



کنترل آرایش گروهی ربات‌های پرنده به روش کنترل پیش‌بین مقید ضمن ره‌گیری هدف متحرک با وجود موانع

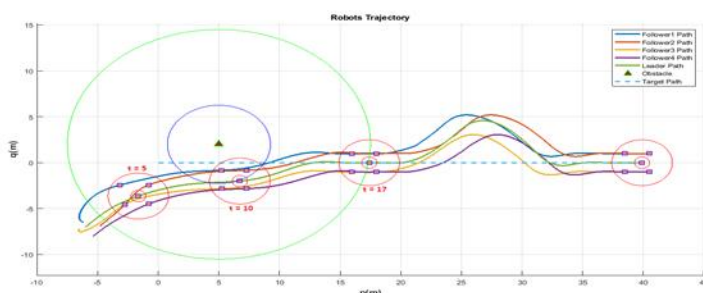
احمد نصیری^۱، عبدالرضا کاشانی‌نیا^{۲*}، احمدرضا ولی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

برجسته‌ها

- ره‌گیری هدف متحرک توسط گروهی از ربات‌های پرنده، ضمن کنترل آرایش گروه ارائه‌شده است.
- یک روش هندسی ابتکاری برای عبور از موانع و اعمال سیستماتیک آن در فرآیند کنترل، انجام گردیده است.

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:
 نوع مقاله: علمی پژوهشی
 دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱
 بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۴
 پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶
 ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶
 *نویسنده مسئول:
 akashaninia@mut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

کنترل آرایش
 کنترل پیش‌بین مدل مقید
 کنترل غیرمتمرکز
 ره‌گیری هدف متحرک

چکیده

در این مقاله، با بهره‌گیری از کنترل‌کننده پیش‌بین مقید، ره‌گیری یک هدف متحرک توسط گروهی از ربات‌های پرنده ضمن کنترل آرایش گروه ارائه‌شده است. حفظ و کنترل آرایش گروه بر مبنای کنترل موقعیت با فرض معماری غیرمتمرکز و ساختار ارتباطی رهبر-پیرو بین عوامل انجام گرفته است. ره‌گیری هدف توسط رهبر گروه انجام می‌پذیرد و پیروها وظیفه ره‌گیری رهبر گروه را بر عهده دارند. رهبر گروه، موقعیت فعلی و تخمین موقعیت خود در گام‌های بعدی را دائماً برای پیروها ارسال می‌کند تا با استفاده از آن، موقعیت مطلوب فعلی و لحظات بعدی را محاسبه نمایند. در ادامه، بازنویسی قیود مسئله از قبیل تضمین حفظ فاصله و عدم برخورد پیروها با رهبر گروه و محدودیت‌های ورودی‌ها و تغییرات آن‌ها بر روی تمام اعضای گروه و نیز ارائه یک روش هندسی ابتکاری برای عبور از موانع و اعمال سیستماتیک همگی آن‌ها در فرآیند کنترل، انجام گردیده است. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده برای یک گروه پنج‌تایی از ربات‌های پرنده که ضمن حفظ آرایش گروه به دنبال ره‌گیری یک هدف متحرک زمینی هستند، ارائه‌شده است. نتایج نشان می‌دهد کنترل‌کننده نسبت به اغتشاشات موجود در مسیر حرکت گروه مقاومت خوبی داشته و ره‌گیری گروهی به نحو مطلوبی انجام می‌گیرد. پیش‌بینی مسیر حرکت هدف متحرک و استفاده از آن در طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین نیز باعث بهبود و هموارتر شدن مسیر حرکت گروه می‌گردد.

۱- مقدمه

توزیع‌شده جهت بالانس و مانور چند ربات پرنده ارائه‌شده است. این روش با ترکیب یک کنترل پیش‌بین سریع با فرکانس ۵۰ هرتز طراحی‌شده است. کنترل موقعیت چندین UAV بر مبنای کنترل پیش‌بین توزیع‌شده در [۱۶] ارائه‌شده است. در این ساختار اطلاعات بین اعضای گروه به اشتراک گذاشته می‌شود. در [۱۷] روش جدیدی جهت مانور گروهی از پرنده‌ها با استفاده از تعریف رهبر مجازی برای عبور از موانع ارائه‌شده است.

در سال ۲۰۲۰ مقاله‌ای برای کنترل آرایش غیرمتمرکز چند ربات پرنده بر مبنای کنترل پیش‌بین ارائه شد که در آن سیستم کنترل شامل بخش‌های جلوگیری از برخورد با موانع و نیز جلوگیری از برخورد با یکدیگر است [۱۸]؛ الگوریتم عدم برخورد با مانع به‌عنوان بخشی مجزا از کنترل پیش‌بین ارائه‌شده است درحالی‌که در مقاله پیش رو، عدم برخورد با مانع را به‌صورت یک قید در کنترل پیش‌بین مقید آورده‌ایم. مقاله‌ی دیگری در ۲۰۲۰ با عنوان مطالعه جامع بر روی استراتژی‌های موجود در کنترل کوداهای خودمختار منتشر شد که در آن، کنترل‌کننده پیش‌بین را جزء دسته‌بندی کنترل‌کننده‌های هوشمند در کنار کنترل‌کننده‌های فازی و شبکه عصبی قرار داده است [۱۹]. در کنترل پیش‌بین توزیع‌شده، یکی از فعالیت‌هایی که می‌بایست انجام پذیرد، تخمین آینده سیستم توسط یک راهکار توزیع‌شده است. معمولاً اطلاعات فعلی همسایه‌ها در اختیار است و دسترسی به اطلاعات آینده همسایه‌ها وجود ندارد. در [۲۰-۲۳] کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز ارائه‌شده دارای دسترسی به اطلاعات همسایگان است. به‌طوری‌که عوامل اطلاعات تخمین زده خود را منتشر می‌کنند تا توسط راهکارهای توزیع‌شده پردازش شود و تخمین و بهینه‌سازی انجام پذیرد. این موضوع باعث می‌شود شبکه ارتباطی بسیار پرتراپیک باشد. این تراپیک با افزایش اعضای گروه به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. علاوه بر این وابستگی به شبکه ارتباطی بین اعضا نیز بسیار بالاست. راهکار دیگر بر مبنای فرض کردن ورودی ثابت برای همسایه‌ها است که در [۲۴، ۲۵] به‌طور کامل ارائه‌شده است. به‌طوری‌که می‌توان تخمین را به‌صورت غیرمتمرکز انجام داد. یک راهکار تحلیلی کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز جهت سیستم‌های خطی، در [۲۶] ارائه‌شده

امروزه به‌کارگیری ربات‌های پرنده (مولتی روتورها) به علت قیمت پایین، مانورپذیری بالا و راحتی در استفاده بسیار مرسوم شده است. برای انجام بسیاری از مأموریت‌ها استفاده از یک پرنده کافی نمی‌باشد و نیازمند به‌کارگیری تعدادی از این ربات‌های پرنده هستیم. در چنین مواردی، کنترل آرایش گروهی ربات‌ها برای انجام مأموریت بسیار حائز اهمیت است؛ از این رو توسعه الگوریتم‌هایی که امکان مدیریت عملکرد گروهی و کنترل سیستم‌ها به فرم جمعی را به وجود آوردند رشد چشمگیری داشته است. برای نمونه از کاربردهایی که امروزه نیازمند به‌کارگیری سامانه‌های چندعاملی هستند می‌توان به مأموریت‌های جستجو و نجات در سوانح طبیعی [۱-۳] حفظ و نگهداری منابع طبیعی [۴] اطفاء حریق‌های گسترده [۵] دیده‌بانی و مراقبت هوشمند [۶] کشاورزی هوشمند [۷]، خط تولیدهای هوشمند و انبارداری هوشمند [۸، ۹] شبکه‌های حمل‌ونقل هوشمند [۱۰] شبکه‌های بازرسی هوشمند و ... اشاره نمود.

روش‌های متنوعی برای کنترل آرایش ربات‌ها مطرح‌شده است. در [۱۱] با استفاده از یک PID کنترلر ساده به کنترل آرایش چندین ربات پرنده می‌پردازد. در [۱۲] کنترل آرایش غیرمتمرکز بر مبنای موقعیت با استفاده از کنترل‌کننده PID طراحی‌شده است. در این مقاله استراتژی کنترل بر مبنای فاصله برای چند پرنده جهت ره‌گیری یک هدف متحرک ارائه‌شده است. معماری گروهی غیرمتمرکز بوده که دارای حجم محاسباتی کم است. استفاده از کنترل پیش‌بین به علت وجود مزایای بسیار زیاد آن، در سال‌های اخیر در حل مسئله کنترل آرایش موردتوجه ویژه قرار گرفته است. یک کنترل پیش‌بین متمرکز با اندازه‌گیری موقعیت در [۱۳] ارائه‌شده است. بزرگ‌ترین مشکلی که در کنترل پیش‌بین متمرکز وجود دارد، حجم محاسباتی بسیار بالا و تمرکز تمام محاسبات در یک نقطه است. علاوه بر این با افزایش تعداد اعضا، حجم محاسبات به‌صورت نمایی افزایش خواهد یافت. در [۱۴] کنترل پیش‌بین متمرکز به کنترل پیش‌بین توزیع‌شده تغییر کرده و نتایج ارائه‌شده نمایانگر کاهش چشمگیر حجم محاسبات است. در [۱۵] یک روش کنترل

سیستم معمولاً بسیار پیچیده است و برای شروع طراحی کافی است، تخمینی از مدل اصلی در اختیار طراح قرار گیرد. در این مقاله به منظور کنترل آرایش گروهی ربات‌های پرنده، بر روی کنترل موقعیت آن‌ها تمرکز شده است. مدل دینامیکی شش درجه آزادی ربات پرنده مطابق مرجع [۲۷] به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{1}{m} (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) u_z \\ \ddot{y} &= \frac{1}{m} (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) u_z \\ \ddot{z} &= \frac{1}{m} (\cos \phi \cos \theta) u_z - g \\ \ddot{\phi} &= \frac{I_y - I_z}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi} + \frac{1}{I_x} u_\phi \\ \ddot{\theta} &= \frac{I_z - I_x}{I_z} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{1}{I_z} u_\theta \\ \ddot{\psi} &= \frac{I_x - I_y}{I_z} \dot{\phi} \dot{\theta} + \frac{1}{I_z} u_\psi \end{aligned} \quad (1)$$

در روابط فوق u_z کل نیروی برا (لیفت) وارد شده به ربات در راستای Z در دستگاه بدنی بوده و u_θ و u_ϕ و u_ψ گشتاور وارده به ربات پرنده به ترتیب در راستای θ و ϕ و ψ است. تراست F_i توسط هر یک از موتورهای ربات تولید شده که با محور چرخش موتور موازی می‌باشند. در زمان کارکرد، هر یک از موتورها گشتاور τ_i ایجاد می‌کنند. رابطه تراست و گشتاور به صورت زیر است [۲۷].

$$\begin{aligned} u_z &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ u_\theta &= l(F_1 - F_3) \\ u_\phi &= l(F_2 - F_4) \\ u_\psi &= \tau_1 + \tau_3 - \tau_2 - \tau_4 \end{aligned} \quad (2)$$

همان‌طور که اشاره شد، هدف اصلی این مقاله کنترل موقعیت به منظور کنترل آرایش گروه است. به همین منظور در این مقاله از مدلی با پیچیدگی کمتر استفاده شده است. مطابق مرجع [۲۸] رابطه (۱) به صورت زیر قابل بازنویسی است، در مدل مذکور فقط زاویه ψ در روابط دیده می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= K_1 u_{v_x} - K_2 v_x \\ \dot{v}_y &= K_3 u_{v_y} - K_4 v_y \\ \dot{z} &= K_5 u_z - K_6 z \\ \dot{\psi} &= K_7 u_\psi - K_8 \psi \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن v_x و v_y به ترتیب شتاب‌های خطی در دو راستای x ، y بدنی بوده و z شتاب خطی در راستای Z و ψ شتاب زاویه‌ای حول محور Z را نشان می‌دهد. پارامترهای K_1 تا K_8 ثابت‌هایی هستند که از شناسایی سیستم قابل‌دستیابی

است، که در آن تابع هزینه با فرض عدم‌تغییر در اطلاعات تخمین زده شده همسایه‌ها، تشکیل شده است. در واقع به جای اینکه تخمین ورودی همسایه‌ها در لحظات بعدی در شبکه، برای سایر اعضا ارسال شود، فقط ورودی همین لحظه برای سایر همسایه‌ها ارسال می‌شود و فرض می‌شود که ورودی در لحظات بعدی نیز همین مقدار خواهد بود. با این کار از بار ترافیکی شبکه ارتباطی کاسته خواهد شد ولی دقت تخمین آینده همسایه‌ها نیز کاهش خواهد یافت.

