf{z}}{1 + \varepsilon \|\mathbf{z}\|_\sigma} \quad (7)$$

۳- الگوریتم حرکت گروهی

در این بخش، به معرفی روش پیشنهادی برای حرکت گروهی پرداخته می‌شود. در این مقاله، حرکت گروهی n عامل وقتی اتفاق می‌افتد که

- موقعیت عامل‌های آلفا به ساختاری منظم مثل شبکه‌بندی آلفا مطابق معادله (۴) یا شبکه‌بندی نیمه‌آلفا مطابق معادله (۵) برسند.
- اجماع سرعت اتفاق بیفتد؛ یعنی سرعت همه‌ی عامل‌ها با یکدیگر یکسان باشند

$$\forall (i, j) \in \Lambda_{aa}, \mathbf{p}_i = \mathbf{p}_j \quad (8)$$

- عامل‌های آلفا فاصله ایمنی d_s را که توسط طراح تعیین می‌شود، رعایت کنند؛ یعنی

$$\forall (i, j) \in \Lambda_{aa}, \|\mathbf{q}_j - \mathbf{q}_i\| > d_s \quad (9)$$

- گروه، مسیر مطلوب را دنبال کند که مسیر مطلوب به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}_r = \mathbf{p}_r \\ \dot{\mathbf{p}}_r = \mathbf{f}_r(\mathbf{q}_r, \mathbf{p}_r) \end{cases} \quad (10)$$

که در آن $\mathbf{q}_r, \mathbf{p}_r \in \mathbb{R}^D$ موقعیت و سرعت مسیر مطلوب بوده و $\mathbf{f}_r(\mathbf{q}_r, \mathbf{p}_r)$ تابع غیرخطی شتاب مسیر مطلوب است.

برای رسیدن به شبکه‌بندی منظم و رعایت فاصله‌ی ایمنی از تابع پتانسیل استفاده می‌شود.

۳-۱- تابع پتانسیل

تابع پتانسیل در این مقاله، تابعی غیرمنفی بوده و ویژگی مهم آن کمینه بودن در شرایط مطلوب است. به عبارت دیگر، تابع پتانسیل به منزله نوعی تابع ارزش بوده که با کمینه کردن آن، وضعیت مطلوب حاصل می‌شود. در روش پیشنهادی، تابع پتانسیل جدیدی برای رسیدن به شبکه‌بندی آلفا و حفظ فاصله ایمنی معرفی می‌شود. برای تولید تابع پتانسیل از منطق فازی استفاده خواهد شد. دلیل

¹ Too Close

² Close

³ Medium

⁴ Normal

⁵ Far

$$\begin{cases} \|q_{ij}\|_{\sigma} < \|d\|_{\sigma} \Rightarrow -\int_{\|q_{ij}\|_{\sigma}}^{\|d\|_{\sigma}} f(s) ds \geq 0 \\ \|q_{ij}\|_{\sigma} > \|d\|_{\sigma} \Rightarrow \int_{\|d\|_{\sigma}}^{\|q_{ij}\|_{\sigma}} f(s) ds \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

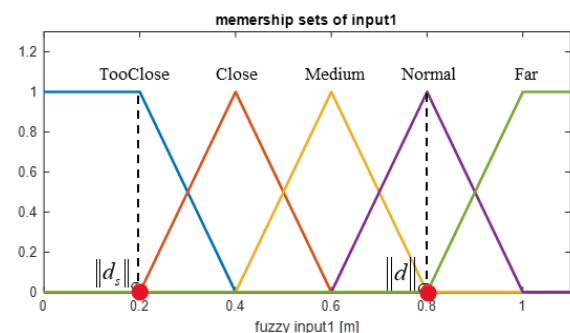
$$\Rightarrow \begin{cases} f(s) \leq 0, \|q_{ij}\|_{\sigma} < \|d\|_{\sigma} \\ f(s) \geq 0, \|q_{ij}\|_{\sigma} > \|d\|_{\sigma} \end{cases}$$

شرط دوم، کمینه بودن تابع پتانسیل در شبکه‌بندی آلفا است. با توجه به این که کمترین کمینه‌ی ممکن یک تابع غیرمنفی، صفر است. کافی است نشان داده شود در حالت شبکه‌بندی آلفا، مقدار تابع پتانسیل صفر خواهد شد، یعنی

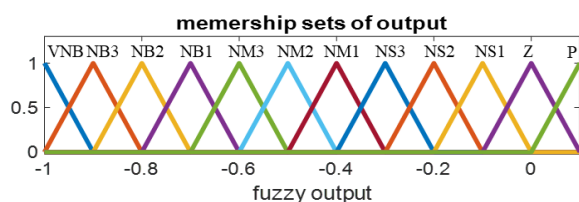
$$f(\|d\|_{\sigma}) = 0 \quad (16)$$

به‌عبارت‌دیگر، هنگامی که ورودی در شرایط مطلوب قرار دارد، خروجی سیستم فازی صفر باشد. این دومین شرط تعیین قوانین است؛ بنابراین، قوانین فازی با رعایت این شرایط و کمی آزمون و خطا به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{IF } s \text{ is TooClose, THEN } y' &= \text{VNB} \\ \text{IF } s \text{ is Close, THEN } y' &= \text{NM2} \\ \text{IF } s \text{ is Medium, THEN } y' &= \text{NS3} \\ \text{IF } s \text{ is Normal, THEN } y' &= \text{Z} \\ \text{IF } s \text{ is Far, THEN } y' &= \text{P} \end{aligned} \quad (17)$$



شکل (۱): توابع عضویت ورودی سیستم فازی.



شکل (۲): توابع عضویت خروجی سیستم فازی.

۳-۲- سیگنال کنترلی

هم تعیین‌شده‌اند و پهنای مثلثی همه آن‌ها با هم یکسان است. مرکز این توابع عضویت به این صورت انتخاب‌شده‌اند:

- مرکز تابع عضویت اول = فاصله ایمنی
 - مرکز تابع عضویت چهارم = فاصله شبکه‌بندی
- این دو مرکز توابع عضویت، پارامترهای طراحی بوده و با توجه به مأموریت‌های مختلف می‌توانند تغییر کنند. با فرض $\|d_s\|_{\sigma} = 0.2 \text{ m}$ و $\|d\|_{\sigma} = 0.8 \text{ m}$ شکل ۱ نشان داده شده است. توابع عضویت خروجی در شکل ۲ نشان داده شده است. این توابع شامل یک تابع خیلی بزرگ منفی (VNB)، سه تابع بزرگ منفی (NB)، سه تابع متوسط منفی (NM)، یک تابع کوچک منفی (NS)، یک تابع صفر (Z) و یک تابع مثبت (P) می‌شود. مرکز این توابع عضویت، با فاصله یکسان در بازه $[-y_{\max}, 0.1y_{\max}]$ تعیین‌شده‌اند که در آن پارامتر طراحی و به‌نوعی ضریب تنظیم تابع پتانسیل است. شکل ۲ برای $y_{\max} = 1$ رسم شده است.

