

علمی - تخصصی

طراحی کنترل کننده آرایش پیشرو- پیرو مبتنی بر حرکت گروهی پیشرو- پیرو با یک پیشروی مجازی برای دسته‌هایی از وسیله‌های پرنده

وحید باقری^۱، سیدحسن حسینی^{۲*}

۱- پژوهشگر دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی و تحقیقات راهبردی،

۲- دکتری مدیریت راهبردی دفاعی دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی و تحقیقات راهبردی

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷)

چکیده

حرکت گروهی پرندگان و ماهی‌ها توسط سیستم‌های چندعاملی مدل می‌شود. حرکت گروهی پرندگان و ماهی‌ها دارای قوانین رینولدز می‌باشند؛ که این قوانین عبارت هستند از: اجتناب از برخورد، تطبیق سرعت و جمعیت محور بودن. هدف، طراحی کنترل کننده‌ای است که بتوانیم توسط این کنترل کننده بسته‌های پستی یک منطقه را با استفاده از تعدادی وسیله پرنده تحویل دهیم. برای این کار چندین گروه از وسیله‌های پرنده را در نظر می‌گیریم. برای هر گروه از وسیله‌های پرنده یک کنترل کننده آرایش پیشرو-پیرو در نظر می‌گیریم، تا با یک آرایش خاصی، بسته‌های پستی را به منطقه موردنظر تحویل دهند. در هر گروه از وسیله‌های پرنده، یک پیشرو وجود دارد که چندین پیرو از این پیشرو تبعیت می‌کنند. در نتیجه تعداد پیشروها با تعداد گروه‌ها برابر است. ارتباط بین گروه‌ها توسط پیشروی موجود در هر گروه برقرار می‌شود. با توجه به قوانین رینولدز، از کنترل کننده حرکت گروهی برای کنترل حرکت پیشروها استفاده می‌کنیم. این کنترل کننده حرکت گروهی، دارای یک پیشروی مجازی می‌باشد و ما فقط این پیشروی مجازی را کنترل می‌کنیم. وسیله‌های پرنده پیشرو، توسط کنترل کننده حرکت گروهی از پیشروی مجازی تبعیت می‌کنند. این کنترل کننده دارای حجم محاسبات کم، زمان محاسبات کم، سرعت پردازش بالا، پهنای باند کم، هزینه کم و قابل پیاده‌سازی و اجرا در یک سیستم ساده می‌باشد. طبق شبیه‌سازی‌های انجام شده، اگر یکی از پیشروها یا یکی از پیروها در طول مسیر دچار خطا شود؛ بقیه وسیله‌های پرنده تا رسیدن به هدف موردنظر به حرکت خود ادامه می‌دهند و هیچ خللی در کنترل حرکت بقیه وسیله‌های پرنده ایجاد نمی‌شود.

کلیدواژه‌ها: پیرو، پیشرو، پیشروی مجازی، آرایش، قوانین رینولدز، حرکت گروهی، تابع پتانسیل، اجماع.

۱- مقدمه

گروهی^۳ و همزمان‌سازی^۴ به صورت مختصر بیان کرده است. در [۵] مروری بر اجماع در کنترل تجمعی انجام شده است. همچنین کاربردهای الگوریتم اجماع برای مسائل تجمعی از قبیل آرایش، جمع شدن در یک مکان و حرکت گروهی بررسی شده است. در [۶] مروری جامع بر کنترل پرواز آرایش فضاپیماها انجام شده است؛ که روش‌های طراحی و نتایج پایداری برای این کنترل کننده را در بر می‌گیرد.

در [۷] مسئله کنترل آرایش چندلایه تعریف شده است؛ که عامل‌ها می‌توانند اطلاعات میان لایه‌ها را دریافت و انتقال دهند. یک لایه تخمین‌زننده‌ای برای عامل‌های لایه دیگر می‌باشد؛ تا بتوانند موقعیت و سرعت هدف را بر مبنای اطلاعات عامل‌های لایه قبلی به دست آورند. در [۸] یک پروتکل کنترلی جدید برای کنترل آرایش مقاوم مبتنی بر فاصله در عامل‌هایی با اغتشاشات

در [۱] ماهیت رفتار جمعی در گروه‌های حشرات، پرندگان و ماهی‌ها ارائه شده است. رفتار جمعی به دلیل جستجو برای غذا و دفاع از خود در برابر شکارچی‌ها صورت می‌گیرد. در این مرجع از این رفتار برای طراحی کنترل آرایش خودکار استفاده شده است. در [۲] مروری بر مسائل و راهبردهای کنترلی بر روی گروهی از آرایش ربات‌های بدون سرنشین انجام شده است. در [۳] مسئله اجماع، آرایش، آنالیز همگرایی و رابطه بین آن‌ها و پایداری آن‌ها برای سیستم‌هایی با دینامیک خطی بررسی شده است. در [۴] راه‌حل توزیع شده برای اجماع سیستم‌های چندعاملی به صورت عمیق مرور شده است. در این مرجع، کاربردهای اجماع را در مسائل آرایش، هم‌ترازی^۱، جمع شدن در یک مکان^۲، حرکت

* رایانامه نویسنده مسئول: h.hosseini@sndu.ac.ir

³ Flocking

⁴ Synchronization

¹ Alignment

² Rendezvous

دایره‌ای خاص با استفاده از کنترل‌کننده حرکت گروهی ارائه شده است. مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور کنترل حرکت گروهی UAVها با محوریت جلوگیری از برخورد با مانع، برای الگوریتم‌های متمرکز در [۱۸] ارائه شده است. الگوریتم حرکت گروهی الفتی-صابر با استفاده از پیشروی مجازی به‌منظور اطمینان از امنیت اطلاعات گروه‌های UAV، حداکثر کردن محدوده تشخیص گروه UAV و حداقل کردن محدوده ارتباطات در [۱۹] بهبود داده شده است. یک چارچوب کنترلی توزیع‌شده با الهام از راهبردهای سلسله مراتبی کبوتر خانگی^۳ برای حل مشکل حرکت گروهی UAVها در [۲۰] ارائه شده است. یک مدل ریاضی غیرمتمرکز برای کنترل پیش‌بینی سیستم UAVهای خودمختار در شرایط نامساعد جوی (مثل باران، باد شدید و ...) با اضافه کردن نویز گوسی در [۲۱] ارائه شده است. در [۲۲] از روش کنترل LQR برای توسعه راهبرد مبتنی بر رفتار، برای حل مسئله کنترل حرکت گروهی چندین UAV استفاده شده است. کنترل بهینه تصادفی چندین UAV، برای انجام جمعی و توزیعی یک وظیفه اندازه‌گیری مشخص، به‌منظور حرکت گروهی UAVها با همدیگر در [۲۳] ارائه شده است. در [۲۴] با یادگیری از الگوریتم الفتی-صابر، یک الگوریتم بهینه سازی شده با رهبران مجازی ارائه شده است؛ تا سرعت گروه را سریع‌تر و پایدارتر کند و همچنین تاثیر رهبران مجازی را با سرعت متغیر بر سیستم‌های ارتباطی پیچیده هواپیماهای بدون سرنشین نشان دهد. پیاده‌سازی سنجشگر راداری در [۲۵] انجام شده است؛ که این سنجشگر امکان تولید اهداف با فاصله و سرعت کاذب نسبت به رادار را فراهم می‌کند.

هدف ما طراحی کنترل‌کننده‌ای است که بسته‌های پستی موجود در مناطق مختلف را به‌صورت همزمان با کمترین هزینه و به‌صورت هوشمند به گیرنده‌ها برسانیم. با توجه به اینکه ما فقط پیشروی مجازی را کنترل می‌کنیم و همه وسیله‌های پرنده پیرو و پیشرو، از پیشروی مجازی تبعیت می‌کنند؛ در نتیجه این کنترل‌کننده دارای حجم محاسبات کم، زمان محاسبات کم، سرعت پردازش بالا، پهنای باند کم، هزینه کم و قابل پیاده‌سازی در یک سیستم ساده می‌باشد.