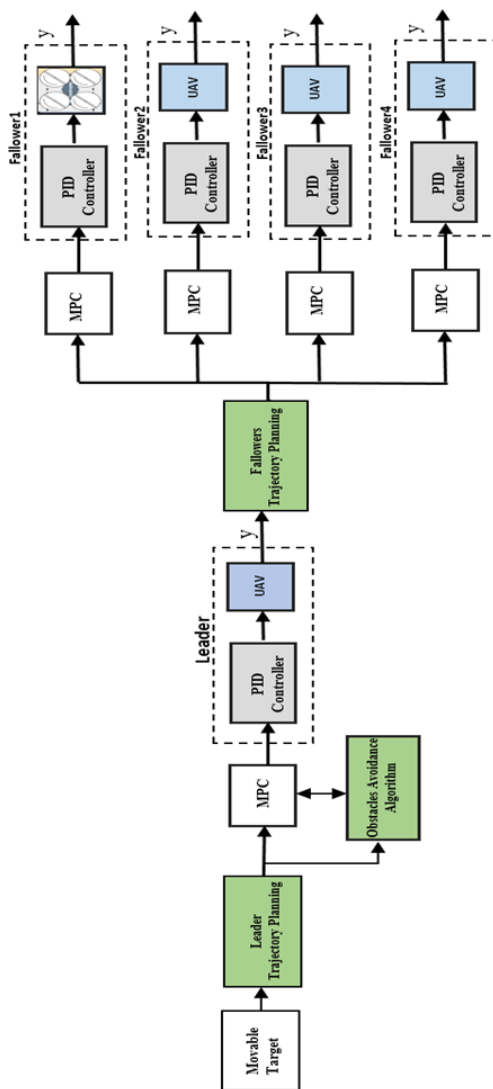
در این مقاله، ما یک کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز مقید برای کنترل آرایش ربات‌های پرنده همکار ارائه کرده‌ایم. کنترل آرایش به صورت غیرمتمرکز انجام شده و نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، ارائه شده است. یکی از مزایای اصلی این روش، عدم نیاز به اطلاعات ورودی و حالات همسایگان است که منجر به کاهش بار اطلاعات تبادل شده در شبکه ارتباطی خواهد شد. در این روش با توجه به اینکه از روش کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز مقید استفاده شده است، امکان پشتیبانی از قیود ورودی و قیود فاصله به منظور عدم برخورد با موانع به صورت سیستماتیک وجود دارد و قیود در بهینه‌سازی نتایج نیز مؤثر خواهند بود. عدم برخورد پروها با رهبر و با یکدیگر، توسط اعمال قید بر روی دواپر آبی و قرمز حول رهبر گروه و نیز تعریف تابع هزینه مناسب تضمین شده است و نتایج شبیه‌سازی نیز مؤید این موضوع است. یکی دیگر از مزایای این روش، امکان کنترل دقیق‌تر پاسخ‌گذرای سیستم در حین حرکت عوامل به علت ماهیت کنترل پیش‌بین است. در ادامه، مدل‌سازی دینامیکی و مقدمات مسئله در بخش دوم ارائه شده است. طراحی سیستم کنترل و قیود مسئله در بخش سوم تبیین شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها و مقایسه روش‌ها در بخش چهارم نمایش داده شده و در بخش پنجم نیز جمع‌بندی مطالب ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی دینامیکی و مقدمات مسئله

یکی از مهم‌ترین مراحل جهت طراحی سیستم کنترل هر سامانه، استخراج مدل دینامیکی سیستم است. این مدل هرچقدر دقیق‌تر باشد، سیستم کنترلی طراحی شده برای سیستم واقعی بی‌نقص‌تر خواهد کرد. استخراج مدل دقیق

موقعیت در صفحه در نظر گرفته شده است. حرکت دسته‌جمعی گروه‌های بزرگ می‌تواند با استفاده از چند قاعده ساده که بر رفتار اعضای گروه تأثیر می‌گذارد، بیان شود. حرکات فردی در یک گروه نتیجه تعادل دو رفتار مخالف است؛ تمایل به پیوستن به گروه و تمایل برای جلوگیری از برخورد با اعضاء دیگر. قواعد رینولدز به صورت خلاصه عبارت‌اند از [۲۹]:

- (۱) اجتناب از برخورد: اجتناب از برخورد هر عضو با همسایگان
- (۲) تطابق سرعت: تطبیق سرعت و جهت حرکت با همسایگان
- (۳) تمرکز گروه: باقی ماندن نزدیک به همسایگان



شکل (۱): بلوک دیاگرام سیستم کنترل گروه ربات.

می‌باشد. u_{ψ} و u_z سیگنال‌های کنترلی هستند. این یک مدل کامل از دینامیک پرنده نیست، اما تأثیرات سیگنال‌های کنترلی سطح بالا در مانورها را مدل می‌کند. در این مقاله پرنده‌ها در صفحه شبیه‌سازی شده‌اند و ورودی کنترلی برای کانال سمت صفر در نظر گرفته شده است و فقط موقعیت x و y کنترل خواهند شد. در نتیجه با ساده‌سازی معادلات فوق، مدل دینامیکی پرنده‌ها به صورت زیر استخراج خواهند شد.

$$\dot{v}_x = K_1 u_{v_x} - K_2 v_x \quad (4)$$

$$\dot{v}_y = K_3 u_{v_y} - K_4 v_y$$

که در آن مقدار پارامترها به صورت $K_1 = K_3 = 1$ ، $K_2 = K_4 = 0$ در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به روابط بالا، روابط به صورت زیر قابل استخراج است.

$$\dot{x} = v_x$$

$$\dot{y} = v_y$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{v_x} \\ u_{v_y} \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

بنابراین حالت گسسته دینامیک پرنده در هر یک از کانال‌های x و y به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i(k) + hv_i(k) + \frac{1}{2}h^2u_i(k) \\ v_i(k+1) &= v_i(k) + hu_i(k), \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (6)$$

به طوری که $v_i \in R^n$ و $x_i \in R^n$ حالات سیستم هستند؛ $u_i \in R^n$ ورودی کنترلی از جنس شتاب و k نشان دهنده هر گام زمانی است؛ h نماد زمان نمونه‌برداری بوده و N نیز تعداد عوامل گروه را نشان می‌دهد. این سیستم از گسسته سازی سیستم مرتبه دوم به روش ZOH به دست آمده است. از آنجایی که بسیاری از ربات‌های پرنده امروزی به صورت تجاری در اختیار همگان قرار دارد و سیستم‌های کنترل پرواز کارآمدی برای آن‌ها طراحی و ساخته شده است، در این مقاله، برای هر ربات پرنده یک کنترل کننده داخلی در نظر گرفته شده است؛ به طوری که هر ربات به همراه کنترل کننده داخلی آن، یک سیستم فرض شده است. با فرض چندعاملی بودن سیستم و در نظر گرفتن هر یک از عوامل (پرنده‌ها) به همراه کنترل کننده داخلی آنکه به عنوان سیستم در شکل ۱ مشخص شده است، با دینامیک مرتبه دوم، مدل هر یک از ربات‌های پرنده در این مقاله به صورت دو درجه آزادی

اعضاء می‌بایست ضمن دنبال نمودن رهبر گروه، مقاومت در برابر باد و سایر عوامل اغتشاشی و نیز مراقبت از برخورد با سایر اعضا، موقعیت خود نسبت به رهبر و نیز سایر اعضای گروه را حفظ نمایند. به منظور حداقل نمودن ارتباطات در شبکه و کاهش حساسیت به آن، ارتباط دائم فقط بین رهبر و دنبال کننده‌ها فرض شده و ارتباط موردی نیز بین دنبال کننده‌ها با رهبر برقرار است. نمایش و مدل‌سازی یک گروه از عوامل مرتبط با یکدیگر و ساختار ارتباطی بین اعضای گروه معمولاً با یک گراف مدل‌سازی می‌شود. در این مقاله، ساختار شبکه به صورت رهبر-پیرو متصل فرض شده و با ماتریس مجاورت غیر جهت‌دار A نشان داده شده است. ما مسئله را با یک رهبر و چهار عامل به عنوان پیرو دنبال خواهیم نمود. لذا خواهیم داشت:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

و

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

که در آن، A ماتریس مجاورت و D ماتریس درجه است. بنابراین ماتریس لاپلاسین محاسبه خواهد شد.

$$\mathcal{L} = D - A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

همان‌طور که انتظار می‌رود، مقدار ویژه دوم ماتریس لاپلاسین یا Fiedler Eigenvalue بزرگ‌تر از صفر است که نشان‌دهنده متصل بودن کل شبکه است.

$$\lambda_2(\mathcal{L}) > 0 \Rightarrow \text{Network is connected} \quad (11)$$

در قواعد رینولدز یک دایره به شعاع ρ_c تعریف می‌شود که هر عضو تلاش می‌کند در این شعاع از هیچ عضوی قرار نگیرد. در اینجا تعریفی با عنوان همسایگی برخورد به صورت $N_i^c = \{j: r_{ij} \leq \rho_c\}$ ارائه می‌شود. به طوری که فاصله بین عامل i و j به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_{ij} = |x_j - x_i| = \sqrt{(p_j - p_i)^2 + (q_j - q_i)^2} \quad (7)$$

به این پروتکل‌های کنترلی اصطلاحاً پروتکل‌های تصمیم‌گیری محلی گویند. در این پروتکل‌ها هر عامل تلاش می‌کند تا با استفاده از اطلاعات محلی خود نسبت به همسایه‌ها با توجه به توپولوژی مخابراتی تعریف‌شده، برای حرکت خود تصمیم‌گیری نماید.