قوانین فازی نقش مهمی در تولید تابع پتانسیل دارند و باید خواص لازم آن را برآورده کنند. این خواص، یکی غیرمنفی بودن آن و دیگری کمینه بودن در وضعیت شبکه‌بندی آلفا است. از هر یک از این خواص، شرایط لازم برای تعیین قوانین به دست خواهد آمد. ابتدا شرط غیرمنفی بودن تابع پتانسیل بررسی می‌شود. برای این منظور می‌توان نوشت

$$V(\mathbf{q}) = \sum_{(i,j) \in \Lambda_{aa}} \int_{\|d\|_{\sigma}}^{\|q_{ij}\|_{\sigma}} f(s) ds \geq 0 \quad (14)$$

در نتیجه معادله (۱۵) حاصل می‌شود. این بدان معناست که مقدار خروجی سیستم فازی برای دو عامل در فواصل کمتر از فاصله شبکه‌بندی مطلوب باید غیرمثبت و در فواصل بزرگ‌تر از آن باید غیرمنفی باشد که اولین شرط برای تعیین قوانین فازی است.

- 1 Very Negative Big
- 2 Negative Big
- 3 Negative Medium
- 4 Negative Small
- 5 Zero
- 6 Positive

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{p} \\ \dot{\mathbf{p}} = \frac{1}{m} \mathbf{u} \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{p} \\ \dot{\mathbf{p}} = \frac{1}{m} \left(\begin{array}{c} \nabla_{\mathbf{q}_1} V \\ \vdots \\ \nabla_{\mathbf{q}_n} V \\ \mathbf{g}_\alpha \end{array} - c_1^\gamma (\mathbf{q} - \mathbf{1}_n \otimes \bar{\mathbf{q}}_r) - c_2^\gamma (\mathbf{p} - \mathbf{1}_n \otimes \bar{\mathbf{p}}_r) \right) \end{cases} \quad (21)$$

$$= \frac{1}{m} (-\mathbf{g}_\alpha - c_1^\gamma (\mathbf{q} - \bar{\mathbf{q}}_r) - c_2^\gamma (\mathbf{p} - \bar{\mathbf{p}}_r))$$

دینامیک گروهی را می‌توان از دو دیدگاه ساختاری و انتقالی بررسی کرد. در دینامیک ساختاری، رفتار هر یک از عامل‌ها نسبت به مرکز گروه سنجیده می‌شود و در دینامیک انتقالی رفتار مرکز گروه و مسیر مطلوب بررسی می‌شود. برای به دست آوردن دینامیک ساختاری، تغییر متغیر زیر انجام می‌شود:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_i = \mathbf{q}_i - \mathbf{q}_c \\ \mathbf{v}_i = \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_c \end{cases} \quad (22)$$

که در آن \mathbf{x}_i موقعیت نسبی و \mathbf{v}_i سرعت نسبی عامل i ام، مرکز گروه است. شتاب مرکز گروه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{p}}_c &= \frac{1}{nm} \sum_{i \in \Omega_\alpha} (-\nabla_{\mathbf{q}_i} V - c_1^\gamma (\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_r) - c_2^\gamma (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_r)) \\ &= \frac{1}{m} (-c_1^\gamma (\mathbf{q}_c - \mathbf{q}_r) - c_2^\gamma (\mathbf{p}_c - \mathbf{p}_r)) \end{aligned} \quad (23)$$

که در آن عبارت $\frac{1}{n} \sum_{i \in \Omega_\alpha} -\nabla_{\mathbf{q}_i} V$ به خاطر تقارن نیروها صفر می‌شود. بدین ترتیب، دینامیک ساختاری را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} = \frac{1}{m} (-\mathbf{g}_\alpha - c_1^\gamma \mathbf{x} - c_2^\gamma \mathbf{v}) \end{cases} \quad (24)$$

برای بررسی رفتار دینامیک ساختاری، تابع لیاپانوف زیر تعریف می‌شود:

$$H(\mathbf{q}, \mathbf{p}) := V(\mathbf{q}) + \frac{m}{2} \mathbf{v}^\top \mathbf{v} + \frac{c_1^\gamma}{2} \mathbf{x}^\top \mathbf{x} > 0 \quad (25)$$

سیگنال کنترلی هر عامل که به عنوان شتاب آن است، به دو بخش تقسیم می‌شود:

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_i^\alpha + \mathbf{u}_i^\gamma \quad (18)$$

که در آن \mathbf{u}_i^α سیگنال کنترلی مربوط به تشکیل شبکه‌بندی منظم و حفظ فاصله ایمنی و \mathbf{u}_i^γ مربوط به ردیابی مسیر مطلوب و اجماع سرعت است.

در سیگنال کنترلی \mathbf{u}_i^α ، هدف کمینه کردن تابع پتانسیل نسبت به موقعیت عامل i ام است. برای این کار، از روش گرادینان نزولی استفاده می‌شود. از این رو رابطه \mathbf{u}_i^α به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i^\alpha &= -\nabla_{\mathbf{q}_i} V(\mathbf{q}) \\ &= -\sum_{(i,j) \in \Lambda_{\alpha\alpha}} \frac{dV(\mathbf{q})}{d\|\mathbf{q}_{ij}\|_\sigma} \nabla_{\mathbf{q}_i} \|\mathbf{q}_{ij}\|_\sigma \\ &= -\sum_{(i,j) \in \Lambda_{\alpha\alpha}} [f(\|\mathbf{q}_{ij}\|_\sigma)] \nabla_{\mathbf{q}_i} \|\mathbf{q}_{ij}\|_\sigma \end{aligned} \quad (19)$$

برای سیگنال کنترلی \mathbf{u}_i^γ ، از رابطه زیر استفاده می‌شود

$$\mathbf{u}_i^\gamma = -c_1^\gamma (\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_r) - c_2^\gamma (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_r) \quad (20)$$

که در آن c_1^γ و c_2^γ ضرایب مثبت هستند. در این سیگنال کنترلی، عبارت $-c_2^\gamma (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_r)$ کار اجماع سرعت را نیز انجام می‌دهد؛ زیرا عامل‌ها با ردیابی سرعت مسیر مطلوب گروه، به سرعتی یکسان می‌رسند که این همان اجماع سرعت است.

۳-۳- تحلیل پایداری

برای بررسی پایداری سیستم چندعاملی با سیگنال کنترلی روش پیشنهادی، نیاز است توصیف دینامیکی همه‌ی عامل‌ها یکجا دیده شود. برای این کار می‌توان توصیف دینامیک گروهی عامل‌ها را به صورت رابطه (۲۱) نوشت که در آن $\mathbf{q}, \mathbf{p}, \mathbf{u} \in \mathbb{R}^{nd}$ موقعیت، سرعت و سیگنال کنترلی تمام عامل‌ها در کنار هم در یک بردار است، $\mathbf{1}_z = [1, \dots, 1]_{z \times 1}^\top$ ، $\mathbf{0}_z = [0, \dots, 0]_{z \times 1}^\top$ و از \mathbf{g}_α ، $\bar{\mathbf{q}}_r$ و $\bar{\mathbf{p}}_r$ برای خلاصه‌نویسی استفاده شده است.