در این مقاله برای رساندن بسته‌های پستی توسط دسته‌هایی از وسیله‌های پرنده در مناطق مختلف از کنترل‌کننده آرایش پیشرو-پیرو مبتنی بر حرکت گروهی پیشرو-پیرو استفاده شده است. در این طرح، تنها با کنترل کردن پیشروی مجازی بسته‌های پستی به دست گیرنده‌ها می‌رسند. برای این کار

خارجی نامعین ارائه شده است. حفظ پیوستگی و جلوگیری از برخورد با عامل‌های همسایه به‌وسیله طراحی مناسب محدود عملکرد خاص برای خطای فاصله میان عامل‌ها اعمال شده است. در [۹] با استفاده از روش میدان پتانسیل مصنوعی، یک کنترل‌کننده آرایش پیشرو-پیرو تطبیقی با راهبرد جلوگیری از برخورد برای یک کلاس از سیستم‌های چندعاملی غیرخطی مرتبه دوم ارائه شده است. برای حل مشکل دینامیک‌های غیرخطی نامعین از شبکه عصبی استفاده شده است. در [۱۰] یک الگوریتم کنترل آرایش توزیع‌یافته جدید برای سیستم‌های چندعاملی نامعین غیرخطی ارائه شده است. این الگوریتم بر مبنای یک چارچوب H_{∞} غیرخطی برای گروهی از ربات‌های هوایی با دینامیک‌های غیرخطی و نامعینی‌های پارامتری محدود توسعه داده شده است. در [۱۱] مسئله جلوگیری از برخورد با مانع در کنترل آرایش برای سیستم‌های چندعاملی دو انتگرال‌گیر تحت توپولوژی ارتباطی جهت‌دار بررسی شده است. این کار به وسیله یک طرح کنترل آرایش پیشرو-پیرو که با روش میدان پتانسیل مصنوعی ترکیب شده است؛ انجام می‌پذیرد. کنترل دنبالیابی آرایش تحریک-رویداد^۱ تطبیقی در [۱۲] برای سیستم‌های چندعاملی مرتبه دوم با تاخیر متغیر با زمان بررسی شده است. مسئله کنترل آرایش و دنبالیابی مسیر مرجع بر روی سیستم‌های چندعاملی اوپلر-لاگرانژ در [۱۳] بررسی شده است. این کار به‌وسیله راهبرد کنترلی تحریک-رویداد به وسیله کاهش تعداد ارتباطات میان عامل‌ها انجام شده است. در [۱۴] سیستم چندعاملی متشکل از گروهی از UAVها می‌باشد. این مرجع عمده‌تاً بر روی کنترل آرایش و اجماع حرکت در جمعیت UAVها تمرکز کرده است. در [۱۵] رفتار حرکت گروهی و مسئله اجماع چندین عامل ناهمگن^۲ با برد ارتباطی محدود بررسی شده است. با در نظر گرفتن اثر اینرسی عامل‌های حقیقی، یک پروتکل کنترل توزیع‌شده طراحی شده است؛ به‌نحوی که عامل‌ها می‌توانند به رفتار جمعی پایدار برسند. الگوریتم حرکت گروهی الفتی-صابر با محوریت جلوگیری از برخورد، با استفاده از تعامل محلی اطلاعات موانع در [۱۶] ارائه شده است. برای اینکه گروه UAVها مسیر مطلوب را با اجماع بهتری دنبال کنند؛ الگوریتم کنترل حرکت گروهی عامل‌ها را طبق مشخصات و نیازمندی‌های جمعیت UAVها بهبود یافته است. الگوریتم جلوگیری از برخورد با مانع برای جمعیت UAVها بر مبنای الگوریتم ارائه شده توسط الفتی-صابر می‌باشد.

در [۱۷]، یک کنترل‌کننده برای نحوه شکل‌گیری گروهی از UAVها با در نظر گرفتن هماهنگی آن‌ها بر روی یک مسیر

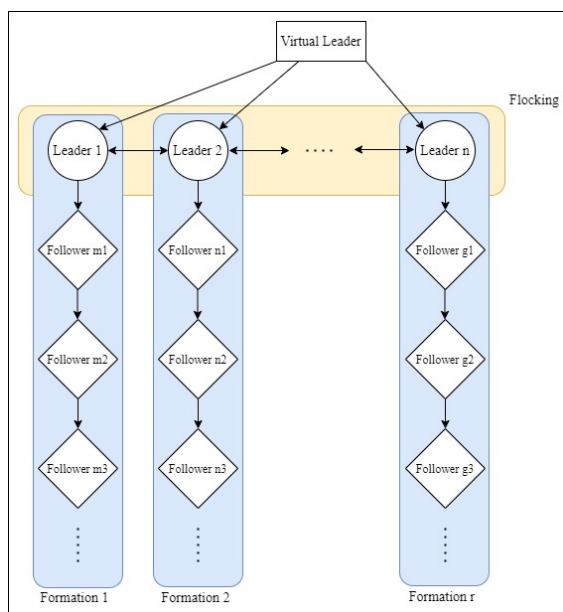
³ Homing Pigeon

¹ Event-Triggered

² Heterogeneous

۴- تعیین گراف تعاملی بین عامل‌های پیرو، پیشرو و پیشروی مجازی: در گراف تعاملی بین عامل‌ها، بین هر دو عامل حداقل یک مسیر جهت تبادل اطلاعات وجود دارد. این گراف را به صورت شکل (۱) در نظر می‌گیریم.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌کنیم، پیشروهای هر دسته به صورت مستقیم با پیشروی مجازی در ارتباط هستند. همچنین تمامی پیروها نیز فقط یا با بقیه پیروهای موجود در دسته خودشان در ارتباط هستند، یا با پیشروی متناظر با دسته خودشان. در حقیقت هیچ کدام از پیروها، با پیشروی مجازی به صورت مستقیم در ارتباط نیستند و تنها از طریق پیشروی مربوط به دسته خودشان، به صورت غیرمستقیم با پیشروی مجازی در ارتباط هستند. هر چقدر ارتباط بین عامل‌ها بیشتر باشد؛ گراف ارتباطی بین عامل‌ها، پیچیده‌تر می‌شود. با پیچیده‌تر شدن گراف ارتباطی عامل‌ها؛ هزینه طراحی کنترل کننده به دلیل تبادل اطلاعات بیشتر بین عامل‌ها، بیشتر می‌شود. در نتیجه گراف تعاملی بین عامل‌ها با حداقل ارتباط به صورت شکل (۱) در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): گراف ارتباطی بین عامل‌ها.

۵- تعیین بردار ورودی کنترلی عامل‌های پیشرو: در این قسمت با توجه به تعداد عامل‌های پیشرو، بردار ورودی کنترلی را برای این عامل‌ها تعیین می‌کنیم.

۶- تعیین بردار ورودی کنترلی عامل‌های پیرو: در این قسمت با توجه به تعداد عامل‌های پیرو، بردار ورودی کنترلی را برای این عامل‌ها تعیین می‌کنیم.

وسيله‌های پرنده موجود در هر منطقه را با استفاده از یک کنترل کننده آرایش پیشرو-پیرو کنترل می‌کنیم. در هر منطقه یک وسیله پرنده به عنوان پیشرو وجود دارد؛ که تمامی پیشروهای موجود در کل مناطق توسط کنترل کننده حرکت گروهی پیشرو پیرو کنترل می‌شوند.

نوآوری‌های این مقاله عبارت هستند از:

۱- در این کنترل کننده، فقط مسیر حرکت پیشروی مجازی را کنترل می‌کنیم. بقیه عامل‌های پیرو و پیشرو از این مسیر تبعیت می‌کنند.