در معماری سیستم‌های چندعاملی سه رویکرد متفاوت وجود دارد، معماری متمرکز که در آن پردازش‌های مربوط به الگوریتم، روی یک عضو مجموعه (یک پردازنده مرکزی) انجام می‌گیرد و ارتباطات بین اجزاء الگوریتم الزاماً در یک فضای حافظه مشترک صورت می‌پذیرد. نوع دیگر این معماری، معماری توزیع‌شده است که سیستم پردازشی شامل اعضای می‌شود که به صورت توزیع‌شده وظیفه اجرای ماژول‌های محاسباتی را به عهده داشته و امکان برقراری ارتباط با یکدیگر و انتقال داده‌ها بین اعضا وجود خواهد داشت. مهم‌ترین مسئله‌ای که در پیاده‌سازی معماری توزیع‌شده وجود دارد دسترسی به یک شبکه مطمئن انتقال داده بین ماژول‌های محاسباتی است.

در شرایطی که قابلیت اطمینان شبکه پائین باشد و امکان انجام الگوریتم به صورت ماژول‌های محاسباتی نسبتاً مستقل با نیاز به انتقال داده‌های موضعی و در حجم پائین وجود داشته باشد، از معماری غیرمتمرکز استفاده می‌شود [۳۰]. در این مقاله معماری کنترل آرایش غیرمتمرکز به علت مزایای بسیار از جمله عدم وابستگی زیاد به شبکه ارتباطی، قابلیت گسترش شبکه، حجم بار ارتباطی کم و نیز کاربرد آن در پروژه‌های عملی، انتخاب شده است.

شکل ۲ ساختار گروه ربات‌های پرنده که شامل یک رهبر و چهار پیرو است را نشان می‌دهد. رهبر گروه وظیفه دارد با دریافت اطلاعات حسگرهای خود و نیز سایر اعضای گروه، مسیر مناسب را برای حرکت کل گروه تعیین نماید. سایر

با توجه به چالش‌هایی مانند ضرورت اعمال قیود در روال طراحی کنترل‌کننده به‌صورت سیستماتیک، محدودیت در زمان پاسخ‌دهی کنترل‌کننده (به دلیل زمان واقعی بودن حل مسئله) و مقاوم بودن در مقابل اغتشاشات، کنترل پیش‌بین مقید به‌عنوان رویکردی مناسب و پاسخگو، انتخاب شده است. از آنجاکه این موارد در پیاده‌سازی عملی بسیار حائز اهمیت است، نتایج این روش در فرآیند پیاده‌سازی بسیار کاربردی خواهد بود. این کنترل‌کننده عدم قطعیت‌های سیستم را پوشش داده و دارای استراتژی مناسب جهت بهینه‌سازی تابع هزینه می‌باشد [۲۷].

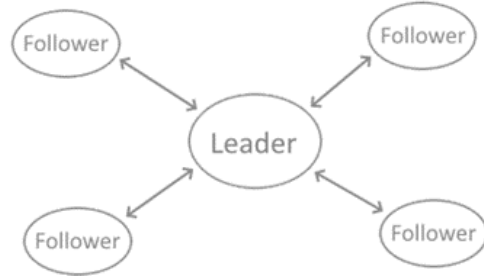
۳-۱- کنترل پیش‌بین مقید

در این مقاله طراحی کنترل پیش‌بین بر مبنای فضای حالت زمان گسسته سیستم حل خواهد شد. ابتدا مسئله را بدون قید در نظر می‌گیریم و حل آن را پیش خواهیم برد، سپس با فرض وجود قیود در مسئله، راه‌حل مقتضی را ارائه می‌نماییم. سیستم زمان گسسته (۱) را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی نمود.

$$\xi_i(k+1) = A\xi_i(k) + Bu_i(k), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

$$y(k) = C\xi_i(k) + D$$

به‌طوری‌که $\xi_i(k) \triangleq [x_i(k), v_i(k)]^T$ متغیر حالت سیستم است و شامل موقعیت و سرعت هر عامل می‌باشد و $A = \begin{bmatrix} I_n & hI_n \\ 0 & I_n \end{bmatrix}$ و $B = \begin{bmatrix} \frac{h^2}{2}I_n \\ hI_n \end{bmatrix}$ و I_n نشان‌دهنده ماتریس واحد با ابعاد n است. همچنین $y(k)$ خروجی سیستم و ماتریس‌های C و D بر مبنای خروجی تعریف می‌شوند. در این مقاله فرض شده است که خروجی کنترلی متغیرهای حالت می‌باشند و در نتیجه $C = I_n$ و $D = 0$ است. در این مقاله هر یک از ربات‌ها به‌صورت دو درجه آزادی مانند معادله (۵) در نظر گرفته شده‌اند و در نتیجه طراحی کنترل‌کننده در دو کانال مستقل برای هر یک از ربات‌ها، انجام خواهد شد. از آنجاکه استفاده از سیستم آگمنت شده در کنترل پیش‌بین دارای محبوبیت زیادی است و در اغلب مراجع نیز کنترل‌کننده برای سیستم آگمنت شده طراحی می‌شود، لذا سیستم را با روش اول



شکل (۲): ساختار گروه رهبر-پیرو.

۳- طراحی سیستم کنترل

با توجه به شکل ۱ هر ربات به همراه کنترل‌کننده آن به‌عنوان یک سیستم در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله به دنبال کنترل یک ربات پرنده نیستیم، بلکه هدف، کنترل آرایش گروه و ره‌گیری هدف متحرک توسط آن‌هاست. در طراحی سیستم کنترل دو هدف دنبال خواهد شد:

(۱) ره‌گیری مناسب هدف توسط گروه

(۲) حفظ آرایش گروه با توجه به قیود طراحی شده

تمامی وظایفی که در ره‌گیری هدف وجود دارد مانند عبور از مانع، طراحی مسیر مناسب و ... بر عهده رهبر خواهد بود. از طرف دیگر کنترل آرایش گروه به عهده تمام ربات‌ها بوده و به‌صورت غیرمتمرکز انجام می‌شود. برای این منظور، ربات‌های پیرو وظیفه حفظ موقعیت خود نسبت به رهبر گروه ضمن ارضای قیود را به عهده‌دارند.

آرایش اولیه‌ی گروه و حفظ موقعیت اولیه پیروها نسبت به هم و نسبت به رهبر گروه بسیار حائز اهمیت است. از این‌رو رهبر گروه در ابتدای شکل‌گیری گروه، به پیروها فرصت ایجاد آرایش اولیه را خواهد داد. در نتیجه موقعیت اولیه عوامل به‌عنوان آرایش اولیه در نظر گرفته شده و با r_i مشخص شده و سرعت اولیه آن‌ها نیز صفر فرض شده است، لذا در شرایط اولیه $\dot{r}_i = 0$ خواهد بود.

برای طی مسیر حرکت، رهبر گروه موقعیت خود را با توجه به قیود مسیر نسبت به هدف متحرک تنظیم کرده و دائماً موقعیت خود و نیز پیش‌بینی موقعیت خود در گام‌های بعدی را برای سایر اعضا ارسال می‌کند. هر عامل با دریافت این اطلاعات و نیز در اختیار داشتن موقعیت خود به دنبال ایجاد آرایش مطلوب خواهد بود.

مطلوب برای پیروها از پیش‌بینی مسیر رهبر گروه به‌دست‌آمده است.

از آنجا که هدف اصلی کنترل پیش‌بین، یافتن ورودی کنترلی مطلوب است، به‌طوری‌که تابع هزینه (هدف) موردنظر را حداقل نماید، بنابراین لازم است تابع هزینه کاملاً دقیق تعیین گردد. در برخی مقالات مانند مقاله [۳۲]، قیود مسئله به‌عنوان بخشی از تابع هزینه در نظر گرفته شده است. اعمال قیود در تابع هزینه باعث عدم ارضای به‌موقع قیود شده و تعداد قیود نیز محدود خواهد بود. مطابق [۳۱]، در این مقاله تابع هزینه بدون قید به‌صورت زیر تعریف می‌شود؛ که شامل دو بخش است. بخش اول به‌منظور حداقل نمودن خطای سیستم و بخش دوم برای حداقل نمودن تلاش کنترلی است.

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (21)$$

در این رابطه، $\bar{R} = I_{N_C \times N_C}$ است. با مشتق‌گیری از تابع فوق نسبت به ΔU و صفر قرار دادن آن، مقدار بهینه محاسبه شده برابر است با:

$$\Delta U = (\phi^T \phi + \bar{R})^{-1} \phi^T (R_s - f \xi_i(k)) \quad (22)$$

باید دقت نمود که ΔU فوق در حالت بدون قید، بهینه است. با توجه به اینکه تقریباً در تمام سامانه‌های واقعی حل مسئله بدون در نظر گرفتن قیود، در عمل قابل پیاده‌سازی نخواهد بود؛ لذا بهره‌گیری از یک روش کنترلی که قابلیت اعمال قیود را دارا باشد، بسیار حائز اهمیت است. برخورد سیستماتیک با قیود به معنی اعمال آن‌ها در طی روال حل مسئله است. به‌بیان‌دیگر، اثر قیود در تابع هزینه و روال بهینه‌سازی دیده می‌شود. از این‌رو با بازنگری در تابع هزینه و اعمال قیود در آن، به تابع هزینه جدیدی دست خواهیم یافت. برای بهینه‌سازی این تابع هزینه نمی‌توان از روش مشتق‌گیری و روش‌های کلاسیک بهره برد. با توجه به پیچیدگی مسئله و حجم بالای محاسبات، معمولاً روش‌های بهینه‌سازی عددی کارساز خواهند بود. بعد از اعمال قیود به تابع هزینه، مسئله ما به فرم زیر خواهد بود:

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (23)$$

, s. t. $M \Delta U < \gamma$

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، تشکیل تابع هزینه و قیود مسئله، در راستای کمی‌سازی قواعد رینولدز هستند. در اینجا، هم‌سرعت و هم‌جهت شدن حرکت اعضای گروه با

ارائه‌شده در مرجع [۳۱] آگمنت نموده‌ایم. سیستم آگمنت شده را می‌توان به‌صورت زیر تعریف نمود.

$$\begin{bmatrix} \Delta \xi_i(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ CA & I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \xi_i(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ CB \end{bmatrix} \Delta U \quad (13)$$

$$\rho(k) = \begin{bmatrix} 0 & I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \xi_i(k) \\ y(k) \end{bmatrix}$$

بنابراین، از این‌پس، منظور از A ، B و C همان سیستم آگمنت شده است. با توجه به رابطه فوق، جهت تخمین ورودی کنترلی می‌بایست روابط تخمین حالت و ورودی را دنبال نماییم، لذا داریم:

$$\begin{aligned} \xi_i(k + \tau + 1|k) &= A \xi_i(k + \tau|k) \\ &+ B \Delta u_i(k + \tau|k), \end{aligned} \quad (14)$$

$\tau = 0, 1, 2, \dots, N_C - 1$

که در آن N_C افق کنترل، $\xi_i(k + \tau|k)$ و $\Delta u_i(k + \tau|k)$ به ترتیب تخمین حالات و ورودی عامل i ام مربوط به گام $k + \tau$ در گام k می‌باشد. با توجه به تئوری کلاسیک مربوط به کنترل پیش‌بین که در [۳۱] نیز به آن اشاره شده، معادله تخمین برای عامل i ام به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$Y_i(k) = f \xi_i(k) + \phi \Delta U_i(k) \quad (15)$$

که در آن

$$Y_i(k) \triangleq [\xi_i(k+1|k), \xi_i(k+2|k), \dots, \xi_i(k+N_p|k)]^T \quad (16)$$

و N_p نشان‌دهنده افق پیش‌بینی خواهد بود و نیز

$$\Delta U_i(k) \triangleq [\Delta U_i(k), U_i(k+1|k), \dots, \xi_i(k+N_c-1|k)]^T \quad (17)$$

و همچنین داریم:

$$f = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (19)$$

همان‌طور که اشاره شد در روابط فوق A, B, C همان سیستم آگمنت شده است. با فرض اینکه خروجی مطلوب در گام $k+i$ ام، $r(k+i)$ باشد، داریم:

$$R_s = [r(k) \quad r(k+1) \quad \dots \quad r(k+N_p)]^T \quad (20)$$

که ابعاد ماتریس R_s ، $N_p * 1$ است. یکی از کاربردهای کنترل پیش‌بین استفاده از پیش‌بینی مسیر در تولید خروجی مطلوب در گام k ام می‌باشد. در این مقاله خروجی

تعریف قیود با توجه به سیستم موردنظر و شرایط محیطی سیستم انجام خواهد شد. با توجه به قیودی که در این مقاله تعریف شده است پارامترهای تعریف شده به صورت جدول ۱ است.