در نهایت با ساده سازی عبارات محاسبه شده، مشتق تابع لیاپانوف به صورت زیر خواهد بود

$$\dot{H}(\mathbf{q}, \mathbf{p}) = -c_2^\gamma \langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle = -c_2^\gamma \mathbf{v}^T \mathbf{v} \leq 0 \quad (31)$$

با توجه به نتیجه به دست آمده می توان گفت که تابع لیاپانوف همواره در حال کاهش یا بدون تغییر است که این، پایداری انرژی سیستم را نشان می دهد.

برای اثبات گزاره ۱ از برهان خلف استفاده می شود. برای این کار، فرض می شود که فاصله دو عامل کمتر از فاصله ایمنی شده است، یعنی

$$\begin{aligned} \|\mathbf{q}_{i_1} - \mathbf{q}_{i_2}\| &< d_s \\ V(\mathbf{q}) &= \underbrace{\int_{\|\mathbf{d}\|_\sigma}^{\|\mathbf{q}_{i_1 i_2}\|_\sigma} f(s) ds}_{>k} + \sum_{(i,j) \in \Lambda_{\alpha\alpha} - (i_1, i_2)} \int_{\|\mathbf{d}\|_\sigma}^{\|\mathbf{q}_{ij}\|_\sigma} f(s) ds \quad (32) \\ &\Rightarrow V(\mathbf{q}) > k > H_0 \end{aligned}$$

که در آن i_1 و i_2 دو عامل دلخواه هستند. همچنین در مورد تابع انرژی می توان نوشت

$$H(\mathbf{q}, \mathbf{p}) = V(\mathbf{q}) + \frac{m}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} + \frac{c_1^\gamma}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{x} \leq H_0 \quad (33)$$

$$\Rightarrow V(\mathbf{q}) \leq H_0 \rightarrow \perp$$

که به تناقض می رسد. پس فرض خلف باطل و حکم ثابت می شود.

برای اثبات گزاره ۲ می توان نوشت

$$\begin{aligned} H(\mathbf{q}, \mathbf{p}) &= V(\mathbf{q}) + \frac{m}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} + \frac{c_1^\gamma}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{x} \leq H_0 \quad (34) \\ \Rightarrow \forall i \in \Omega_\alpha, \|\mathbf{x}_i\| &\leq \sqrt{\frac{2H_0}{c_1^\gamma}} = R \end{aligned}$$

که نشان می دهد موقعیت نسبی (یا همان فاصله هر عامل از مرکز گروه)، کمتر از مقداری محدود است؛ بنابراین، شعاع گروه نیز محدود خواهد بود.

با توجه به این که تابع لیاپانوف مثبت بوده و مشتق آن نیز منفی نیمه معین به دست آمده است، برای اثبات بقیه گزاره ها می توان از قضیه لاسال استفاده کرد که می گوید سیستم به سطحی که در آن مشتق تابع لیاپانوف صفر است، میل خواهد کرد؛ بنابراین

مقدار این تابع انرژی در لحظه اول H_0 نامیده می شود.

قبل از بیان قضیه اصلی نیاز به تعریف متغیر k است. این متغیر به عنوان مقدار تابع پتانسیل در زمانی که دو عامل به محدوده ایمنی هم وارد شده اند، به صورت زیر تعریف می شود:

$$k = \int_{\|\mathbf{d}\|_\sigma}^{\|\mathbf{d}_s\|_\sigma} f(s) ds \quad (26)$$

قضیه ۱: دینامیک ساختاری (۲۴) برای n عامل در فضای D بعدی با سیگنال کنترلی (۱۸)، با فرض ثابت بودن تعداد شبکه های ارتباطی بین عامل ها، پایدار بوده و با فرض

$$c_1^\gamma < \frac{0.01 y_{\max}^2}{2H_0} \text{ و } H_0 < k$$

(۱) عامل ها به محدوده ایمنی یکدیگر وارد نمی شوند.

(۲) عامل ها در شعاع محدود R باقی می مانند.

(۳) همه ی عامل ها به صورت مجانبی به سرعت یکسان همگرا می شوند.

(۴) عامل ها به شبکه بندی نیمه آلفا میل می کنند.

اثبات: مشتق تابع لیاپانوف (۲۵)، با فرض ثابت بودن تعداد شبکه های ارتباطی بین عامل ها به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\dot{H}(\mathbf{q}, \mathbf{p}) = \underbrace{\sum_{i \in \Omega_\alpha} \langle \nabla_{\mathbf{q}_i} V, \mathbf{p}_i \rangle}_{\text{term 1}} + m \underbrace{\langle \dot{\mathbf{v}}, \mathbf{v} \rangle}_{\text{term 2}} + c_1^\gamma \underbrace{\langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x} \rangle}_{\text{term 3}} \quad (27)$$

که در آن $\langle \cdot, \cdot \rangle$ نماد ضرب داخلی است. این رابطه شامل ۳ عبارت است که هر کدام به صورت زیر محاسبه می شود:

(۱) عبارت اول به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \Omega_\alpha} \langle \nabla_{\mathbf{q}_i} V, \mathbf{p}_i \rangle &= \sum_{i \in \Omega_\alpha} \langle \nabla_{\mathbf{q}_i} V, \mathbf{v}_i \rangle + \underbrace{\sum_{i \in \Omega_\alpha} \langle \nabla_{\mathbf{q}_i} V, \mathbf{p}_c \rangle}_{=0} \quad (28) \\ &= \langle \mathbf{g}_\alpha, \mathbf{v} \rangle \end{aligned}$$

که در آن عبارت دوم به خاطر تقارن نیروها صفر شده است.

(۲) عبارت دوم در معادله (۲۷) به صورت زیر است:

$$m \underbrace{\langle \dot{\mathbf{v}}, \mathbf{v} \rangle}_{\text{term 2}} = -\langle \mathbf{g}_\alpha, \mathbf{v} \rangle - c_1^\gamma \langle \mathbf{x}, \mathbf{v} \rangle - c_2^\gamma \langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle \quad (29)$$

(۳) عبارت سوم معادله (۲۷) برابر است با

$$\underbrace{c_1^\gamma \langle \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x} \rangle}_{\text{term 3}} = c_1^\gamma \langle \mathbf{v}, \mathbf{x} \rangle \quad (30)$$

قضیه ۲: دینامیک انتقالی (۴۰) برای n عامل آلفا در فضای D بُعدی با سیگنال کنترلی (۱۸)، با فرض ثابت بودن سرعت مسیر مطلوب گروه (یعنی $\dot{\mathbf{p}}_r = 0$)، پایدار مجانبی بوده و مرکز گروه به مسیر مطلوب گروه همگراست.