۲- با توجه به اینکه نیازی نیست تمامی عامل‌های پیرو و پیشرو را به صورت مستقیم کنترل کنیم؛ در نتیجه این کنترل کننده با حجم محاسبات بسیار پایین، زمان بسیار کم، سرعت پردازش بسیار بالا، پهنای باند بسیار کم و هزینه بسیار کم؛ قابل پیاده‌سازی و اجرا می‌باشد.

۳- اگر هر کدام از عامل‌های پیرو یا پیشرو در طول مسیر دچار خطا شوند، بقیه عامل‌ها می‌توانند مسیر خود را به درستی دنبال کنند.

۴- این کنترل کننده با ترکیب کنترل کننده آرایش و حرکت گروهی طراحی شده است. دلیل استفاده از این ترکیب، این است که از کنترل کننده آرایش برای نشان دادن گیرنده بسته‌های پستی استفاده می‌شود و از کنترل کننده حرکت گروهی برای کنترل سرعت و موقعیت در طول مسیر حرکت استفاده شده است.

۲- الگوریتم طراحی کنترل کننده

برای طراحی این کنترل کننده، از الگوریتم زیر استفاده شده است.

۱- تبدیل دینامیک وسیله پرنده به دینامیک دبل انتگرال گیر: برای این منظور با استفاده از فیدبک خطی‌ساز، دینامیک وسیله پرنده را به دینامیک دبل انتگرال گیر تبدیل می‌کنیم.

۲- تعیین تعداد عامل‌های پیشرو موجود برای کنترل کننده حرکت گروهی: در این قسمت تعداد عامل‌های پیشرو را تعیین می‌کنیم.

۳- تعیین تعداد و نوع آرایش عامل‌های پیرو موجود در هر گروه برای کنترل کننده آرایش: به ازای هر عامل پیشرو، یک گروه از عامل‌های پیرو وجود دارند که دارای آرایش خاصی نسبت به همدیگر هستند. در این قسمت تعداد عامل‌های پیرو و بردار آرایش عامل‌ها را تعیین می‌کنیم.

برای تبدیل دینامیک سیستم موردنظر به دینامیک خطی، از خطی‌ساز فیدبک استفاده شده است. با فرض $Y = [x \ y \ z]^T$ داریم [۲۶].

$$\dot{Y} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos \gamma \cos \psi \\ V \cos \gamma \sin \psi \\ V \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (۲)$$

برای جلوگیری از مسئله غیرصریح^{۱۰} ورودی کنترلی جدید به صورت زیر تعریف شده است.

$$U_1 = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T - D \\ m \\ n \cos \phi \\ n \sin \phi \end{bmatrix} \quad (۳)$$

در نتیجه با مشتق‌گیری از \dot{Y} داریم [۲۶].

$$\ddot{Y} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u_1 - g \sin \gamma) \cos \gamma \cos \psi \\ (u_1 - g \sin \gamma) \cos \gamma \sin \psi \\ (u_1 - g \sin \gamma) \sin \gamma \\ -(u_2 - \cos \gamma) g \sin \gamma \cos \psi - u_3 g \sin \psi \\ -(u_2 - \cos \gamma) g \sin \gamma \sin \psi + u_3 g \cos \psi \\ (u_2 - \cos \gamma) g \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (۴)$$

برای اینکه بتوانیم از خطی‌ساز فیدبک استفاده کنیم، تبدیل زیر معرفی شده است [۲۶].

$$T(X) = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \\ \xi_5 \\ \xi_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ V \cos \gamma \cos \psi \\ V \cos \gamma \sin \psi \\ V \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (۵)$$

در نتیجه $\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_4 \\ \xi_5 \end{bmatrix}$ را داریم. حال با مشتق‌گیری از این رابطه، رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶].

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_4 \\ \dot{\xi}_5 \\ \dot{\xi}_6 \end{bmatrix} = A_1 + B_1(X)U_1 \quad (۶)$$

در این رابطه، ماتریس ضرایب به صورت $A_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}$

و $B_1(X) = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \psi & -g \sin \gamma \cos \psi & -g \sin \psi \\ \cos \gamma \sin \psi & -g \sin \gamma \sin \psi & g \cos \psi \\ \sin \gamma & g \cos \gamma & 0 \end{bmatrix}$ می‌باشد. با

توجه به اینکه $|B_1(X)| = -g^2 \neq 0$ است؛ لذا با استفاده از خطی‌ساز فیدبک خروجی، دینامیک وسیله پرنده خطی شده است. با فرض ورودی کنترلی جدید به صورت $v = [v_1 \ v_2 \ v_3]^T$ داریم [۲۶].

$$U_1 = B_1^{-1}(X)\{v - A_1\} \quad (۷)$$

با جایگذاری رابطه بالا در رابطه (۶) داریم [۲۶]:

۳- تبدیل دینامیک وسیله پرنده به دینامیک دبل انتگرال‌گیر

مدل ریاضی وسیله پرنده سه درجه آزادی از مرجع [۲۶] به صورت معادله (۱) استخراج شده است.

$$\dot{x} = V \cos \gamma \cos \psi \quad (۱)$$

$$\dot{y} = V \cos \gamma \sin \psi$$

$$\dot{z} = V \sin \gamma$$

$$\dot{V} = \frac{T - D}{m} - g \sin \gamma$$

$$\dot{\psi} = \frac{g n \sin \phi}{V \cos \gamma}$$

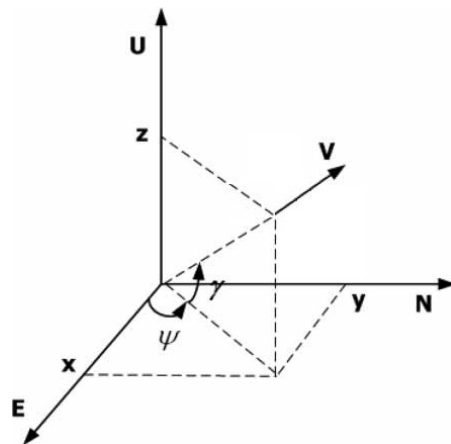
$$\dot{\gamma} = \frac{g(n \cos \phi - \cos \gamma)}{V}$$

بردار متغیر حالت به صورت $X = [x \ y \ z \ V \ \psi \ \gamma]^T$

تعریف شده است. این متغیرهای حالت عبارت هستند از: $X = [x \ y \ z]^T$ مکان وسیله پرنده، V سرعت وسیله پرنده، ψ زاویه نوک وسیله پرنده^۱ و γ زاویه مسیر پرواز^۲.

در دینامیک سیستم موردنظر بالا، L و D نیروی بالابرنده^۳ و کششی^۴ می‌باشد. ورودی کنترلی سیستم موردنظر به صورت $U = [T \ \phi \ n]^T$ در نظر گرفته شده است؛ که T رانش موتور^۵، ϕ زاویه جانبی^۶ و n ضریب بار^۷ می‌باشد. همچنین m و g نیز شتاب جرم^۸ و شتاب گرانشی^۹ می‌باشند.

در شکل (۲) می‌توانید متغیرهای حالت را مشاهده کنید.