همان‌طور که در رابطه (۲۴) اشاره شد، تمام قیود می‌بایست به صورت $M\Delta U < \gamma$ بازنویسی شوند. در ادامه، قیود مختلفی معرفی شده‌اند که نهایتاً ماتریس M و γ از آن‌ها استخراج شده و در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به میزان توان موتور ربات پرنده، قید بر روی ورودی کنترلی آن باید در نظر گرفته شود که برای همه‌ی عوامل به صورت زیر تعریف می‌شود. همه‌ی این قیود باید به صورت نامساوی مطابق رابطه زیر تعریف شوند.

$$\begin{aligned} -u_{limit} &< u_k \\ &< u_{limit} \\ \rightarrow -u_{limit} & \end{aligned} \quad (27)$$

$-u_{k-1} < \Delta u_k$
 $< u_{limit} - u_{k-1}$
 از رابطه فوق دو قید به صورت مجزا به فرم استاندارد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$[1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \Delta u_{k+3} \end{bmatrix} < u_{limit} - u_{k-1} \quad (28)$$

$$[-1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \Delta u_{k+3} \end{bmatrix} < u_{limit} + u_{k-1} \quad (29)$$

تغییرات ورودی کنترلی اعمال شده به سیستم، با توجه به نوع موتور، دارای محدودیت می‌باشد و این قید برای همه عوامل به صورت زیر قابل تعریف است:

$$-Du_{limit} < \Delta u_k < Du_{limit} \quad (30)$$

از این رابطه، دو قید به صورت مجزا به فرم استاندارد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$[1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \Delta u_{k+3} \end{bmatrix} < Du_{limit} \quad (31)$$

$$[-1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \Delta u_{k+3} \end{bmatrix} < -Du_{limit} \quad (32)$$

جدول (۱): قیود مسئله

u_k	ورودی کنترلی مرحله k
-------	------------------------

بخش اول تابع هزینه تأمین می‌شود و تضمین عدم نزدیک شدن و دور شدن زیاد عناصر گروه، در بخش قیود اعمال شده است. بخش دوم تابع هزینه نیز وظیفه حداقل نمودن تلاش کنترلی را دارد. به منظور حداقل نمودن تابع هزینه خواهیم داشت.

$$\min J(x) = \frac{1}{2} \Delta U^T E x + \Delta U^T F \quad (24)$$

$, s. t. : M\Delta U < \gamma$

که در آن

$$\begin{aligned} F &= H^T (R_s - f \xi_i(k)) \\ E &= H^T H + \lambda I \end{aligned} \quad (25)$$

حل مسئله QP به روش برنامه‌ریزی مربعی هیلدرت که الگوریتمی برای حل مسئله به روش دوگان است، انجام خواهد شد. در این الگوریتم جهت حرکت در راستای بردارهای پایه از فضای n بعدی است. سپس بردارهای λ در هر زمان، یکی از عواملش تغییر کرده و در راستای یکی از بردارهای پایه پیش می‌رود. الگوریتم هیلدرت بر مبنای جستجوی عنصر به عنصر است، بنابراین نیازی به معکوس سازی ماتریس ندارد. در نتیجه اگر قیود فعال، مستقل خطی باشند و تعداد آن‌ها کمتر یا مساوی تعداد متغیرهای تصمیم باشد، متغیر دوگان همگرا خواهد شد. اگر حالتی به وجود آید که قیود باهم تضاد داشته باشند، الگوریتم امکان مصالحه داشته و جواب نزدیک بهینه به دست خواهد آمد. این نکته از نقاط قوت این الگوریتم در کاربردهای بلادرنگ است؛ زیرا توانایی یک الگوریتم بهینه‌سازی برای اینکه به‌طور خودکار از مسئله مقید دارای حالت بحرانی نامطلوب رهایی یابد، جهت ایمنی عملکرد سیستم ضروری است. پس از به‌کارگیری الگوریتم هیلدرت، λ بهینه به دست خواهد آمد. سپس مطابق رابطه زیر مقدار Δu بهینه محاسبه خواهد شد:

$$\Delta u_{opt} = -E^{-1}F - E^{-1}M^T \lambda_{opt} \quad (26)$$

درواقع، بخش $-E^{-1}F$ ، جواب مسئله بدون در نظر گرفتن قیود بوده و بخش $E^{-1}M^T \lambda_{opt}$ ، نشان‌دهنده اثر قیود در پاسخ بهینه مسئله است.

۲-۳- تعریف قیود مسئله

$$fence_{inner} + Y_l - CAX$$

استفاده از کنترل پیش‌بین این امکان را برای طراح فراهم می‌کند تا بتواند محدوده تأثیر قیود را تعیین نماید. با توجه به اینکه در این مقاله افق کنترل، چهار فرض شده است، لذا محدودیت‌ها می‌توانند بر روی ورودی‌های گام‌های بعدی اعمال شوند. محدودیت ورودی کنترلی برای گام بعدی، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$-u_{limit} < u_{k+1} < u_{limit} \quad (36)$$

با توجه به رابطه فوق و بازنویسی آن به فرم استاندارد، دو قید به صورت زیر نوشته خواهند شد:

$$[0 \ 1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \Delta u_{k+3} \end{bmatrix} < u_{limit} - u_k \quad (37)$$

$$[0 \ -1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \Delta u_{k+3} \end{bmatrix} < u_{limit} + u_k \quad (38)$$

به همین ترتیب، قید پیش‌بین برای تغییرات ورودی کنترلی برای گام بعدی، به صورت زیر خواهد بود:

$$-Du_{limit} < \Delta u_{k+1} < Du_{limit} \quad (39)$$

با توجه به رابطه فوق و بازنویسی آن به فرم استاندارد، دو قید به صورت زیر نوشته خواهند شد:

$$[0 \ 1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \Delta u_{k+3} \end{bmatrix} < Du_{limit} \quad (40)$$

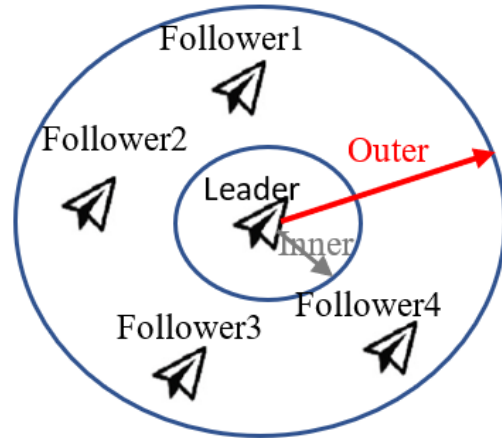
$$[0 \ -1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \Delta u_{k+3} \end{bmatrix} < Du_{limit} \quad (41)$$

پیش‌ازاین، قید حفظ فاصله مناسب پیروها از رهبر گروه ارائه شد. اکنون قید فاصله بیرونی برای پیش‌بینی خروجی در گام‌های بعدی ارائه خواهد شد. تعیین محدودیت بر روی پیش‌بینی خروجی در گام‌های بعدی، باعث خواهد شد که رفتار سیستم آرام‌تر شده و در واقع با آینده‌نگری خروجی در لحظات بعدی و بررسی قیود در لحظات بعد، از اعمال ورودی‌های پله‌ای و تیز جلوگیری شود. در رابطه زیر، قید فاصله بیرونی، برای پیش‌بینی خروجی در سه گام بعدی ارائه شده است:

$$|Y_{i_{k+3}} - Y_{l_{k+3}}| < fence_{outer} \Rightarrow CA^4X + CA^2B\Delta U_k + CAB\Delta U_{k+1} + CB\Delta U_{k+2} - Y_{l+3} < fence_{outer} \quad (42)$$

u_{k+1}	ورودی کنترلی مرحله (k+1) ام
u_{limit}	بیشینه مقدار ورودی کنترلی
Δu_k	تغییرات ورودی کنترلی مرحله k ام
Δu_{k+1}	(تغییرات) ورودی کنترلی مرحله (k+i) ام
Δu_{limit}	بیشینه مقدار تغییرات ورودی کنترلی
y_i	موقعیت پیرو i ام
y_l	موقعیت رهبر
$fence_{outer}$	شعاع حلقه بیرونی
$fence_{inner}$	شعاع حلقه درونی

با توجه به اینکه حفظ فاصله مناسب پیروها از رهبر بر عهده‌ی هر یک از پیروها خواهد بود، این فاصله با دو قید به صورت حلقه درونی و بیرونی که در شکل ۳ نشان داده شده است، تضمین می‌گردد.



شکل (۳): حدود مجاز حلقه‌های درونی و بیرونی پیروها.

با توجه به شکل ۳ پیروها باید بین این دو حلقه قرار گیرند که در نتیجه‌ی آن، قید پیروها برای تجاوز نکردن از حلقه بیرونی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$|Y_i - Y_l| < fence_{outer} \quad (33)$$

با استفاده از این رابطه خواهیم داشت:

$$CAX + CB\Delta U - Y_l < fence_{outer} \Rightarrow CB\Delta U < fence_{outer} + Y_l - CAX \quad (34)$$

و به همین ترتیب قید پیروها برای جلوگیری از وارد شدن به حلقه درونی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$|Y_i - Y_l| > fence_{inner} \Rightarrow CB\Delta U > \quad (35)$$

امن برای مانع در نظر گرفته شده است و گروه

باید خارج از حلقه‌ی امن از مانع عبور کنند.

عدم برخورد با مانع می‌تواند به روش‌های مختلف صورت پذیرد. در مقاله [۳۳] استراتژی کنترل گروهی سه مولتی روتور ارائه شده است که قادر خواهند بود از موانع عبور کنند. یک معماری غیرمتمرکز ارائه شده است که هرکدام از پرنده‌ها دارای کنترل پیش‌بین هستند. در این مقاله موانع به صورت چندضلعی در نظر گرفته شده و عبور از مانع و محدودیت نیروی کنترلی و عدم برخورد پرنده‌ها با یکدیگر به صورت قید ارائه شده است. در مقاله [۱۸] جهت عبور از مانع یک محدوده‌ی دایره‌ای شکل برای مانع در نظر گرفته، خط مماس از رهبر به دایره را رسم کرده و شرط اندازه‌ی زاویه‌ی خط مماس با محور افق را به عنوان قید ذکر کرده است.