اثبات: تابع لیپانوفی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H_c(\mathbf{e}_c, \dot{\mathbf{e}}_c) = \frac{m}{2} \dot{\mathbf{e}}_c^T \dot{\mathbf{e}}_c + \frac{c_1^\gamma}{2} \mathbf{e}_c^T \mathbf{e}_c > 0 \quad (41)$$

که مشتق آن به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{H}_c(\mathbf{e}_c, \dot{\mathbf{e}}_c) &= m \langle \ddot{\mathbf{e}}_c, \dot{\mathbf{e}}_c \rangle + c_1^\gamma \langle \dot{\mathbf{e}}_c, \mathbf{e}_c \rangle \\ &= -c_2^\gamma \|\dot{\mathbf{e}}_c\|^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (42)$$

با توجه به این‌که تابع لیپانوف، مثبت معین و مشتق آن منفی نیمه معین به دست آمد، می‌توان از قضیه لاسال استفاده کرد؛ بنابراین، سیستم به سطحی که در آن مشتق تابع لیپانوف صفر است، میل می‌کند. پس

$$\begin{aligned} t \rightarrow \infty \Rightarrow \dot{H}_c(\mathbf{e}_c^*, \dot{\mathbf{e}}_c^*) &= 0 \\ \Rightarrow \begin{cases} \dot{\mathbf{e}}_c^* = 0 \Rightarrow \mathbf{p}_c^* = \mathbf{p}_r \\ \ddot{\mathbf{e}}_c^* = 0 \Rightarrow \mathbf{q}_c^* = \mathbf{q}_r \end{cases} \end{aligned} \quad (43)$$

که در آن علامت * به معنی مقدار نهایی آن متغیر است. در نتیجه اثبات می‌شود موقعیت و سرعت مرکز گروه به مسیر مطلوب گروه همگرا می‌شود.

۴- پرواز گروهی چهارپره‌ها

در این بخش، به بررسی دینامیک چهارپره و نحوه اعمال الگوریتم حرکت گروهی به این ربات‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۱- دینامیک چهارپره

چهارپره‌ها در دسته ربات‌های پرنده چندموتوره قرار دارند و همان‌طور که از اسمشان پیداست، توسط چهار موتور کنترل می‌شوند. این موتورها متصل به ملخ یا پره هستند و با چرخش آن‌ها نیروی بالابرنده ربات تولید می‌شود. این ربات‌ها، ۶ درجه آزادی دارند که ۳ تا از آن‌ها انتقالی (در راستای محورهای x ، y و z) و ۳ تای دیگر چرخشی (حول محورهای x ، y و z) است و از آنجایی‌که تعداد عملگرها یا همان موتورها کمتر از تعداد درجه آزادی است، این ربات جزء سیستم‌های زیر تحریک محسوب می‌شود.

$$\begin{aligned} t \rightarrow \infty \Rightarrow \dot{H}(\mathbf{q}^*, \mathbf{p}^*) &= 0 \Rightarrow \mathbf{v}^* = 0 \\ \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{v}^* = 0 \Rightarrow \forall (i, j) \in \Lambda_{\alpha\alpha}, \mathbf{p}_i = \mathbf{p}_j \\ \dot{\mathbf{v}}^* = 0 \Rightarrow -\mathbf{g}_\alpha^* - c_1^\gamma \mathbf{x}^* = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (35)$$

که در آن، علامت * به معنای مقدار نهایی آن متغیر است. در این رابطه، جمله اول نشان می‌دهد که با گذشت زمان، سرعت نسبی تمام عامل‌ها صفر می‌شود؛ یعنی سرعت همه‌ی عامل‌ها با هم برابر خواهد شد؛ بنابراین، گزاره ۳ نیز توسط این جمله اثبات می‌شود. از جمله‌ی دوم این رابطه می‌توان نتیجه گرفت که

$$-\mathbf{g}_\alpha^* - c_1^\gamma \mathbf{x}^* = 0 \quad (36)$$

با استفاده از رابطه (۳۴) و فرض قضیه، می‌توان نوشت

$$\forall i \in \Omega_\alpha, \|\mathbf{g}_\alpha^*\| \leq \sqrt{c_1^\gamma 2H_0} \leq \sqrt{\frac{0.01y_{\max}^2}{2H_0}} 2H_0 \quad (37)$$

یعنی در این حالت، با توجه به این‌که $\|\nabla_z \|z\|_\sigma \approx 1$ خروجی سیستم فازی در سطح ناوردا، کمتر از $0.1y_{\max}$ خواهد بود. با توجه به قوانین فازی سیستم آلفا مطابق رابطه (۱۷) می‌توان گفت، زمانی خروجی سیستم فازی کمتر از $0.1y_{\max}$ است که فاصله دو عامل در محدوده فاصله شبکه‌بندی مطلوب باشد. این وضعیت همان شبکه‌بندی نیمه‌آلفا است. در نتیجه گزاره ۴ نیز اثبات می‌شود.

دیدگاه دیگر برای بررسی دینامیک گروهی، دینامیک انتقالی است که مربوط به مرکز گروه بوده و به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}_c = \mathbf{p}_c \\ \dot{\mathbf{p}}_c = \frac{1}{m} (-c_1^\gamma (\mathbf{q}_c - \mathbf{q}_r) - c_2^\gamma (\mathbf{p}_c - \mathbf{p}_r)) \end{cases} \quad (38)$$

با تغییر متغیر زیر

$$\begin{cases} \mathbf{e}_c = \mathbf{q}_c - \mathbf{q}_r \\ \dot{\mathbf{e}}_c = \mathbf{p}_c - \mathbf{p}_r \end{cases} \quad (39)$$

که در آن \mathbf{e}_c خطای ردیابی موقعیت مسیر مطلوب گروه است؛ بنابراین، دینامیک انتقالی به صورت زیر درخواهد آمد:

$$\ddot{\mathbf{e}}_c = \frac{1}{m} (-c_1^\gamma \mathbf{e}_c - c_2^\gamma \dot{\mathbf{e}}_c - \dot{\mathbf{p}}_r) \quad (40)$$

همان حرکت گروهی بوده و خروجی آن مسیر مطلوب کنترل‌کننده سطح پایین است. کنترل‌کننده سطح پایین باید با کمترین خطا، مسیر مطلوب تولیدشده را دنبال کند. در حرکت گروهی ربات‌های چهارپره، کنترل‌کننده سطح بالا همان الگوریتم حرکت گروهی است که در بخش پیش معرفی شد و کنترل سطح پایین، در ادامه توضیح داده خواهد شد. نکته‌ای که وجود دارد اتصال این دو کنترل‌کننده به یکدیگر است. در اینجا از همان مدل ذره‌ای استفاده شده و فقط با اضافه کردن جرم به آن تقریب بهتری از دینامیک ربات پرنده انجام می‌شود. وظیفه‌ی این مدل، تبدیل سیگنال کنترلی الگوریتم حرکت گروهی به مسیر و موقعیت مطلوب است (شکل ۳).