شکل (۲): متغیرهای حالت وسیله پرنده با سه درجه آزادی [۲۷]

^۱ Heading Angle

^۲ Flight-Path Angle

^۳ Lift

^۴ Drag

^۵ Engine Thrust

^۶ Bank Angle

^۷ Load Factor

^۸ Mass Acceleration

^۹ Gravitational Acceleration

^{۱۰} Non-Affine

فرض می‌کنیم دینامیک N_f عامل پیرو مربوط به پیشروی

$$x_{l,r}(t) = \begin{bmatrix} p_{l,r}(t) \\ v_{l,r}(t) \end{bmatrix} \quad \text{به صورت زیر باشد.}$$

$$\dot{p}_{f,i} = v_{f,i}, \dot{v}_{f,i} = u_{f,i}, i = 1, 2, \dots, N_f \quad (۱۴)$$

همچنین فرض می‌کنیم.

$$h_i(t) = \begin{bmatrix} h_{i,p}(t) \\ h_{i,v}(t) \end{bmatrix} \quad (۱۵)$$

$$x_{f,i}(t) = \begin{bmatrix} p_{f,i}(t) \\ v_{f,i}(t) \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, N_f$$

$$x_{l,i}(t) = \begin{bmatrix} p_{l,i}(t) \\ v_{l,i}(t) \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, N_l$$

در نتیجه با فرض $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ و $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ دینامیک عامل های پیرو و پیشرو به صورت زیر در می‌آید.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{f,i}(t) &= Ax_{f,i}(t) + Bu_{f,i} \\ \dot{x}_{l,i}(t) &= Ax_{l,i}(t) + Bu_{l,i} \end{aligned} \quad (۱۶)$$

در نتیجه ماتریس لاپلاسین متناظر این سیستم چندعاملی به صورت $L = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $L_1 \in \mathbb{R}^{N_f \times N_f}$, $L_2 \in \mathbb{R}^{N_f \times (N_l - N_f)}$ می‌آید.

تعریف: برای رسیدن به formation tracking، باید شرط زیر به ازای هر شرط اولیه محدود برقرار باشد.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_{f,i}(t) - h_{f,i}(t) - x_{l,r}(t)) = 0 \quad (۱۷)$$

برای رسیدن به این هدف، ورودی کنترلی زیر را در نظر می‌گیریم [۲۹].

$$\begin{aligned} u_{f,i}(t) &= \\ & K \sum_{j=1}^{N_f} w_{ij} ((x_{f,i}(t) - h_{f,i}(t)) - (x_{f,j}(t) - h_{f,j}(t))) \\ & + K \sum_{r=1}^{N_l} w_{ir} ((x_{f,i}(t) - h_{f,i}(t)) - x_{l,r}(t)) \\ & - \tilde{B}(Ah_i(t) - \dot{h}_i(t)) \end{aligned} \quad (۱۸)$$

در این رابطه برای به دست آوردن \tilde{B} ، با فرض $rank(B) = e$ می‌توانیم از رابطه $\tilde{B}B = I_e$ استفاده کنیم. همچنین در این رابطه، ترم $K \sum_{j=1}^{N_f} w_{ij} ((x_{f,i}(t) - h_{f,i}(t)) - (x_{f,j}(t) - h_{f,j}(t)))$ همسایه می‌باشد. ترم $K \sum_{r=1}^{N_l} w_{ir} ((x_{f,i}(t) - h_{f,i}(t)) - x_{l,r}(t))$ نشان دهنده خطای دنبالیابی عامل‌های همسایه می‌باشد. ترم $v_i(t) = -\tilde{B}(Ah_i(t) - \dot{h}_i(t))$ سیگنال جبران ساز دنبالیابی آرایش متغیر با زمان می‌باشد.

فرض کنید که ماتریس کلی حالت‌های عامل‌های پیرو به

$$\begin{bmatrix} \xi_4 \\ \xi_5 \\ \xi_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

در نتیجه دینامیک سیستم اصلی به صورت زیر در می‌آید.

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (۹)$$

در نهایت دینامیک موقعیت وسیله پرنده، با استفاده از تبدیلات بیان شده به دینامیک دو انتگرال گیر تبدیل می‌شود.

۴- تعیین بردار ورودی کنترلی عامل‌های پیرو و پیشرو

فرض می‌کنیم دینامیک N_l عامل پیشرو به صورت رابطه (۱۰) باشد.

$$\dot{p}_{l,i} = v_{l,i}, \dot{v}_{l,i} = u_{l,i}, i = 1, 2, \dots, N_l \quad (۱۰)$$

در این مسئله، بردار مکان و بردار سرعت می‌باشد و ورودی کنترلی به صورت رابطه (۱۱) در نظر گرفته شده است [۲۸].

$$u_{l,i} = f_i^\alpha + f_i^\beta + f_i^\gamma \quad (۱۱)$$

در این فرمول، f_i^α وظیفه جداسازی و به هم پیوستگی را بر عهده دارد و به صورت یک ترم برحسب گرادیان $(-\nabla_{v_i} V(p))$ تعریف می‌شود. ترم f_i^β سرعت عامل‌ها را تنظیم می‌کند. ترم f_i^γ فیدبک هدایت کننده می‌باشد و وظیفه دارد که عامل‌ها را برای دنبال کردن عامل پیشرو مجازی تحریک کند. دینامیک پیشرو مجازی به صورت رابطه (۱۲) تعریف شده است.

$$\dot{p}_0 = v_0, \dot{v}_0 = f_0(p_0, v_0) \quad (۱۲)$$

در این فرمول، p_0 بردار مکان و v_0 بردار سرعت برای عامل پیشروی مجازی می‌باشد و $f_0(p_0, v_0)$ ورودی کنترلی پیشروی مجازی می‌باشد.

در نهایت ورودی کنترلی عامل‌های پیشرو به صورت زیر به دست می‌آید [۲۸].

$$\begin{aligned} u_{l,i} &= -\nabla V(p) + \sum_{j \in N_l} a_{ij} (v_{l,j} - v_{l,i}) \\ & + c_1 (p_0 - p_{l,i}) + c_2 (v_0 - v_{l,i}) \\ & = -\nabla V(p) - L_{l,i} v + c_1 (p_0 - p_{l,i}) \\ & + c_2 (v_0 - v_{l,i}) \end{aligned} \quad (۱۳)$$

در این رابطه، $c_1, c_2 > 0$ هستند.

در ادامه برای عامل‌های پیرو مربوط به هر یک از پیشروها، کنترل کننده آرایش متغیر با زمان به صورت زیر طراحی می‌کنیم.

$$\phi_{f,i}(t) = \sum_{j=1}^{N_f} w_{ij}(\theta_{f,i}(t) - \theta_{f,j}(t)) + \sum_{r=1}^{N_l} w_{ir}(t)(\theta_{f,i}(t) - x_{l,r}(t))$$

$$\phi_F(t) = (L_1 \otimes I_n)\theta_F(t) + (L_2 \otimes I_n)x_E(t) \quad (23)$$

در نتیجه رابطه $\theta_F(t)$ را نیز می‌توانیم به صورت زیر به دست آوریم:

$$\theta_F(t) = (L_1^{-1} \otimes I_n)\phi_F(t) - (L_1^{-1}L_2 \otimes I_n)x_E(t) \quad (24)$$

در نتیجه با مشتق‌گیری از رابطه (۲۳) و جایگذاری رابطه های مربوطه داریم:

$$\dot{\phi}_F(t) = (I_{N_f} \otimes A + L_1 \otimes BK)\phi_F(t) + (L_1 \otimes A)h_F(t) - (L_1 \otimes I_n)\dot{h}_F(t) + (L_1 \otimes B)v_F(t) - (L_1^{-1}L_2 \otimes B)U_E(t) \quad (25)$$

حال با فرض $\bar{\phi}_F(t) = (U_F^{-1} \otimes I_n)\phi_F(t)$ سیستم (۲۵) به فرم زیر تبدیل می‌شود:

$$\dot{\bar{\phi}}_F(t) = (I_{N_f} \otimes A + J_F \otimes BK)\bar{\phi}_F(t) + (U_F^{-1}L_1 \otimes A)h_F(t) - (U_F^{-1}L_1 \otimes I_n)\dot{h}_F(t) + (U_F^{-1}L_1 \otimes B)v_F(t) - (U_F^{-1}L_1^{-1}L_2 \otimes B)U_E(t) \quad (26)$$