در این مقاله سعی شده است تا با تعریف قیود مناسب و اعمال آن‌ها در روال طراحی، مسئله عبور از مانع به خوبی انجام پذیرد. مطابق شکل ۴ دو حلقه‌ی امن و حس اطراف مانع تعریف شده است. قید برخورد با مانع زمانی فعال خواهد شد که رهبر گروه در ناحیه L_{sence} وارد شود. هنگامی که قید برخورد با مانع فعال شد، رهبر گروه مسیری را طی می‌کند تا هیچ یک از اعضای گروه ضمن طی نمودن مسیر خود و حفظ آرایش گروه، با مانع برخورد ننمایند. با توجه شکل ۴ زوایا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \frac{L_{sence}}{\sqrt{(p_k - p_5)^2 + (q_k - q_5)^2}} \\ \beta &= \tan^{-1} \frac{(q_k - q_5)}{(p_k - p_5)} \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{(q_t - q_5)}{(p_t - p_5)} \\ \gamma_1 &= \beta - \alpha \\ \gamma_2 &= \beta + \alpha \\ \gamma &= \tan^{-1} \frac{u_q}{u_p} \end{aligned} \quad (44)$$

در روابط بالا زاویه‌ی β ، زاویه‌ی بین مانع و رهبر بوده و θ ، زاویه‌ی بین هدف و رهبر می‌باشد. γ زاویه برآیند ورودی‌های کنترلی در دو راستا می‌باشد (جدول ۲).

شکل ۵ بلوک دیاگرام مربوط به الگوریتم عبور از مانع توسط گروه ربات‌های پرنده را نشان می‌دهد. عبور از مانع با اولویت

در نتیجه با نوشتن به فرم استاندارد خواهیم داشت:

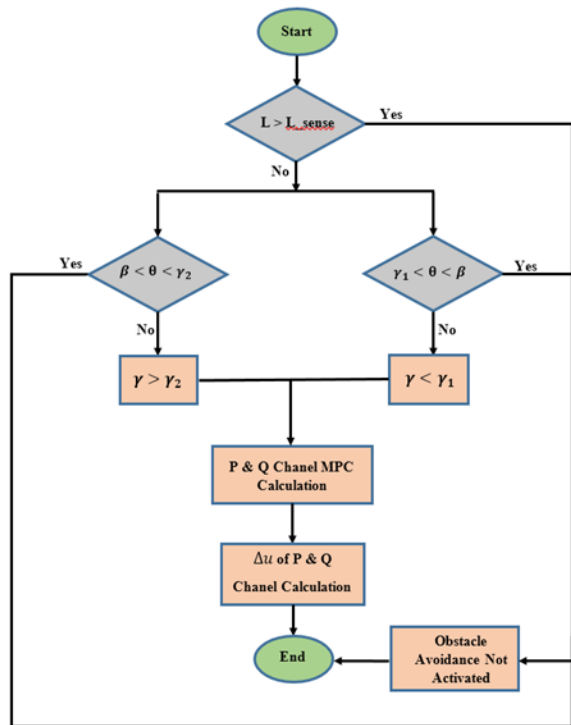
$$[-CA^3B - CA^2B - CAB - CB] \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \Delta u_{k+3} \end{bmatrix} < fence_{outer} - Pl_{k+3} + CA^4x \quad (43)$$

به همین ترتیب برای حلقه درونی می‌توان این روابط را پیاده‌سازی نمود. در بخش بعدی، خواهیم دید که شبیه‌سازی‌های مربوط به اثر اعمال قیود در گام‌های بعدی نتایج جالبی را به همراه دارد. اعمال قید بر روی مقدار ورودی در گام‌های بعدی، منجر به خروج مقدار ورودی در این گام از محدوده مجاز شد؛ بنابراین برای قید مربوط به ورودی‌های کنترلی و تغییرات آن، نمی‌توان فقط از قیود مراحل بعد استفاده کرد و می‌بایست قیود همین گام نیز در قیود لحاظ شود، زیرا در غیر این صورت ورودی این گام از محدوده مجاز تجاوز خواهد نمود. از طرف دیگر، اعمال قید بر روی مقدار خروجی در گام‌های بعدی، منجر به بهبود رفتار سیستم و کاهش تلاش کنترلی شد و نیازی به اعمال قید خروجی در گام k ام نخواهد بود. نتایج موارد فوق در بخش شبیه‌سازی به صورت کامل ارائه شده است.

۳-۳- طراحی قیود عدم برخورد با مانع

امکان وجود مانع در مسیر حرکت گروهی ربات‌های پرنده متصور است. عبور گروه ربات‌ها از موانع باید با توجه به نوع مانع، با حفظ و یا تغییر آرایش گروه انجام شود. در این مقاله عبور از مانع با حفظ آرایش گروه مدنظر قرار گرفته است. در این مقاله گروه ربات‌ها باید اولاً از مانع عبور کرده و ثانیاً هدف متحرک را ضمن حفظ آرایش گروه دنبال کنند. قوانین مربوط به حرکت گروهی ربات با ره‌گیری هدف متحرک و عبور از مانع به صورت زیر تعریف می‌شود:

- ۱) صرف حداقل انرژی گروه ربات‌ها، جهت ره‌گیری هدف متحرک و عبور از موانع.
- ۲) عبور از مانع با حداقل انحراف از مسیر مستقیم برای رسیدن به هدف.
- ۳) عبور رهبر باید به صورتی باشد که پیروها نیز به مانع برخورد نکنند بدین منظور یک حلقه‌ی



شکل (۵): بلوک دیاگرام الگوریتم عبور از مانع.

زمانی این قیود فعال می‌شود که رهبر گروه برای ره‌گیری هدف به حلقه حس (L_{sense}) برخورد کند که در نتیجه آن گروه ربات‌ها با یک فاصله امن از مانع عبور خواهند کرد. یکی از روش‌هایی که می‌تواند منجر به صرف حداقل انرژی برای عبور از مانع شود، انتخاب حداقل انحراف از مسیر مستقیم از بین دو مسیر راست و چپ برای عبور از حلقه امن مانع می‌باشد؛ انتخاب این دو مسیر منجر به انتخاب زاویه دستورات کنترلی γ ، کمتر از γ_1 و یا بیشتر از γ_2 خواهد شد که به صورت زیر تعریف می‌شود. انتخاب این دو مسیر به موقعیت هدف متحرک وابسته است.

$$\text{if } \gamma_1 < \theta < \beta \rightarrow \gamma < \gamma_1 \quad (46)$$

$$\text{if } \beta < \theta < \gamma_2 \rightarrow \gamma > \gamma_2$$

برای ایجاد قید به صورتی که در روش هلیدرث قابل تعریف است، خواهیم داشت:

$$\gamma < \gamma_1 \rightarrow \tan \gamma < \tan \gamma_1 \quad (47)$$

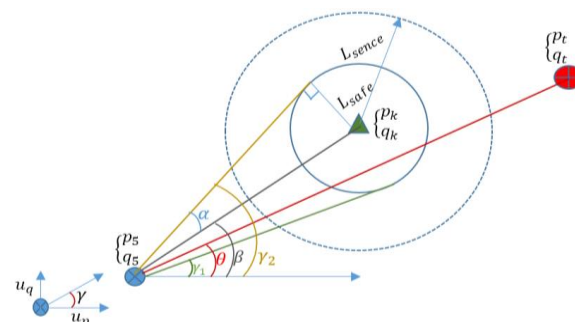
$$\gamma > \gamma_2 \rightarrow \tan \gamma > \tan \gamma_2$$

برای قید $\gamma < \gamma_1$ و با توجه به تعریف $\frac{u_q}{u_p} = \tan \gamma$ خواهیم داشت.

$$\gamma < \gamma_1 \rightarrow \tan \gamma < \tan \gamma_1 \rightarrow \frac{u_q}{u_p} < \tan \gamma_1 \quad (48)$$

ره‌گیری هدف توسط رهبر با راهکارهای موجود در برخی مقالات که فاصله ربات از مانع حفظ شود، نمی‌تواند راه‌حل مفیدی باشد، چراکه ارضا شدن این قید باید به همراه ره‌گیری هدف باشد. راه‌حلی که در این مقاله به کارگیری شده است قید بر روی ورودی‌های کنترلی می‌باشد. با توجه به این شکل، عبور از مانع از سمت راست و یا از سمت چپ مانع متناسب با موقعیت هدف نسبت و مسیر حرکت گروه می‌باشد که در نتیجه‌ی آن، دو شرط زیر می‌بایست برقرار شود:

$$\begin{aligned} \gamma &< \gamma_1 \\ \gamma &> \gamma_2 \end{aligned} \quad (45)$$



شکل (۴): نحوه عبور گروه ربات از مانع.

جدول (۲): پارامترهای تعریف شده

γ	زاویه برآیند ورودی‌های کنترلی در دو راستا
θ	زاویه‌ی بین هدف و رهبر
β	زاویه‌ی بین مانع و رهبر
$L_{sense} = \cdot / 5$	حلقه حس
$L_{safe} = \cdot / 3$	حلقه امن
u_p	ورودی کنترلی در راستای p
u_q	ورودی کنترلی در راستای q

$$p \text{ کانال} \rightarrow -\Delta u_p * \tan \gamma_2 < u_q + u_{p_{k-1}} * \tan \gamma_2 \quad (58)$$

در روابط بالا جهت محاسبه کانال p ورودی کنترلی کانال q ثابت فرض شده است. برای استفاده از ورودی کنترلی q در این مرحله از پیش‌بینی ورودی کنترلی از مرحله قبل استفاده شده است.

۳-۴- ره‌گیری هدف متحرک

همان‌طور که در بخش‌های قبلی مقاله نیز اشاره شد، ره‌گیری هدف متحرک بر عهده رهبر گروه است و سایر عوامل با پیروی از رهبر گروه، هدف متحرک را دنبال خواهند کرد. هنگامی که فاصله بین رهبر و هدف زیاد باشد، بهتر است رهبر گروه به‌جای دنبال نمودن هدف، مسیر آن در لحظات بعدی را پیش‌بینی کرده و برای ره‌گیری استفاده نماید. پیش‌بینی مسیر حرکت یک هدف متحرک به روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد. تخمین مسیر مناسب برای هدف متحرک، موضوع این مقاله نیست و صرفاً از یک معادله‌ی درجه اول برای تخمین مسیر حرکت هدف استفاده شده است تا پیش‌بینی موقعیت هدف به‌عنوان مقادیر مطلوب در گام‌های بعدی در اختیار رهبر گروه باشد. شبیه‌سازی‌ها، بهبود روند دنبال نمودن هدف را در این شرایط نشان می‌دهد.

$$p_k = p_{k-1} + v_0 * \Delta t \quad (59)$$

$$\Delta p = p_k - p_{k-1}$$

از آنجایی که در ره‌گیری هدف متحرک توسط گروه ربات‌ها، برای جلوگیری از عقب ماندن پیروها در تبعیت از رهبر گروه باید تمهیداتی اندیشیده شود. برای این منظور می‌بایست پیروها قدرت مانور پذیری بیشتری نسبت به رهبر گروه داشته باشند؛ چراکه بخشی از انرژی پیروها صرف ره‌گیری رهبر و مقداری دیگر صرف کنترل آرایش خواهد شد؛ بنابراین در این مقاله u_{limit} پیروها نسبت به رهبر بیشتر است. به‌عبارت‌دیگر محدودیت حرکتی بیشتری برای رهبر گروه در نظر گرفته‌شده، تا پیروها بتوانند عملیات خود را بدون مشکل به انجام برسانند.