۴-۳- کنترل‌کننده سطح پایین

در این مقاله، هدف اصلی، کنترل‌کننده سطح بالا بوده و برای قسمت سطح پایین، صرفاً کنترل‌کننده‌ی ساده‌ی مطرح می‌شود. از این‌رو، از کنترل‌کننده PD برای تعقیب موقعیت مطلوب استفاده خواهد شد. با توجه به اینکه چهارپره زیر تحریک است، کنترل موقعیت باید از طریق کنترل زاویه انجام شود. به همین خاطر، لازم است دو کنترل‌کننده، یکی برای موقعیت و دیگری برای زاویه طراحی شود. از طریق کنترل‌کننده موقعیت، زوایای مطلوب اوپلر به دست می‌آید و از طریق کنترل‌کننده زاویه دنبال خواهد شد. دیگرام بلوکی سیستم کنترلی سطح پایین در شکل ۳ نشان داده شده است. برای کنترل‌کننده موقعیت، از روابط زیر استفاده می‌شود [۲۵]:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_q &= \mathbf{p}_{des} + \mathbf{K}_d(\mathbf{p}_{des} - \mathbf{p}_{uav}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{q}_{des} - \mathbf{q}_{uav}) \\ F &= m(g + [\mathbf{u}_q]_3) \\ \phi_{des} &= \text{sat} \left(\frac{1}{g} ([\mathbf{u}_q]_1 \sin(\psi_{des}) - [\mathbf{u}_q]_2 \cos(\psi_{des})) \right) \\ \theta_{des} &= \text{sat} \left(\frac{1}{g} ([\mathbf{u}_q]_1 \cos(\psi_{des}) + [\mathbf{u}_q]_2 \sin(\psi_{des})) \right) \end{aligned} \quad (46)$$

که در آن $[\phi_{des}, \theta_{des}, \psi_{des}]$ زوایای اوپلر مطلوب، ماتریس ضرایب تناسبی، $\mathbf{K}_p = \text{diag}[k_p^x, k_p^y, k_p^z]$

توصیف دینامیکی ربات چهارپره به صورت زیر است [۲۴]:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{(-c_\phi s_\theta c_\psi - s_\phi s_\psi)F}{m} \\ \ddot{y} = \frac{(-c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi)F}{m} \\ \ddot{z} = g - \frac{-c_\phi c_\psi F}{m} \\ \ddot{\phi} = \frac{1}{J_x} \tau_\phi \\ \ddot{\theta} = \frac{1}{J_y} \tau_\theta \\ \ddot{\psi} = \frac{1}{J_z} \tau_\psi \end{cases} \quad (44)$$

که در آن $[x, y, z]^T$ موقعیت چهارپره و $[\phi, \theta, \psi]^T$ زوایای اوپلر است که به ترتیب معرف زوایای چرخش حول محورهای x ، y و z می‌باشد. همچنین، m جرم، g شتاب گرانش، F نیروی کل بالابرنده چهارپره، $\mathbf{J} = \text{diag}(J_x, J_y, J_z)$ ماتریس ممان اینرسی، $\boldsymbol{\tau} = [\tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi]^T$ بردار گشتاور چهارپره حول هر یک از محورهای فضای سه‌بعدی، $s_z = \sin(z)$ و $c_z = \cos(z)$. رابطه‌ی بین ورودی‌های توصیف دینامیکی (۴۴) و نیروی بالابرنده هر یک از موتورهای چهارپره به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} F &= F_r + F_l + F_f + F_b \\ \boldsymbol{\tau} &= \begin{pmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L(F_l - F_r) \\ L(F_f - F_b) \\ k_\tau (F_r + F_l - F_f - F_b) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (45)$$

که در آن L طول بازوی چهارپره، F نیروی کل بالارونده موتورها، $F_r, F_l, F_f, F_b \in \mathbb{R}$ به ترتیب نیروی بالارونده موتور سمت راست، چپ، جلو و عقب، و k_τ ضریب بین گشتاور تولیدی موتور و نیروی بالابرنده آن است. از طریق این رابطه می‌توان نیروی لازم برای چرخش هر موتور را به دست آورد.

۴-۲- کنترل دوسطحی

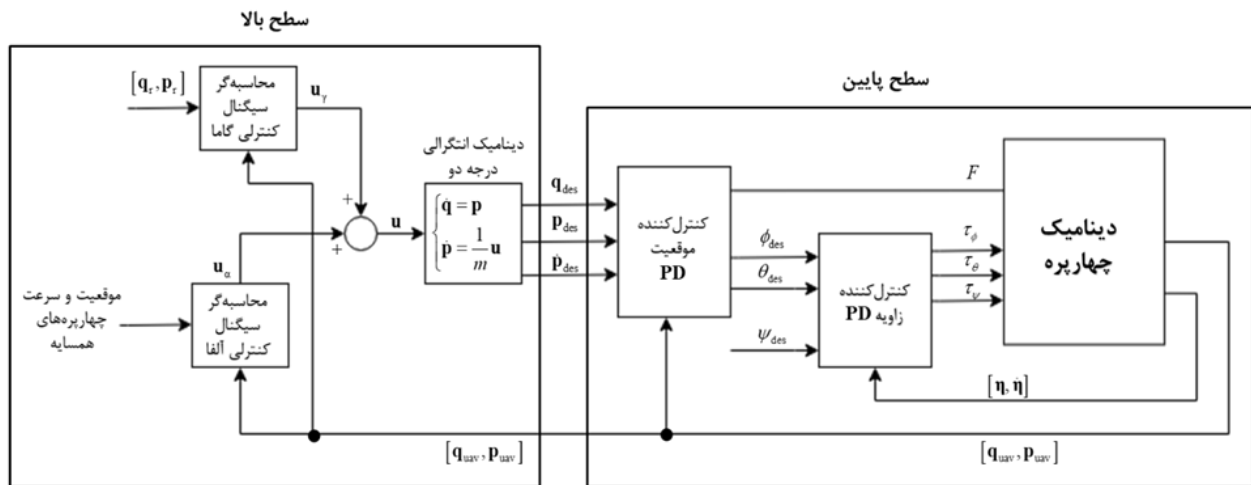
راه‌حل اعمال الگوریتم حرکت گروهی به ربات‌های پرنده، کنترل دوسطحی است که در آن، دو کنترل‌کننده (یکی در سطح بالا و دیگری در سطح پایین) طراحی می‌شود. وظیفه کنترل‌کننده سطح بالا، محقق کردن اهداف دست‌بالا یا

$$\begin{cases} \mathbf{q}_{uav} = \mathbf{q}_{des} + \mathbf{e} \\ \mathbf{p}_{uav} = \mathbf{p}_{des} + \dot{\mathbf{e}} \end{cases} \quad (۴۸)$$

که در آن \mathbf{e} خطای ردیابی کنترل‌کننده سطح پایین است. از آنجایی که پایداری الگوریتم حرکت گروهی با دینامیک ذره‌ای در فصل قبل اثبات شد، در اینجا پایداری کل سیستم به عملکرد کنترل‌کننده سطح پایین وابسته است. با فرض پایداری مجانبی زمان محدود کنترل‌کننده سطح پایین، \mathbf{e} در زمان محدود به صفر میل کرده و $\mathbf{q}_{uav} = \mathbf{q}_{des}$ و $\mathbf{p}_{uav} = \mathbf{p}_{des}$ می‌شود که در این حالت پایداری کل سیستم، همان پایداری الگوریتم حرکت گروهی است که در بخش قبل اثبات شد. با توجه به این که در این مقاله تمرکز اصلی در کنترل سطح بالا است، در اینجا به تحلیل پایداری کنترل‌کننده سطح پایین پرداخته نمی‌شود. هر کنترل‌کننده‌ی موقعیت دیگر در جایگاه سطح پایین با رعایت شرط گفته‌شده می‌تواند استفاده شود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی پرداخته می‌شود. برای این منظور، ۵ چهارپره در مبدأ با فاصله ۱٫۵ متر از هم روی زمین در نظر گرفته شده است. مسیر مطلوب حرکت گروهی ابتدا با سرعت ثابت $\mathbf{p}_r^1 = [0, 0, 2]^T$ m/s از زمین تا ارتفاع ۵ متری فرض شده و پس از آن مسیری با سرعت مطلوب $\mathbf{p}_r^2 = [2, 2, 0]^T$ m/s در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۳): دیاگرام بلوکی کل سیستم.