اگر فرض قضیه مطابق رابطه (۲۰) محقق شود، آنگاه داریم:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\bar{B}Ah_i(t) - \bar{B}\dot{h}_i(t) + \bar{B}Bv_i(t)) = 0 \quad (27)$$

با فرض $v_i(t) = -\bar{B}(Ah_i(t) - \dot{h}_i(t))$ داریم:

$$\bar{B}Ah_i(t) - \bar{B}\dot{h}_i(t) + \bar{B}Bv_i(t) = 0 \quad (28)$$

با استفاده از روابط (۲۷) و (۲۸) و با توجه به اینکه $T = [\bar{B}^T \quad \bar{B}^T]^T$ غیرمنفرد است؛ داریم:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (Ah_i(t) - \dot{h}_i(t) + Bv_i(t)) = 0 \quad (29)$$

رابطه (۲۹) با استفاده از ضرب کرونکر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} ((I_{N_f} \otimes A)h_F(t) - (I_{N_f} \otimes I_n)\dot{h}_F(t) + (I_{N_f} \otimes B)v_F(t)) = 0 \quad (30)$$

با ضرب طرفین رابطه (۳۰) در $U_F^{-1}L_1 \otimes I_n$ داریم:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} ((U_F^{-1}L_1 \otimes A)h_F(t) - (U_F^{-1}L_1 \otimes I_n)\dot{h}_F(t) + (U_F^{-1}L_1 \otimes B)v_F(t)) = 0 \quad (31)$$

حال در این قسمت فرض می‌کنیم که کلیه عامل‌های پیشرو

صورت $x_F(t) = [x_{f,1}^T(t) \quad x_{f,2}^T(t) \quad \dots \quad x_{f,N_f}^T(t)]^T$ کلی حالت‌های عامل‌های پیشرو به صورت $x_E(t) = [x_{l,1}^T(t) \quad x_{l,2}^T(t) \quad \dots \quad x_{l,N_l}^T(t)]^T$ باشد. همچنین فرض کنید $v_F(t) = [v_1^T(t) \quad v_2^T(t) \quad \dots \quad v_{N_f}^T(t)]^T$ و $h_F(t) = [h_1^T(t) \quad h_2^T(t) \quad \dots \quad h_{N_f}^T(t)]^T$ باشد و ماتریس ورودی به صورت $U_E(t) = [u_{l,1}^T(t) \quad u_{l,2}^T(t) \quad \dots \quad u_{l,N_f}^T(t)]^T$ باشد. سیستم حلقه بسته (۱۵)، تحت کنترل کننده (۱۳) و (۱۸) به صورت زیر در می‌آید [۲۹].

$$\begin{cases} \dot{x}_F(t) = (I_{N_f} \otimes A + L_1 \otimes BK)x_F(t) + (I_{N_f} \otimes B)v_F(t) + (L_2 \otimes BK)x_E(t) - (L_1 \otimes BK)h_F(t) \\ \dot{x}_E(t) = (I_{N_l} \otimes A)x_E(t) + (I_{N_l} \otimes B)U_E(t) \end{cases} \quad (19)$$

فرض می‌کنیم که $U_F \in \mathbb{C}^{N_f \times N_f}$ یک ماتریس غیرمنفرد باشد، به طوری که $U_F^{-1}L_1U_F = J_F$ باشد. در این رابطه J_F فرم کانونیکال جردن L_1 با عناصر قطری $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, N_f)$ می‌باشد که مقادیر این عناصر به صورت $\text{Re}(\lambda_1) \leq \text{Re}(\lambda_2) \leq \dots \leq \text{Re}(\lambda_{N_f})$ هستند.

قضیه

سیستم چندعاملی با عامل‌های پیرو و پیشرو داده شده، با استفاده از ورودی کنترلی (۱۸) به صورت مجانبی به آرایش متغیر با زمان پیرو-پیشرو می‌رسد؛ اگر برای هر i ، ترم $A + \lambda_i BK$ هرویتز باشد و شرط دنبال‌یابی آرایش زیر برآورده شود:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\bar{B}Ah_i(t) - \bar{B}\dot{h}_i(t)) = 0 \quad (20)$$

توجه: اگر $\text{rank}(B) = m$ اگر $\bar{B} \in \mathbb{R}^{(n-m) \times n}$ و $\bar{B} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ با $T = [\bar{B}^T \quad \bar{B}^T]^T$ به طوری که $\bar{B}B = 0$ و $\bar{B}B = I_m$ می‌باشد.

اثبات پایداری

فرض می‌کنیم که $\theta_{f,i} = x_{f,i} - h_{f,i}$ و $\theta_F = [\theta_1^T(t) \quad \theta_2^T(t) \quad \dots \quad \theta_{N_f}^T(t)]^T$ باشد. آنگاه سیستم چندعاملی (۱۶) می‌تواند به فرم زیر تبدیل شود:

$$\dot{\theta}_F(t) = (I_{N_f} \otimes A + L_1 \otimes BK)\theta_F(t) + (L_2 \otimes BK)x_E(t) + (I_{N_f} \otimes B)v_F(t) + (I_{N_f} \otimes A)h_F(t) - (I_{N_f} \otimes I_n)\dot{h}_F(t) \quad (21)$$

$$\dot{x}_E(t) = (I_{N_l} \otimes A)x_E(t) + (I_{N_l} \otimes B)U_E(t) \quad (22)$$

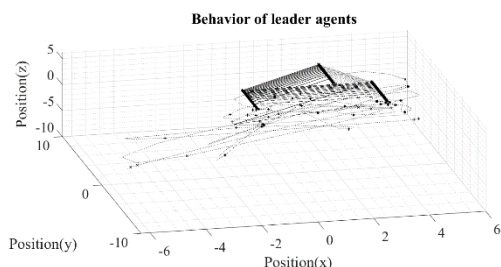
فرض می‌کنیم $\phi_F = [\phi_1^T(t) \quad \phi_2^T(t) \quad \dots \quad \phi_{N_f}^T(t)]^T$

¹ Nonsingular

۵- نتایج و شبیه سازی

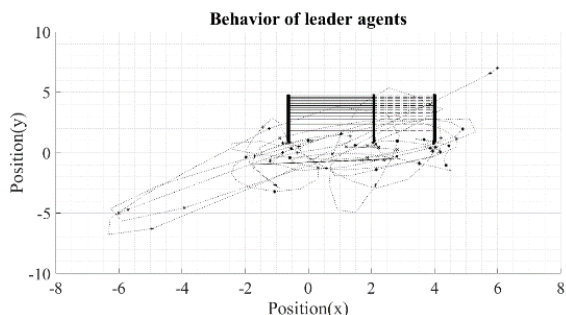
فرض می کنیم که سه وسیله پرنده پیشرو بر روی یک مثلث متساوی الاضلاع به ضلع ۵ و با راس های $(0,0,1 + \frac{5\sqrt{3}}{2})$ ، $(2.5,0,1)$ و $(-2.5,0,1)$ قرار دارند. برای شبیه سازی مسیر حرکت عامل های پیرو و پیشرو از نرم افزار متلب 2019a استفاده شده است.

همچنین فرض می کنیم که پیشروی مجازی بر روی مسیر $x(t) = 0, y(t) = \frac{t}{2}, z(t) = 50$ در حال حرکت باشد. شکل (۳) موقعیت های این سه وسیله پرنده پیشرو را نشان می دهد.

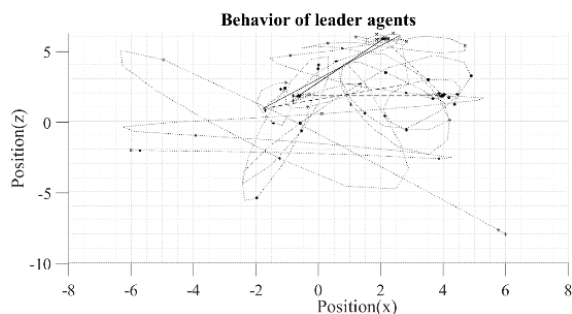


شکل (۳): موقعیت های سه وسیله پرنده پیشرو.