در این رابطه با در نظر گرفتن ورودی کنترلی u_p مثبت و منفی دو رابطه زیر استخراج می‌شود.

$$\text{If } u_p > 0 \rightarrow u_q < u_p * \tan \gamma_1 \quad (49)$$

$$\text{If } u_p < 0 \rightarrow u_q > u_p * \tan \gamma_1$$

با در نظر گرفتن (۴۹) ($u_p > 0$) فرم استاندارد برای دو کانال به‌صورت زیر خواهد بود.

$$p \text{ کانال} \rightarrow -u_p * \tan \gamma_1 < -u_q \quad (50)$$

$$q \text{ کانال} \rightarrow u_q < u_p * \tan \gamma_1$$

با افزودن ترم موردنیاز جهت فرم استاندارد خواهیم داشت.

$$p \text{ کانال} \rightarrow -u_p * \tan \gamma_1 + u_{p_{k-1}} * \tan \gamma_1 < -u_q + u_{p_{k-1}} * \tan \gamma_1 \quad (51)$$

$$q \text{ کانال} \rightarrow u_q - u_{q_{k-1}} < u_p * \tan \gamma_1 - u_{q_{k-1}}$$

در نتیجه فرم استاندارد به‌صورت زیر خواهد بود.

$$p \text{ کانال} \rightarrow -\Delta u_p * \tan \gamma_1 < -u_q + u_{p_{k-1}} * \tan \gamma_1 \quad (52)$$

$$q \text{ کانال} \rightarrow \Delta u_q < u_p * \tan \gamma_1 - u_{q_{k-1}}$$

با در نظر گرفتن رابطه (۴۹) ($u_p < 0$) فرم استاندارد برای دو کانال به‌صورت زیر خواهد بود.

$$p \text{ کانال} \rightarrow u_p * \tan \gamma_1 < u_q \quad (53)$$

$$q \text{ کانال} \rightarrow -u_q < -u_p * \tan \gamma_1$$

و به همین ترتیب فرم استاندارد به‌صورت زیر خواهد بود:

$$p \text{ کانال} \rightarrow \Delta u_p * \tan \gamma_1 < u_q - u_{p_{k-1}} * \tan \gamma_1 \quad (54)$$

$$q \text{ کانال} \rightarrow -\Delta u_q < u_p * \tan \gamma_1 - u_{q_{k-1}}$$

برای قید $\gamma > \gamma_2$ و با توجه به تعریف $\frac{u_q}{u_p} = \tan \gamma$ خواهیم داشت.

$$\gamma > \gamma_2 \rightarrow \tan \gamma > \tan \gamma_2 \rightarrow \frac{u_q}{u_p} > \tan \gamma_2 \quad (55)$$

در این رابطه با در نظر گرفتن ورودی کنترلی u_p مثبت و منفی دو رابطه زیر استخراج می‌شود.

$$\text{If } u_p > 0 \rightarrow u_q > u_p * \tan \gamma_2 \quad (56)$$

$$\text{If } u_p < 0 \rightarrow u_q < u_p * \tan \gamma_2$$

با توجه به (۵۶) ($u_p > 0$) و ساده‌سازی طبق روابط بالا برای دو کانال به فرم استاندارد به‌صورت زیر استخراج خواهد شد.

$$p \text{ کانال} \rightarrow \Delta u_p * \tan \gamma_2 < u_q - u_{p_{k-1}} * \tan \gamma_2 \quad (57)$$

$$q \text{ کانال} \rightarrow -\Delta u_q < -u_p * \tan \gamma_2 + u_{q_{k-1}}$$

با توجه به (۵۶) ($u_p < 0$) و ساده‌سازی طبق روابط بالا برای دو کانال به فرم استاندارد به‌صورت زیر استخراج خواهد شد.

۴- شبیه‌سازی

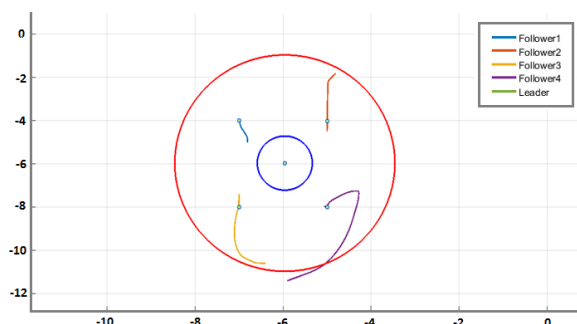
شبیه‌سازی‌ها برای یک گروه چهارتایی از ربات‌های پرنده به همراه یک ربات به‌عنوان رهبر گروه، انجام‌گرفته است. همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، در این شبیه‌سازی‌ها هر ربات به همراه خلبان خودکار تجاری منصوب بر روی آن، در هر کانال با یک سیستم مرتبه دوم مدل شده است. رهبر گروه با استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین مقید، هدف متحرک را ره‌گیری نموده و هر لحظه موقعیت خود به همراه پیش‌بینی موقعیت در گام‌های بعدی را برای سایر اعضای گروه ارسال می‌کند. سایر اعضای گروه در هر لحظه با محاسبه محل نسبی خود با رهبر گروه سعی می‌کنند با استفاده از کنترل پیش‌بین مقید به نقطه موردنظر جهت حفظ آرایش مطلوب و پیروی از رهبر گروه برسند (جدول ۳).

در شکل ۶ آرایش اولیه ربات‌ها نسبت به یکدیگر نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، رهبر گروه در مرکز دایره آبی‌رنگ قرار دارد و چهار ربات دیگر در اطراف آن به‌صورت نامنظم پراکنده هستند.

جدول (۳): قیود پیاده‌سازی شده در شبیه‌سازی

$u_{limit_k} = 0.5$	قیود ورودی کنترلی	قیود رهبر
$u_{limit_{k+1}} = 0.5$	قیود پیش‌بین ورودی کنترلی برای یک مرحله بعد	
$Du_{limit_k} = 0.3$	قیود تغییرات ورودی کنترلی	قیود پیروها
$Du_{limit_{k+1}} = 0.3$	قیود پیش‌بین تغییرات ورودی کنترلی برای یک مرحله بعد	
مطابق متن	قیود عبور از مانع	
$u_{limit_k} = 0.7$	قیود ورودی کنترلی پیش‌بین	قیود پیروها
$u_{limit_{k+1}} = 0.7$	قیود ورودی کنترلی برای یک مرحله بعد	
$Du_{limit_k} = 0.3$	قیود تغییرات ورودی کنترلی	

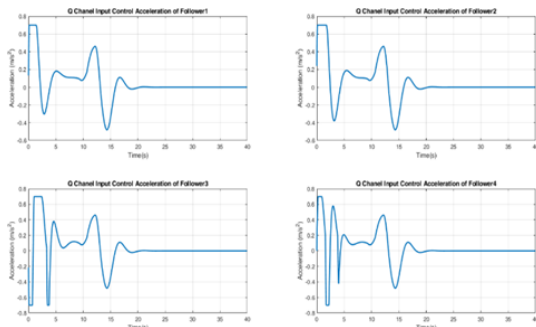
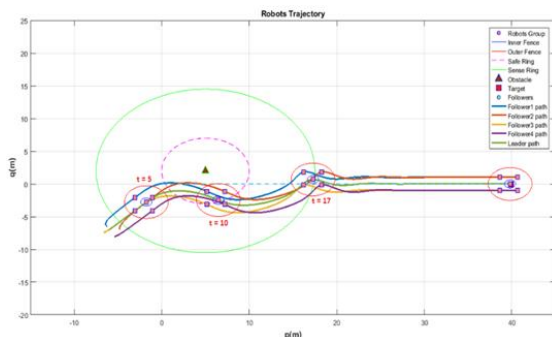
$Du_{limit_{k+1}} = 0.3$	قیود پیش‌بین تغییرات ورودی کنترلی برای یک مرحله بعد
$fence_{outer_{k+3}} = 0.3$	قیود پیش‌بین عدم تجاوز به حلقه بیرونی برای سه مرحله بعد
$fence_{inner_{k+3}} = 0.1$	قیود پیش‌بین عدم ورود به حلقه درونی برای سه مرحله بعد



شکل (۶): آرایش اولیه ربات‌ها نسبت به یکدیگر.

دایره قرمز رنگ نشان‌دهنده قیدی است که برای حداکثر فاصله مجاز بین ربات‌ها و رهبر گروه وجود دارد. در شروع شبیه‌سازی، محل و تعداد موانع برای هیچ‌یک از اعضای گروه مشخص نیست. هنگامی که ربات‌ها شروع به حرکت می‌کنند، اگر رهبر گروه وارد شعاع حس کردن مانعی شود، محل مانع مشخص شده و رهبر گروه به‌صورت بلادرنگ برای عبور از مانع تصمیم می‌گیرد. در شروع شبیه‌سازی، رهبر گروه در محل خود ایستاده و سایر ربات‌ها شروع به حرکت می‌کنند تا در موقعیت تعیین شده نسبت به رهبر گروه قرار گیرند. همان‌طور که در شکل ۶ قابل‌مشاهده است بعد از مدت کوتاهی، پیروها از محل قرارگیری اولیه خود شروع به حرکت کرده و در یک آرایش مربعی به مرکزیت رهبر گروه قرار می‌گیرند.

شکل ۷ مسیر طی شده توسط هدف متحرک (خط‌چین آبی‌رنگ)، محل قرارگیری مانع (مثلاً)، موقعیت اولیه ربات‌ها و نحوه ره‌گیری هدف متحرک و نیز عبور از مانع در لحظات مختلف نشان داده شده است. با توجه شکل، گروه

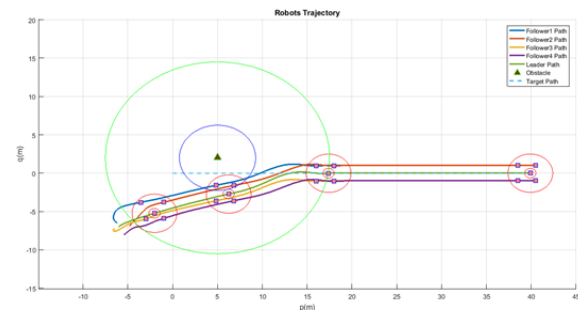
شکل (۹): ورودی (u_p) کانال P ربات‌های پیرو.شکل (۱۰): ورودی (u_q) کانال Q ربات‌های پیرو.

شکل (۱۱): مسیر گروه ربات، با کنترل کننده PID.

همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، کنترل کننده پیش‌بین مقید، نسبت به روش‌های سنتی، مانند PID دارای مزایای بسیاری از جمله امکان اعمال قیود در روال طراحی است. در این بخش نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه نتایج کنترل کننده پیش‌بین و کنترل کننده PID ارائه شده است. در شکل ۷ مسیر طی شده توسط گروه ربات‌ها، هنگامی که از کنترل کننده پیش‌بین استفاده شده است، نشان داده شده است. در شکل ۱۱ مسیر گروه ربات‌ها، با کنترل کننده PID ارائه شده است.