$\mathbf{K}_d = \text{diag}[k_d^x, k_d^y, k_d^z]$ ماتریس ضرایب مشتق‌گیر و g شتاب گرانش است. دقت شود که ψ_{des} در حرکت انتقالی تأثیری نداشته و توسط طراح به دلخواه انتخاب می‌شود که در این مقاله صفر در نظر گرفته شده است. همچنین برای کنترل پایداری، ϕ_{des} و θ_{des} از یک تابع اشباع می‌گذرد که بیشینه و کمینه آن به ترتیب $\pi/6$ و $-\pi/6$ است. ورودی‌های کنترل‌کننده زاویه، زوایای اوپلر مطلوب $\boldsymbol{\eta}_{des} = [\phi_{des}, \theta_{des}, \psi_{des}]^T$ حاصل از کنترل‌کننده موقعیت، زوایای اوپلر چهارپره و مشتق زوایای اوپلر است. خروجی این کنترل‌کننده نیز گشتاورهای لازم حول هر یک از محورهای فضای سه‌بعدی است. رابطه ریاضی کنترل‌کننده جهت به این صورت است:

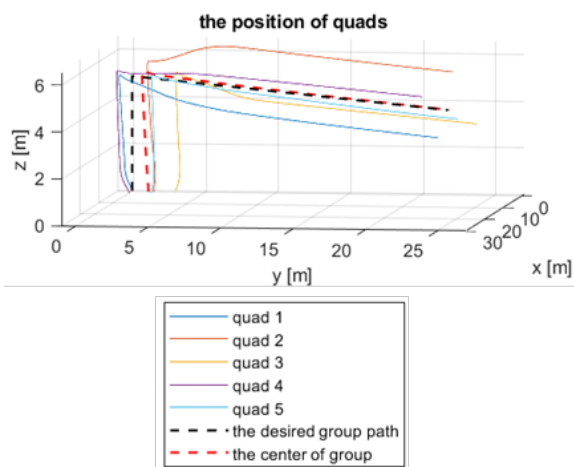
$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}(\tilde{\mathbf{K}}_p(\boldsymbol{\eta}_{des} - \boldsymbol{\eta}) - \tilde{\mathbf{K}}_d\dot{\boldsymbol{\eta}}) \quad (۴۷)$$

که در آن $\tilde{\mathbf{K}}_p = \text{diag}[\tilde{k}_p^\phi, \tilde{k}_p^\theta, \tilde{k}_p^\psi]$ ماتریس ضرایب تناسبی و $\tilde{\mathbf{K}}_d = \text{diag}[\tilde{k}_d^\phi, \tilde{k}_d^\theta, \tilde{k}_d^\psi]$ ماتریس ضرایب مشتق‌گیر است.

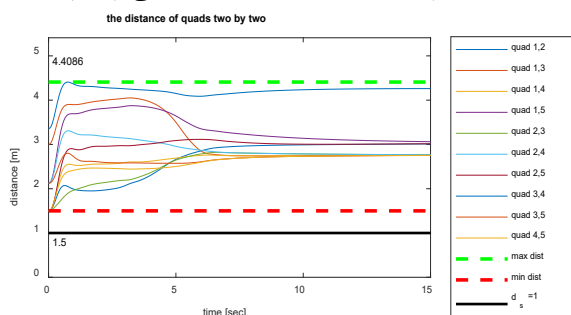
۴-۴- بررسی پایداری

در بخش قبل، پایداری الگوریتم حرکت گروهی برای دینامیک ذره‌محور بررسی و اثبات شد. ولی در سیستم اصلی، دینامیک ربات چهارپره قرار دارد. با توجه به ساختار دوسطحی که بیان شد، می‌توان رابطه‌ای بین وضعیت مطلوب حاصل از دینامیک ذره‌ای و وضعیت ربات پرنده را به صورت زیر نوشت:

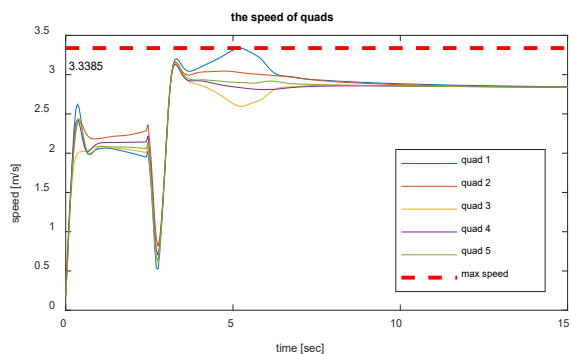
نزدیک شده و در نهایت به همسایگی آن همگرا می‌شود. این نشان‌دهنده رسیدن به شبکه‌بندی آلفا با آستانه‌ای از خطا است که همان شبکه‌بندی نیمه‌آلفا محسوب می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت که الگوریتم در رسیدن به هدف شبکه‌بندی نیمه‌آلفا موفق بوده است. همچنین، می‌توان دید که محدوده‌ی ایمنی چهارپره‌ها در کل شبیه‌سازی رعایت شده است.



شکل (۳): موقعیت سه‌بعدی حرکت گروهی چهارپره‌ها



شکل (۴): نمودار فاصله دوبه‌دو چهارپره‌ها



شکل (۵): سرعت چهارپره‌ها

در اینجا، مسیر مطلوب شرط قضیه ۲ را رعایت می‌کند. پارامترهای دینامیک چهارپره مطابق جدول ۱ و پارامترهای الگوریتم حرکت گروهی مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

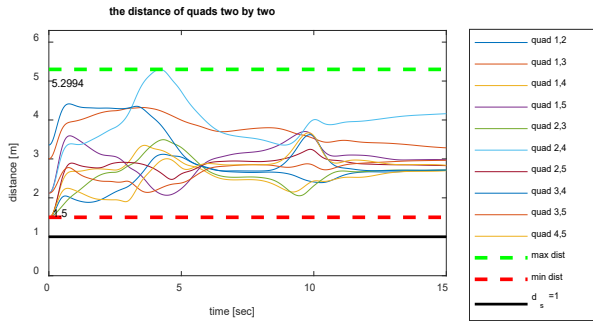
جدول (۱): پارامترهای دینامیک چهارپره.