تصویر حرکت وسیله های پرنده پیشرو، بر روی محورهای مختصات مختلف در شکل های (۴)، (۵) و (۶) رسم شده است.



شکل (۴): تصویر موقعیت سه وسیله پرنده پیشرو در صفحه x-y.



شکل (۵): تصویر موقعیت سه وسیله پرنده پیشرو در صفحه x-z.

دارای حرکت گروهی نسبت به پیشروی مجازی هستند. تابع پتانسیل را به صورت $V(p) = \sum_{i,j \in N_l} (d_{ij}^2 - d_{ij}^{*2})^2$ در نظر می گیریم. حال اگر عامل های پیشرو دارای حرکت گروهی باشند، ترم های f_i^α, f_i^β و f_i^γ در زمان بی نهایت به سمت صفر همگرا می شوند. در نتیجه $\lim_{x \rightarrow \infty} U_E(t) = 0$ را داریم.

با توجه به ساختار J_F و طبق فرض قضیه؛ اگر $A + \lambda_i BK$ هرویتز باشد؛ آنگاه $I_{N_F} \otimes A + J_F \otimes BK$ نیز هرویتز است.

در نتیجه با توجه به اینکه $I_{N_F} \otimes A + J_F \otimes BK$ هرویتز است و همچنین با توجه به $\lim_{x \rightarrow \infty} U_E(t) = 0$ و رابطه (۳۱)، سیستم (۲۶) پایدار مجانبی می باشد. در نتیجه با توجه به اینکه U_F غیر منفرد است؛ داریم.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \phi_F(t) = 0 \quad (32)$$

در نتیجه با توجه به روابط (۲۳) و (۳۲) داریم.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_F(t) - h_F(t) - (-L_1^{-1} L_2 \otimes I_n) x_E(t)) = 0 \quad (33)$$

در نتیجه طبق لم ۲ در [۳۰] داریم.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_{f,i}(t) - h_{f,i}(t) - \sum_{r=1}^{N_l} (\frac{b_r}{\sum_{k=1}^{N_l} b_k} x_{l,r}(t))) = 0 \quad (34)$$

با توجه به اینکه کلیه عامل های پیرو موجود در هر گروه از یک پیشروی متناظر با همان گروه تبعیت می کنند؛ در نتیجه رابطه (۳۴) به صورت زیر ساده می شود.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_{f,i}(t) - h_{f,i}(t) - x_{l,r}(t)) = 0 \quad (35)$$

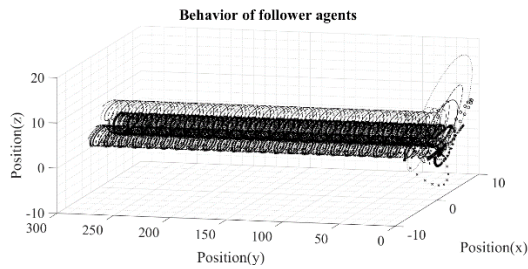
در نتیجه مفهوم رابطه (۳۵) این است که کلیه عامل های پیرو مربوط به هر گروه، دارای آرایش خاصی نسبت به همدیگر هستند و از پیشروی متناظر با همان گروه تبعیت می کنند.

همچنین ماتریس لاپلاسی متناظر با گراف شکل (۱)، به صورت رابطه (۲۱) می باشد. L_m مربوط به عامل های پیرو m_1 ، m_2 ، m_3 و ... می باشد. L_n مربوط به عامل های پیرو n_1 ، n_2 ، n_3 و ... می باشد. L_g مربوط به عامل های پیرو g_1 ، g_2 ، g_3 و ... می باشد.

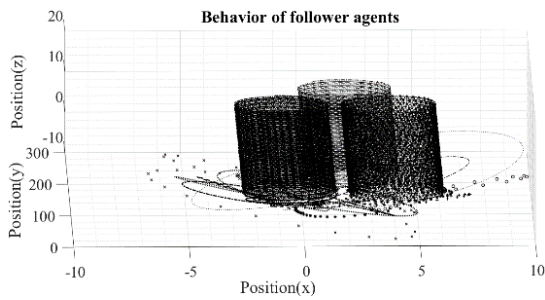
$$L = \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_g \end{bmatrix} \quad (36)$$

همچنین برای L3 به صورت $r = 2, \omega = 0.5$ که می باشد. شکل های (۸) و (۹) موقعیت عامل های پیرو را از دو زاویه دید متفاوت نشان می دهد.

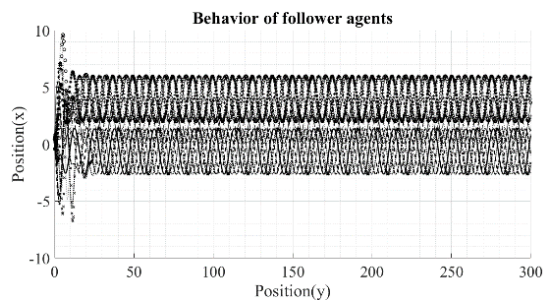
همچنین تصویر این حرکت بر روی محورهای مختصات مختلف در شکل های (۱۰)، (۱۲) و (۱۳) رسم شده است. برای وضوح بیشتر، بزرگ نمایی شده شکل های (۱۰) و (۱۳) به ترتیب در شکل های (۱۱) و (۱۴) نمایش داده شده است.



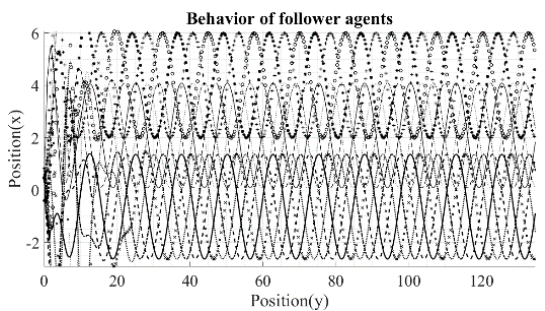
شکل (۸): موقعیت وسیله های پرنده پیرو از زاویه دید اول.



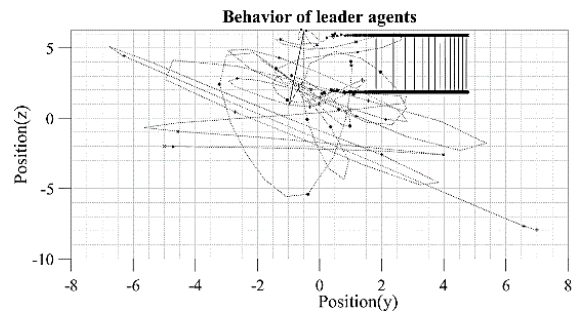
شکل (۹): موقعیت وسیله های پرنده پیرو از زاویه دید دوم.



شکل (۱۰): تصویر موقعیت وسیله های پرنده پیرو در صفحه y-x.

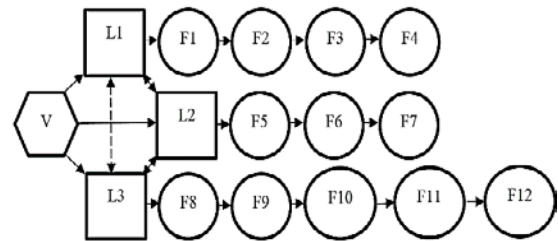


شکل (۱۱): بزرگ نمایی تصویر موقعیت وسیله های پرنده پیرو در صفحه y-x.



شکل (۶): تصویر موقعیت سه وسیله پرنده پیشرو در صفحه y-z.

گراف کلی سیستم چندعاملی همراه با چندین وسیله پرنده پیرو، چندین وسیله پرنده پیشروی واقعی و یک پیشروی مجازی را به صورت شکل (۷) در نظر می گیریم.