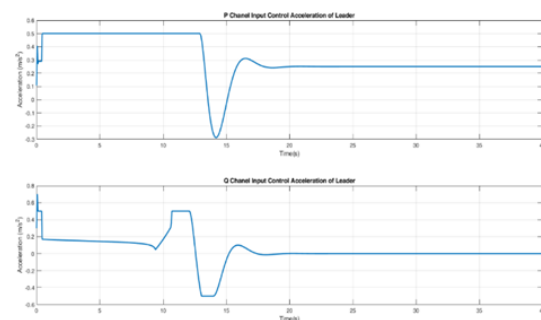
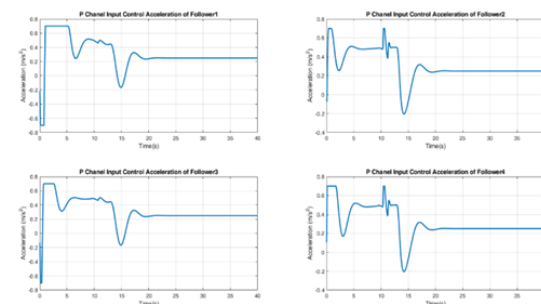
در هر دو شکل مذکور، موقعیت اولیه ربات‌ها، محل مانع و موقعیت و مسیر حرکت هدف یکسان در نظر گرفته شده است. همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد، کنترل کننده PID نتوانسته به خوبی کنترل کننده پیش‌بین، گروه ربات‌ها را از مانع عبور دهد و عملاً منجر به برخورد تعدادی از عوامل با مانع شده است. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، مقدار ورودی کنترل کانال P و Q ، برای کنترل کننده PID ارائه شده است. همان‌طور که به‌وضوح در شکل دیده می‌شود، به علت اعمال قید $u < 0.7$ ، مدت‌زمان زیادی در اشباع

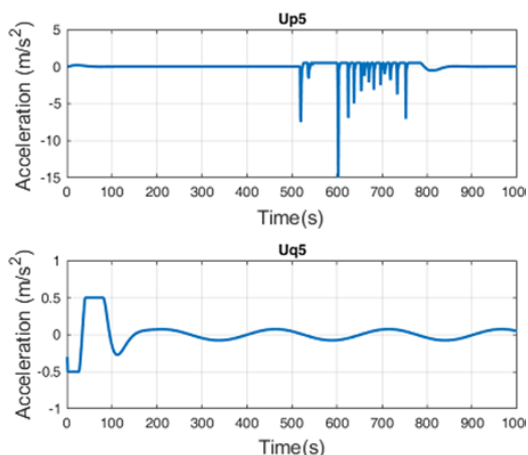
ضمن ره‌گیری هدف با یک‌فاصله مناسب از مانع عبور می‌کند.



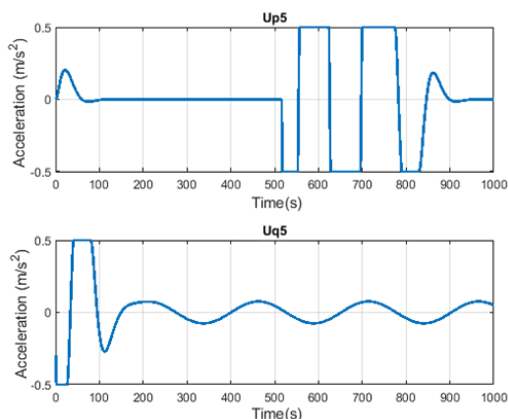
شکل (۷): مسیر طی شده توسط گروه ربات.

در شکل ۸ مقادیر ورودی کنترلی رهبر در هر دو کانال P و Q نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، کنترل کننده به نحوی عمل می‌کند تا مقدار ورودی u از مقدار تعیین شده به‌عنوان قید مقدار ورودی تجاوز ننماید. در شکل ۹ نمودار مربوط مقادیر ورودی کنترلی در پیروها در کانال P نمایش داده شده است. مطابق شکل، u از حدود تعیین شده تجاوز نکرده است و سیستم کنترل عملکرد مطلوبی از لحاظ انرژی داشته است. در شکل ۱۰ نمودار مربوط به مقادیر ورودی کنترلی در پیروها در کانال Q نمایش داده شده است. در این کانال نیز مقدار u از حدود تعیین شده تجاوز نکرده است.

شکل (۸): ورودی (u) در ربات رهبر.



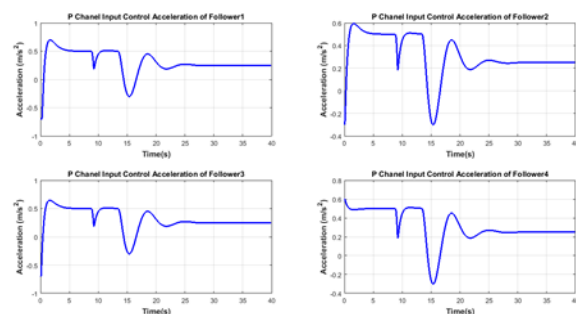
شکل (۱۴): اعمال قید عدم برخورد با مانع برای همین گام (m.k).



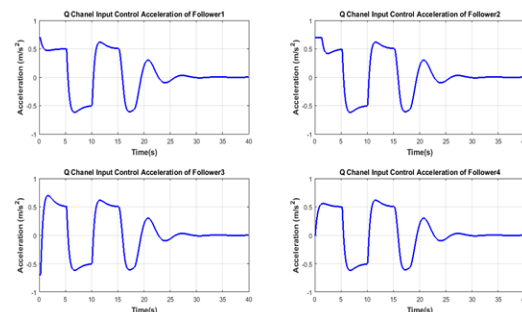
شکل (۱۵): اعمال قید عدم برخورد با مانع برای ۳ گام جلوتر (m.k+3).

اثر نیروی باد بر روی حرکت گروه یکی از مواردی است که می‌بایست کنترل کننده بتواند بر آن غلبه کند. در ادامه اعمال نیروی باد در بازه زمانی ثانیه ۲۰ تا ثانیه ۲۵ بر روی رهبر گروه و پیروها در راستای کانال Q انجام شده است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷). نیروی باد طوری انتخاب شده است که اعضای گروه نتوانند به‌طور کامل آن را جبران نمایند و نسبت به مسیر حرکت خود منحرف شوند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد، جبران نیروی باد ضمن حفظ آرایش گروه توسط کنترل کننده به خوبی انجام شده و کل گروه پس از قطع شدن باد، به مسیر اصلی خود بازگشتند.

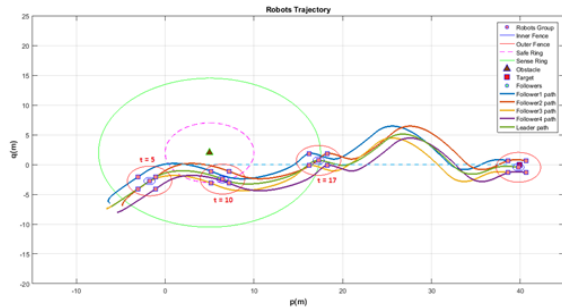
مثبت و یا منفی به سر می‌برد و این موضوع باعث ایجاد نوسانات در خروجی سیستم شده است.



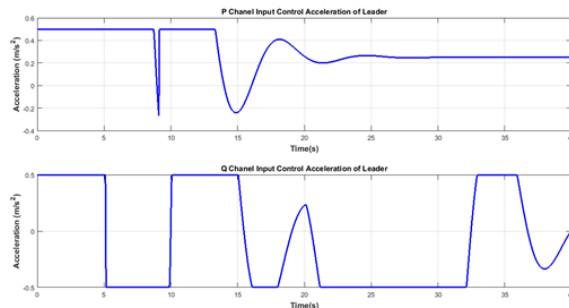
شکل (۱۲): ورودی کانال P (u_p) برای کنترل کننده PID. یکی دیگر از مواردی که مورد بررسی قرار گرفته است، تأثیر اعمال قیود مربوط به گام‌های بعدی در تابع هزینه است. در شکل ۱۴ خروجی کنترل کننده مربوط به رهبر گروه، در حالتی که قید عدم برخورد با مانع بر روی خروجی همین لحظه اعمال شده است، ارائه شده است. در شکل ۱۵ نمودار خروجی کنترل کننده مربوط به رهبر گروه، در حالتی که قید عدم برخورد با مانع بر روی خروجی در ۳ گام جلوتر اعمال شده است، ارائه شده و نشان داده شده است که این کار موجب شده تا خروجی کنترل کننده هموارتر شده و اثری از نوسانات قبلی باقی نمانده است. این موضوع به علت خاصیت آینده‌نگری در کنترل پیش‌بین بوده و نشان‌دهنده توانمندی و قابلیت‌های کنترل پیش‌بین در مسائل مقید است.



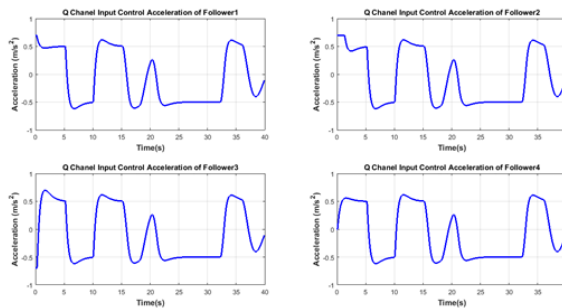
شکل (۱۳): ورودی کانال P (u_p) برای کنترل کننده PID.



شکل (۱۹): میسر گروه ربات با کنترل کننده PID، پس از اعمال اغتشاش باد.



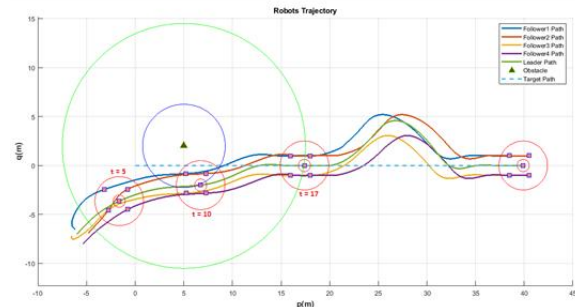
شکل (۲۰): ورودی رهبر گروه (u) با کنترل کننده PID.



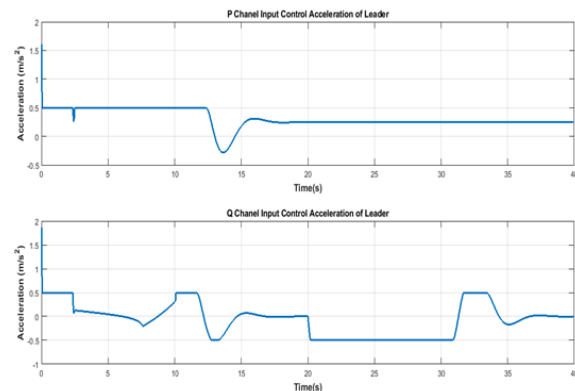
شکل (۲۱): ورودی ربات‌های پیرو در کانال Q (u_q) با کنترل کننده PID.