نام پارامتر	مقدار پارامتر
جرم چهارپره	$m = 1 \text{ kg}$
طول بازو	$L = 0.2 \text{ m}$
شتاب گرانش	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
ماتریس اینرسی	$J = \text{diag}[15.19 \ 28.37 \ 15.06] \times 10^{-3} \text{ Nms}^2$
ضرایب ضرایب کنترل‌کننده	$K_p = \text{diag}[5 \ 5 \ 4]$
موقعیت	$K_d = \text{diag}[8 \ 8 \ 6]$
ضرایب کنترل‌کننده زاویه	$\tilde{K}_p = \text{diag}[3000 \ 3000 \ 3000]$
	$\tilde{K}_d = \text{diag}[300 \ 300 \ 300]$

جدول (۲): پارامترهای الگوریتم حرکت گروهی.

نام پارامتر	مقدار پارامتر
تعداد چهارپره	$n = 5$
فاصله شبکه‌بندی مطلوب	$d = 3 \text{ m}$
فاصله‌ی ایمنی از یکدیگر	$d_s = 1 \text{ m}$
شعاع همسایگی	$r = 5 \text{ m}$
ضریب نرم سیگما	$\varepsilon = 0.1$
ضریب تنظیم سیستم فازی	$y_{\max} = 5$
ضرایب بازخورد هدایتی	$c_1^y = 0.1$ و $c_2^y = 5$
ثابت زمانی	$T = 0.05 \text{ s}$

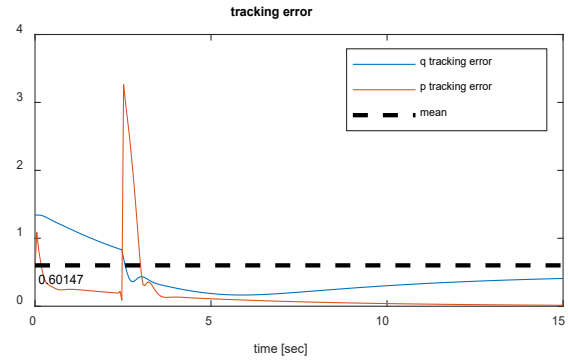
عملکرد روش پیشنهادی با مرجع [۱۶] مقایسه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۴ تا ۱۱ آورده شده است. در شکل ۴، نمودار سه‌بعدی موقعیت پرواز گروهی چهارپره‌ها نمایش داده شده است که نشان‌دهنده همگرایی در حرکت گروهی با استفاده از روش پیشنهادی است. در شکل ۵، نمودار فواصل دوبه‌دوی چهارپره‌ها در هر لحظه نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که کمترین فاصله بین دو چهارپره در همان لحظه اول بوده و پس از آن فاصله بین چهارپره‌ها به فاصله شبکه‌بندی مطلوب یعنی ۳ متر



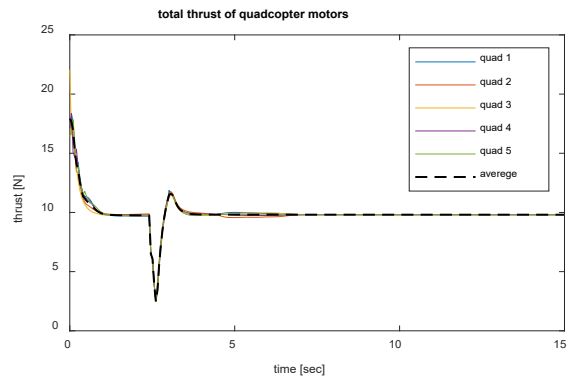
شکل (۱۱): فاصله‌ی دوبه‌دوی چهارپره‌ها در حضور باد.

در شکل ۶، اندازه سرعت عامل‌ها در هر لحظه رسم شده است. می‌توان دید که بهنگام تغییر مسیر مطلوب، سرعت ربات‌ها دستخوش تغییرات شده اما پس‌از آن، به مقدار یکسانی (حدوداً $2/8$ متر بر ثانیه) میل می‌کنند که این تقریباً همان اجماع سرعت (یعنی $\| [2, 2, 0]^T \| = 2.82$) است. در شکل ۷، خطای ردیابی موقعیت و سرعت مسیر مطلوب گروه نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که خطای ردیابی سرعت به سمت صفر میل کرده است؛ اما خطای ردیابی موقعیت، به مقداری نزدیک صفر همگرا می‌شود. دلیل این خطای موقعیت، خطای ایجاد شده در کنترل‌کننده سطح پایین می‌باشد. وجود جهش بزرگ در خطای ردیابی سرعت نیز به خاطر تعویض مسیر مطلوب گروه است. در شکل ۸، نیروی بالابرنده هر چهارپره نمایش داده شده است. این نمودار به‌منزله سیگنال کنترلی هر چهارپره است. هرچقدر این نیرو کمتر باشد، چهارپره انرژی کمتری برای انجام مأموریت صرف کرده است. انرژی مصرفی هر ربات، مساحت زیر منحنی این نمودار است که میانگین انرژی مصرفی همه‌ی ربات‌ها به‌عنوان معیار مقایسه استفاده شده است. شکل ۹ مقدار تابع انرژی (یا تابع لیاپانوف) در طول شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. بر طبق این نمودار، مقدار انرژی در هیچ نقطه‌ای افزایشی نیست و پس از مدتی به مقداری ثابت همگرا می‌شود که صحت قضیه ۱ را نشان می‌دهد.

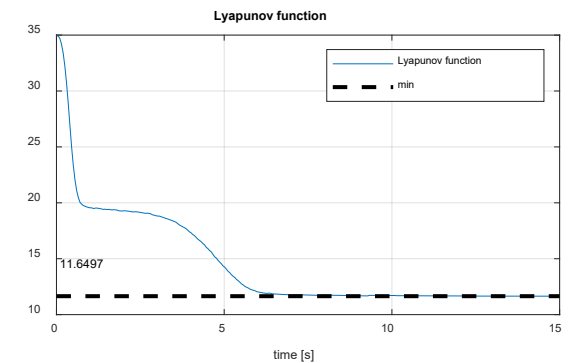
برای بررسی روش پیشنهادی در حضور اغتشاش، شبیه‌سازی‌ها در حضور اغتشاش باد مطابق شکل ۱۰ نیز انجام می‌شود. اغتشاش باد به خروجی سرعت چهارپره‌ها وارد شده است. شکل ۱۱ فاصله‌ی دوبه‌دوی چهارپره‌ها در این



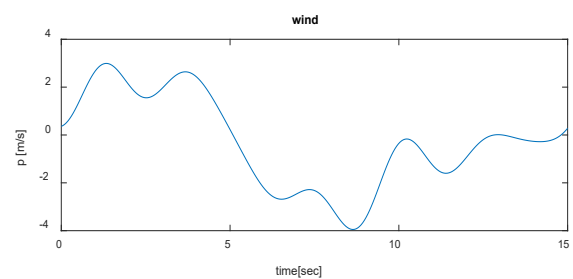
شکل (۷): خطای ردیابی مسیر مطلوب گروه



شکل (۸): نیروی بالابرنده هر چهارپره



شکل (۹): تابع لیاپانوف.



شکل (۱۰): اندازه اغتشاش باد.