شکل (۷): گراف تعاملی بین عامل ها.

بردار آرایش پیروها را برای L1 به صورت در نظر می گیریم:

$$h_{i,1}(t) = \begin{bmatrix} r\cos(\omega t + (i-1)\frac{\pi}{4}) \\ -r\omega\sin(\omega t + (i-1)\frac{\pi}{4}) \\ t \\ r\sin(\omega t + (i-1)\frac{\pi}{4}) \\ r\omega\cos(\omega t + (i-1)\frac{\pi}{4}) \end{bmatrix} \quad (37)$$

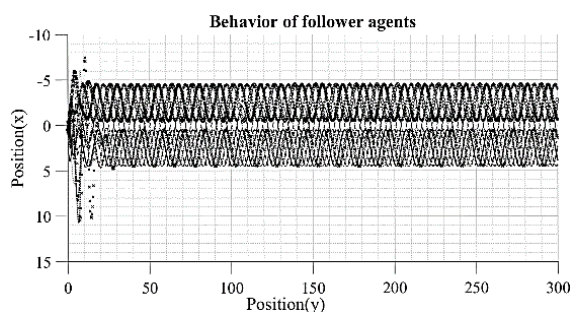
و برای L2 نیز به صورت زیر در نظر میگیریم:

$$h_{i,2}(t) = \begin{bmatrix} r\sin(\omega t + (i-1)\frac{\pi}{3}) \\ r\omega\cos(\omega t + (i-1)\frac{\pi}{3}) \\ t \\ r\cos(\omega t + (i-1)\frac{\pi}{3}) \\ -r\omega\sin(\omega t + (i-1)\frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (38)$$

و برای L3 نیز به صورت زیر در نظر میگیریم:

$$h_{i,3}(t) = \begin{bmatrix} r\cos(\omega t + (i-1)\frac{\pi}{5}) \\ -r\omega\sin(\omega t + (i-1)\frac{\pi}{5}) \\ t \\ r\sin(\omega t + (i-1)\frac{\pi}{5}) \\ r\omega\cos(\omega t + (i-1)\frac{\pi}{5}) \end{bmatrix} \quad (39)$$

در قسمت دوم فرض می‌کنیم یکی از سه پیشروی موجود در این سیستم در زمان ۱۰۰ ثانیه حذف می‌شود. حال رفتار ۱۲ عامل پیرو را پس از حذف یکی از پیشروها بررسی می‌کنیم. شکل (۱۶) شبیه‌سازی رفتار ۱۲ عامل پیرو و تصویر آن‌ها در صفحه $Y-X$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم، پس از حذف یکی از پیشروها رفتار عامل‌های پیرو در حین حرکت بر روی محور $Y-X$ هیچ تغییری نمی‌کند.



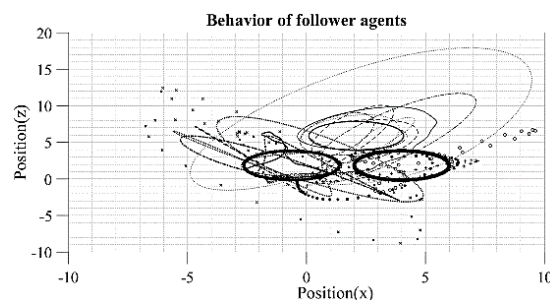
شکل (۱۶): تصویر موقعیت وسیله‌های پرنده پیرو در صفحه $Y-X$.

۶- نتیجه‌گیری

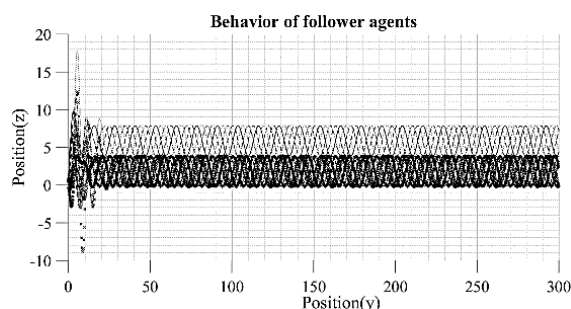
کنترل کننده آرایش پیشرو-پیرو مبتنی بر کنترل کننده حرکت گروهی پیشرو-پیرو تمامی اهداف موردنظر را برآورده می‌کند. در این کنترل کننده کافی است مسیر حرکت پیشروی مجازی را تعیین کنیم تا بسته‌های پستی به‌صورت صحیح به دست گیرنده‌ها برسند. وسیله‌های پرنده پیشرو مبتنی بر مسیر حرکت پیشروی مجازی، مسیر حرکت خود را تعیین می‌کنند. سپس وسیله‌های پرنده پیرو مبتنی بر مسیر حرکت وسیله پرنده پیشرو متناظر، مسیر حرکت خود را با آرایش خاصی نسبت به همدیگر تعیین می‌کنند. نتایج شبیه‌سازی، کارائی و درستی عملکرد این کنترل کننده را در حین حرکت نشان می‌دهد. همچنین با حذف یکی از عامل‌های پیرو یا پیشرو، در نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌کنیم، که هیچ اختلالی در حرکت بقیه عامل‌های پیرو و پیشرو ایجاد نمی‌شود و این کنترل کننده به‌خوبی می‌تواند بقیه عامل‌ها را تا رسیدن به مقصد کنترل کند.

۷- مراجع

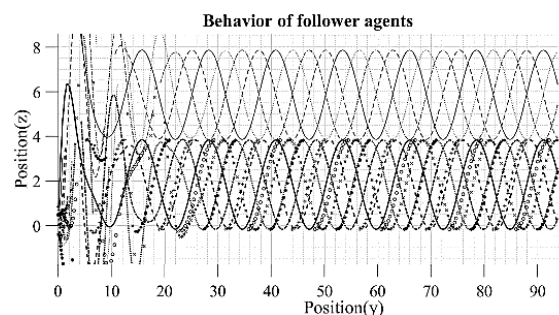
- [1] B. D. O. Anderson, C. Yu, B. Fidan, and J. M. Hendrickx, "Rigid graph control architectures for autonomous formations," *IEEE CONTR SYST MAG*, vol. 28, issue. 6, pp. 48-63, 2008.
- [2] R. Olfati-Saber, J. A. Fax, and R. M. Murray, "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems," *P IEEE*, vol. 95, issue. 1, pp. 215-233, 2007.



شکل (۱۲): تصویر موقعیت وسیله‌های پرنده پیرو در صفحه $X-Z$.



شکل (۱۳): تصویر موقعیت وسیله‌های پرنده پیرو در صفحه $Y-Z$.

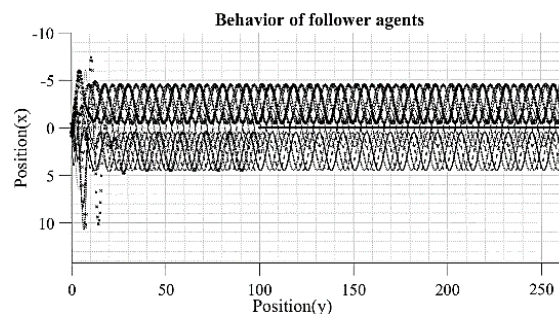


شکل (۱۴): بزرگنمایی تصویر موقعیت وسیله‌های پرنده

پیرو در صفحه $Y-Z$.

حال به بررسی حذف یکی از پیروها و سپس حذف یکی از پیروها می‌پردازیم.

در شبیه‌سازی قسمت اول فرض می‌کنیم که یکی از پیروها در زمان ۱۰۰ ثانیه حذف می‌شود. با توجه به اینکه ۱۲ پیرو داشتیم، حال باید رفتار ۱۱ پیرو باقی‌مانده را بررسی کنیم. شکل (۱۵) شبیه‌سازی رفتار ۱۱ عامل پیرو باقی‌مانده و تصویر آن‌ها را در صفحه $Y-X$ را نشان می‌دهد.