۵- نتیجه‌گیری

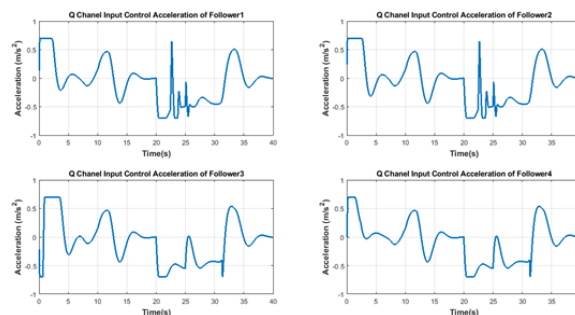
همان‌طور که در بخش‌های گذشته اشاره شد، هدف از این مقاله بهره‌گیری از کنترل کننده پیش‌بین مقید برای ره‌گیری یک هدف متحرک توسط گروهی از ربات‌های پرنده، ضمن کنترل آرایش گروه است. انجام این مهم با فرض معماری غیرمتمرکز و ساختار ارتباطی رهبر-پیرو بین عوامل انجام گرفته است. از جمله نوآوری‌های این مقاله می‌توان به بازنویسی قیود مسئله از قبیل تضمین حفظ فاصله و عدم برخورد پیروها با رهبر گروه و محدودیت‌های



شکل (۱۶): میسر گروه ربات با کنترل کننده MPC، پس از اعمال اغتشاش باد.



شکل (۱۷): ورودی ربات رهبر (u) با کنترل کننده MPC. در ادامه نتایج شبیه‌سازی انجام شده با اعمال نیروی باد در بازه زمانی ثانیه ۲۰ تا ثانیه ۲۵ بر روی رهبر گروه و پیروها در راستای کانال Q، مشابه با حالت قبل، درحالی‌که کنترل کننده PID در نظر گرفته شده است، ارائه شده است (شکل‌های ۱۸ تا ۲۱). همان‌طور که در نمودارها نمایان است، کنترل کننده PID نسبت به کنترل کننده MPC کارایی پایین‌تری نشان می‌دهد.



شکل (۱۸): ورودی ربات‌های پیرو در کانال Q (u_q) با کنترل کننده MPC.

[6] Ahmadzadeh A, Jadbabaie A, Kumar V, Pappas GJ, editors. Multi-UAV cooperative surveillance with spatio-temporal specifications. *Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on*; 2006: IEEE.

[7] Schmale Iii DG, Dingus BR, Reinholtz C. Development and application of an autonomous unmanned aerial vehicle for precise aerobiological sampling above agricultural fields. *Journal of Field Robotics*. 2008;25(3):133-47.

[8] Monostori L, Vánca J, Kumara SR. Agent-based systems for manufacturing. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2006;55(2):697-720.

[9] Jiang C, Sheng Z. Case-based reinforcement learning for dynamic inventory control in a multi-agent supply-chain system. *Expert Systems with Applications*. 2009;36(3):6520-6.

[10] Teodorovic D. Transport modeling by multi-agent systems: a swarm intelligence approach. *Transportation planning and Technology*. 2003;26(4):289-312.

[11] Kaiser D, Lesch V, Rothe J, Strohmeier M, Spieß F, Krupitzer C, et al. Towards Self-Aware Multirotor Formations. *Computers*. 2020;9(1):7.

[12] Karras GC, Bechlioulis CP, Furlas GK, Kyriakopoulos KJ, editors. Formation Control and Target Interception for Multiple Multi-rotor Aerial Vehicles. 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS); 2020: IEEE.

[13] Dubois L, Suzuki SJAR. Formation control of multiple quadcopters using model predictive control. 2018:1-10.

[14] Reynolds CW, editor *Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model*. ACM SIGGRAPH computer graphics; 1987: ACM.

[15] Liu Y, Montenbruck JM, Zelazo D, Odelga M, Rajappa S, Bühlhoff HH, et al. A distributed control approach to formation balancing and maneuvering of multiple multirotor UAVs. *IEEE Transactions on Robotics*. 2018;34(4):870-82.

[16] Yingxun W, ZHANG T, Zhihao C, Jiang Z, Kun W. Multi-UAV coordination control by chaotic grey wolf optimization based distributed MPC with event-triggered strategy. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2020;33(11):2877-97.

[17] Saska M, Hert D, Baca T, Kratky V, Nascimento T. Formation control of unmanned micro aerial vehicles for straitened environments. *Autonomous Robots*. 2020:1-18.

ورودی‌ها و تغییرات آن‌ها بر روی تمام اعضای گروه و نیز ارائه یک روش هندسی ابتکاری برای عبور از موانع و اعمال سیستماتیک همگی آن‌ها در فرآیند کنترل، اشاره کرد. رهبر گروه موقعیت فعلی و تخمین موقعیت خود در گام‌های بعدی را دائماً برای پیروها ارسال می‌کند تا با استفاده از آن، موقعیت مطلوب فعلی و لحظات بعدی را محاسبه نمایند.

شبیه‌سازی‌های انجام‌شده برای یک گروه پنج‌تایی از ربات‌های پرنده که ضمن حفظ آرایش گروه به دنبال رهگیری یک هدف متحرک زمینی هستند، ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد کنترل‌کننده توانسته است ضمن حفظ آرایش گروه و عبور آن‌ها از موانع مسیر هدف را رهگیری نماید. نتایج نشان می‌دهد کنترل‌کننده در مقابل اغتشاشات موجود در مسیر حرکت گروه مقاومت خوبی داشته و رهگیری گروهی به نحو مطلوبی انجام شده است. همچنین پیش‌بینی مسیر حرکت هدف متحرک و استفاده از آن در طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین، باعث بهبود و هموارتر شدن مسیر حرکت گروه گردیده است.

۶- مراجع

[1] Welch RV, Edmonds GO. Applying robotics to HAZMAT. *Proceedings of the 4th National Technology Transfer Conference and Exposition-In NASA Technology*. 1994.

[2] Bernard M, Kondak K, Maza I, Ollero A. Autonomous transportation and deployment with aerial robots for search and rescue missions. *Journal of Field Robotics*. 2011;28(6):914-31.

[3] Maza I, Caballero F, Capitán J, Martínez-de-Dios JR, Ollero A. Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications. *Journal of intelligent & robotic systems*. 2011;61(1):563-85.

[4] Chmaj G, Selvaraj H. Distributed processing applications for UAV/drones: a survey. *Progress in Systems Engineering*: Springer; 2015. p. 449-54.

[5] Sujit P, Kingston D, Beard R, editors. Cooperative forest fire monitoring using multiple UAVs. *Decision and Control, 2007 46th IEEE Conference on*; 2007: IEEE.

optimal and adaptive design approaches: Springer Science & Business Media; 2013.

[30] Ponda SS, Johnson LB, Geramifard A, How JP. Cooperative mission planning for multi-uav teams. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles: Springer; 2015. p. 1447-90.

[31] Wang L. Model predictive control system design and implementation using MATLAB®: Springer Science & Business Media; 2009.

[32] Dubay S, Pan Y-J, editors. Distributed MPC based collision avoidance approach for consensus of multiple quadcopters. 2018 IEEE 14th International Conference on Control and Automation (ICCA); 2018: IEEE.

[33] Viana IB, dos Santos DA, Góes LCS. Formation control of multirotor aerial vehicles using decentralized MPC. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2018;40(6):1-12.

[18] Bassolillo SR, D'Amato E, Notaro I, Blasi L, Mattei M. Decentralized mesh-based model predictive control for swarms of UAVs. Sensors. 2020;20(15):4324.

[19] Kim J, Gadsden SA, Wilkerson SAJJoE, Engineering C. A comprehensive survey of control strategies for autonomous quadrotors. 2019;43(1):3-16.

[20] Balch T, Arkin RCJItor, automation. Behavior-based formation control for multirobot teams. 1998;14(6):926-39.

[21] Fredslund J, Mataric MJJItor, automation. A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication. 2002;18(5):837-46.

[22] Lawton JR, Beard RW, Young BJJItor, automation. A decentralized approach to formation maneuvers. 2003;19(6):933-41.

[23] Pugh J, Raemy X, Favre C, Falconi R, Martinoli AJIAToM. A fast onboard relative positioning module for multirobot systems. 2009;14(2):151-62.

[24] Falconi R, Goyal S, Martinoli A, editors. Graph based distributed control of non-holonomic vehicles endowed with local positioning information engaged in escorting missions. Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on; 2010: IEEE.

[25] Goyal SA. A framework for graph-based distributed rendezvous of nonholonomic multi-robot systems. 2013.

[26] Manikonda V, Arambel P, Gopinathan M, Mehra R, Hadaegh F, editors. A model predictive control-based approach for spacecraft formation keeping and attitude control. American Control Conference, 1999 Proceedings of the 1999; 1999: IEEE.

[27] Xuan-Mung N, Hong SK. Robust adaptive formation control of quadcopters based on a leader-follower approach. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2019;16(4):1729881419862733.

[28] Santana LV, Brandão AS, Sarcinelli-Filho MJJoI, Systems R. Navigation and cooperative control using the ar. drone quadrotor. 2016;84(1):327-50.

[29] Lewis FL, Zhang H, Hengster-Movric K, Das A. Cooperative control of multi-agent systems:



Formation Control of Flying Robots Using Constrained Model Predictive Control While Tracking of Moving Target in Presence of Obstacles

Ahmad Nasiri¹, Abdorreza Kashaninia^{2*}, Ahmad Reza Vali³

¹ Ph.D. Student, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

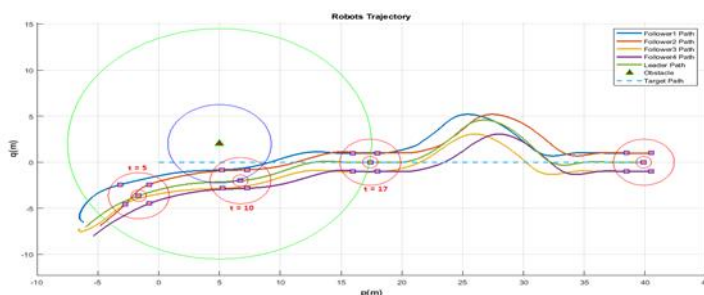
² Assistant Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

³ Associate Professor, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

HIGHLIGHTS

- Tracking the moving target by a group of flying robots, while controlling the arrangement of the group is provided.
- An innovative geometric method for crossing obstacles and its systematic application in the control process has been carried out.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 12 July 2022

Received in revised form: 15 August 2022

Accepted: 28 August 2022

Available online: 18 October 2022

*Correspondence:

akashaninia@mut.ac.ir

How to cite this article:

A. Nasiri, A. Kashaninia, A.R. Vali. Tracking of the moving target by flying robots using constrained model predictive control in presence of obstacles. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(4):29-47.

Keywords:

Formation control

Constrained model predictive control

Decentralized control

Moving target tracking

ABSTRACT

In this article, using the constrained predictive controller, the tracking of a moving target by a group of flying robots while controlling the group arrangement is presented. The maintenance and control of the group arrangement is based on position control with the assumption of decentralized architecture and leader-follower communication structure between the agents. Target tracking is done by the group leader and the followers are responsible for tracking the group leader. The leader of the group constantly sends the current position and the estimate of his position in the next steps to the followers to use it to calculate the optimal current position and the next moments. In the following, rewriting the constraints of the problem, such as ensuring that the distance is maintained and that the followers do not collide with the group leader, and the limitations of inputs and their changes on all members of the group, as well as providing an innovative geometric method for crossing obstacles and systematically applying all of them in the control process. Simulations are presented for a group of five flying robots that seek to intercept a moving ground target while maintaining the formation of the group. The results show that the controller has a good resistance to the disturbances in the group's movement path and the group interception is carried out in a favorable way. Predicting the movement path of the moving target and using it in the design of the predictive controller also improves and smooths the movement path of the group.