کنترل‌کننده سطح پایین، پایداری کل سیستم نشان داده شد. شبیه‌سازی بر روی حرکت گروهی ۵ ربات چهارپره نشان داد که روش پیشنهادی با موفقیت منجر به حرکت گروهی ربات‌های چهارپره می‌شود به طوری که همواره فاصله بین عامل‌ها از فاصله ایمنی بیشتر است. مقاومت روش پیشنهادی در حضور اغتشاش باد نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت عملکرد روش پیشنهادی با روش معتبر دیگری در مقالات مقایسه شد و مشاهده گردید روش پیشنهادی در حفظ فاصله ایمنی و شبکه‌بندی بهتر عمل می‌کند. برای ادامه این پژوهش، توسعه روش پیشنهادی در فضای با مانع و بهینه‌سازی پارامترها کنترلی می‌تواند مفید واقع شود.

۶- مراجع

- [1] Reynolds CW, Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques; New York, USA, 1987.
- [2] Couzin ID, Krause J, James R, Ruxton GD, Franks NR. Collective memory and spatial sorting in animal groups. *Journal of Theoretical Biology*. 2002; 218(1): 1-11.
- [3] Vicsek T, Czirók A, Ben-Jacob E, Cohen I, Shochet O. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Physical Review Letters*. 1995; 75(6): 1226.
- [4] Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2006; 51(3): 401-20.
- [5] Su H, Wang X, Lin Z. Flocking of multi-agents with a virtual leader. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2009; 54(2): 293-307.
- [6] Gu D, Wang Z. Leader-follower flocking: algorithms and experiments. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2009; 17(5): 1211-9.
- [7] Su H, Wang X, Yang W. Flocking in multi-agent systems with multiple virtual leaders. *Asian Journal of Control*. 2008; 10(2): 238-45.
- [8] Wu S, Pu Z, Yi J, Sun J, Xiong T, Qiu T. Adaptive Flocking of multi-agent systems with uncertain nonlinear dynamics and unknown disturbances using neural networks. 16th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE); Hong Kong, China, 2020.

شرایط را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد در این شرایط نیز چهارپره‌ها وارد محدوده ایمنی هم نشده‌اند. همچنین می‌توان دید فاصله‌ی چهارپره‌ها از یکدیگر در نزدیکی فاصله‌ی شبکه‌بندی است. می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی مقاومت مناسبی در حضور اغتشاش خارجی دارا است.

مقایسه نتایج روش پیشنهادی در این مقاله و روش مرجع [۱۶] در جدول ۳ آورده شده است. مطابق این جدول، روش پیشنهادی توانسته فاصله ایمنی را حفظ کند در حالی که در [۱۶]، چهارپره‌ها وارد محدوده ایمنی یکدیگر شده‌اند. همچنین شبکه‌بندی نسبتاً بهتری توسط روش پیشنهادی انجام شده است. در سایر معیارها، عملکرد دو روش تقریباً یکسان است.

جدول (۳): مقایسه عملکرد الگوریتم‌های حرکت گروهی.

نام معیار	الگوریتم مرجع [۱۶]	الگوریتم پیشنهادی
کمترین فاصله دو چهارپره (متر)	۰٫۴۵	۱٫۵
میانگین شبکه‌بندی (متر)	۰٫۷۸	۰٫۴۱
میانگین خطای اجماع سرعت (متر بر ثانیه)	۴٫۱۸	۴٫۱
میانگین خطای ردیابی مسیر مطلوب گروه (متر)	۰٫۵۴	۰٫۶۰
میانگین انرژی مصرفی چهارپره‌ها (ژول)	۱۴۸٫۲۳	۱۴۸٫۴۹

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تابع پتانسیل فازی برای شبکه‌بندی بهتر و حفظ فاصله ایمنی معرفی شد که در وضعیت شبکه‌بندی منظم، مقدار کمینه دارد. برای کمینه کردن این تابع پتانسیل، در سیگنال کنترلی از روش گرادینان نزولی استفاده شد. همچنین پایداری الگوریتم حرکت گروهی با سیگنال کنترلی پیشنهادی، بررسی و اثبات شد. با استفاده از ایده کنترل دوسطحی، الگوریتم حرکت گروهی روی ربات‌های پرنده اعمال و با فرض پایداری مجانبی زمان محدود

- [21] Brandstätter A, Smolka SA, Stoller SD, Tiwari A, Grosu R. Multi-Agent Spatial Predictive Control with Application to Drone Flocking (Extended Version). arXiv preprint arXiv:220316960. 2022.
- [22] Zhang P, Chen G, Li Y, Dong W. Agile formation control of drone flocking enhanced with active vision-based relative localization. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022;7(3):6359-66.
- [23] Wang L-X. A course in fuzzy systems. 1999.
- [24] Zhang X, Li X, Wang K, Lu Y, A survey of modelling and identification of quadrotor robot. *Abstract and Applied Analysis*; volume 2014, Article ID 320526.
- [25] Lu Y. yrlu/quadrotor: Quadrotor control, path planning and trajectory optimization. GitHub. 2017.
- [9] Yang Z, Zhang Q, Jiang Z, Chen Z. Flocking of multi-agents with time delay. *International Journal of Systems Science*. 2012; 43(11): 2125-34.
- [10] Zhu P, Dai W, Yao W, Ma J, Zeng Z, Lu H. Multi-robot flocking control based on deep reinforcement learning. *IEEE Access*. 2020; 8: 150397-150406.
- [11] Beaver LE, Kroninger C, Malikipoulos AA. An optimal control approach to flocking. *American Control Conference*; 2020, Denver, USA.
- [12] Gu D, Hu H. Using fuzzy logic to design separation function in flocking algorithms. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2008; 16(4): 826-38.
- [13] Sahu BK, Subudhi B. Flocking control of multiple AUVs based on fuzzy potential functions. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2017; 26(5): 2539-2551.
- [14] Iovino S, Vetrella AR, Fasano G, Accardo D, Savvaris A. Implementation of a distributed flocking algorithm with obstacle avoidance capability for UAV swarming. *AIAA Information Systems-AIAA Infotech*. 2017, Grapevine, Texas, USA.
- [15] Liu W, Gao Z. A distributed flocking control strategy for UAV groups. *Computer Communications*. 2020; 153: 95-101.
- [16] Ning Z, Song L, Huang D, Zhang X. Lattice flocking of multi-quadrotor system: an algorithm based on artificial potential field. *Aerospace Systems*. 2018; 1(1): 13-22.
- [17] Yan C, Xiang X, Wang C. Fixed-Wing UAVs flocking in continuous spaces: A deep reinforcement learning approach. *Robotics and Autonomous Systems*. 2020; 131: 103594.
- [18] Abichandani P, Speck C, Bucci D, McIntyre W, Lobo D. Implementation of Decentralized Reinforcement Learning-Based Multi-Quadrotor Flocking. *IEEE Access*. 2021; 9: 132491-507.
- [19] Zijian H, Xiaoguang G, Kaifang W, Yiwei Z, Qianglong W. Relevant experience learning: A deep reinforcement learning method for UAV autonomous motion planning in complex unknown environments. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021; 34(12): 187-204.
- [20] Zhang X, Yuan Y, Zhang F. An improved flocking model for UAVs in constrained environments. *8th International Conference on Big Data and Information Analytics*; 2022, Guiyang, China.