شکل (۱۵): تصویر موقعیت وسیله‌های پرنده پیرو در صفحه $Y-X$.

- strategies,” *AEROSP SCI TECHNOL*, vol. 70, pp. 257-264, 2017.
- [18] Y. Kwon, and J. Hwang, “Mathematical modeling for flocking flight of autonomous multi-UAV system, including environmental factors,” *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, vol. 14, no. 2, pp. 595-609, 2020.
- [19] M. Pazhouhi Gisavandani, A. Mahdloo Torkamani, P. Sorooshian, “Design and Implementation of Radar Tester Using SDR,” *Journal of “Innovations of Applied Information and Communication Technologies”*, vol. 1, no. 2, 2019. (In Persian).
- [20] S. Kim, and Y. Kim, “Optimum design of three-dimensional behavioural decentralized controller for UAV formation flight,” *ENG OPTIMIZ*, vol. 41, issue. 3, pp. 199-224, 2009.
- [21] R. Olfati-Saber, “Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory,” *IEEE T AUTOMAT CONTR*, vol. 51, issue. 3, pp. 401-420, 2006.
- [22] X. Dong, Q. Tan, Q. Li, and Z. Ren, “Necessary and sufficient conditions for average formation tracking of second-order multi-agent systems with multiple leaders,” *J FRANKLIN I*, vol. 354, issue. 2, pp. 611-626, 2017.
- [23] X. Dong, and G. Hu, “Time-varying formation tracking for linear multiagent systems with multiple leaders,” *IEEE T AUTOMAT CONTR*, vol. 62, issue. 7, pp. 3658-3664, 2017.
- [24] Y. Q. Chen, and Z. Wang, “Formation control: a review and a new consideration,” In *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3181-3186, 2005.
- [25] W. Ren, R. W. Beard, and E. M. Atkins, “A survey of consensus problems in multi-agent coordination,” In *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005*, pp. 1859-1864, 2005.
- [26] D. P. Scharf, F. Y. Hadaegh, and S. R. Ploen, “A survey of spacecraft formation flying guidance and control. part ii: control,” In *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, vol. 4, pp. 2976-2985, 2004.
- [27] O. Saif, I. Fantoni, and A. Zavala-Río, “Flocking of multiple unmanned aerial vehicles by lqr control,” In *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 222-228, 2014.
- [28] S. A. Quintero, G. E. Collins, and J. P. Hespanha, “Flocking with fixed-wing UAVs for distributed sensing: A stochastic optimal control approach,” In *2013 American Control Conference*, pp. 2025-2031, 2013.
- [29] Y. Jing, “Research on Multi-UAV Swarm Control Based on Olfati-Saber Algorithm with Variable Speed Virtual Leader,” In *International Conference on Internet of Things as a Service*, Springer, Cham, pp. 14-22, 2020.
- [30] S. Kim, and Y. Kim, “Three dimensional optimum controller for multiple UAV formation flight using behavior-based decentralized approach,” In *2007 International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1387-1392, 2007.
- [3] W. Ren, R. W. Beard, and E. M. Atkins, “Information consensus in multivehicle cooperative control,” *IEEE CONTR SYST MAG*, vol. 27, issue. 2, pp. 71-82, 2007.
- [4] D. Li, S. S. Ge, W. He, G. Ma, and L. Xie, “Multilayer formation control of multi-agent systems,” *Automatica*, vol. 109, 108558, 2019.
- [5] F. Mehdifar, C. P. Bechlioulis, F. Hashemzadeh, and M. Baradarannia, “Prescribed performance distance-based formation control of Multi-Agent Systems,” *Automatica*, vol. 119, 109086, 2020.
- [6] Q. Shi, T. Li, J. Li, C. P. Chen, Y. Xiao, and Q. Shan, “Adaptive leader-following formation control with collision avoidance for a class of second-order nonlinear multi-agent systems,” *Neurocomputing*, vol. 350, pp. 282-290, 2019.
- [7] F. Rekabi, F. A. Shirazi, and M. J. Sadigh, “Distributed nonlinear H_∞ control algorithm for multi-agent quadrotor formation flying,” *ISA T*, vol. 96, pp. 81-94, 220.
- [8] G. Wen, C. P. Chen, H. Dou, H. Yang, and C. Liu, “Formation control with obstacle avoidance of second-order multi-agent systems under directed communication topology,” *Science China Information Sciences*, vol. 62, 192205, 2019.
- [9] T. Li, Z. Li, S. Shen, and S. Fei, “Extended adaptive event-triggered formation tracking control of a class of multi-agent systems with time-varying delay,” *Neurocomputing*, vol. 316, pp. 386-398, 2018.
- [10] C. Viel, S. Bertrand, M. Kieffer, and H. Piet-Lahanier, “Distributed event-triggered control strategies for multi-agent formation stabilization and tracking,” *Automatica*, vol. 106, pp. 110-116, 2019.
- [11] L. He, P. Bai, X. Liang, J. Zhang, and W. Wang, “Feedback formation control of UAV swarm with multiple implicit leaders,” *AEROSP SCI TECHNOL*, vol. 72, pp. 327-334, 2018.
- [12] S. Chen, H. Pei, Q. Lai, and H. Yan, “Multitarget tracking control for coupled heterogeneous inertial agents systems based on flocking behavior,” *IEEE T SYST MAN CY A*, vol. 49, issue. 12, pp. 2605-2611, 2018.
- [13] W. Zhao, H. Chu, M. Zhang, T. Sun, and L. Guo, “Flocking control of fixed-wing UAVs with cooperative obstacle avoidance capability,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 17798-17808, 2019.
- [14] T. Z. Muslimov, and R. A. Munasyrov, “Adaptive decentralized flocking control of multi-UAV circular formations based on vector fields and backstepping,” *ISA T*, vol. 107, pp. 143-159, 2020.
- [15] H. Qiu, and H. Duan, “A multi-objective pigeon-inspired optimization approach to UAV distributed flocking among obstacles,” *INFORM SCIENCES*, vol. 509, pp. 515-529, 2020.
- [16] W. Liu, and Z. Gao, “A distributed flocking control strategy for UAV groups,” *COMPUT COMMUN*, vol. 153, pp. 95-101, 2020.
- [17] Q. Luo, and H. Duan, “Distributed UAV flocking control based on homing pigeon hierarchical

The Design of a Leader-Follower Formation Controller Based on Leader-Follower Flocking with a Virtual Leader for the Clusters of UAVs

V. Bagheri, S. H. Hoseini*

Supreme University and Research Institute of National Defense and Strategic Research

Abstract

The flocking of fish or birds can be modeled with multiagent systems. Likewise, their flocking behavior arises from three simple rules developed by Craig Reynolds, namely separation, alignment, and cohesion. This paper aims to design a controller to deliver postal packages of an area or district using a group of unmanned aerial vehicles (UAVs). To accomplish this task, consider multiple groups of UAVs with distinct leader-follower controllers using the formation control to deliver the postal packages to desired areas. In each group of UAV agents, there exists one leader and multiple follower agents, so the number of leader agents is equal to the number of existing groups. The communication between these groups is established by the group leaders. According to Reynolds rules, the flocking controller is a good choice to control the leaders' flight. In this research it is assumed that a virtual leader agent accompanies the proposed flocking controller. The leader UAV agents follow the virtual leader using the flocking controller and the entire system is managed by controlling this virtual agent. The advantages of the proposed method include low computational complexity, short computational time, high processing speed, small bandwidth, cost efficiency, and easy implementation. Simulation results show the proposed controller's fault tolerance ability in case a faulty follower-leader agent exists in the closed-loop system.

Keywords: Follower, Leader, Virtual leader, Formation, Reynolds rules, Flocking, Potential Function, Consensus.