

# کنترل مشارکتی ربات‌ها در ایجاد بستری مناسب جهت فرود عامل پرنده

امیرحسین برشوئی<sup>۱</sup> عبدالله امیرخانی<sup>۲</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی خودرو- گروه برق و الکترونیک- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

[A\\_barshooi@auto.iust.ac.ir](mailto:A_barshooi@auto.iust.ac.ir)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی خودرو- گروه برق و الکترونیک- دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران- ایران

[Amirkhani@iust.ac.ir](mailto:Amirkhani@iust.ac.ir)

**چکیده:** سیستم‌های چند عامله سیستم‌هایی هستند که در آن چندین عامل با همکاری یکدیگر در قالب یک تیم و به صورت مشارکتی ماموریتی را انجام می‌دهند. در این مقاله ایده ای نوین برای ساخت باند فرودی متحرک و مبتنی بر سیستم‌های چند عامله ارائه می‌شود. فرض بر آنست که عاملی پرنده (کوادروتور) به صورت سرگردان در فضا وجود داشته و به دلایلی همچون کاهش سطح انرژی و یا نقص فنی تصمیم به فرود اضطراری می‌گیرد. این در حالی است که بستر مناسب برای فرود در اختیار نداشته و یا قادر نیست خود را به مکانی دیگر جهت فرود برساند. هدف این است که گروهی از عامل‌های زمینی (موبایل ربات‌ها) که ابعاد کوچکتری نسبت به عامل پرنده دارند الگوی شکل‌گیری مشخصی را ایجاد کنند تا عامل پرنده بتواند روی آن‌ها فرود بیاید. صفحه‌هایی مسطح و مشبک در قسمت فوقانی هریک از موبایل ربات‌ها به گونه‌ای تعبیه شده است که با نزدیک شدن ربات‌ها به یکدیگر و تشکیل آرایش هندسی مشخص (همچون پنج ضلعی منتظم)، صفحات به یکدیگر متصل شده و بستر وسیع‌تری را جهت فرود ایجاد خواهند کرد. کنترل مشارکتی عامل‌ها (از کنترل فرود کوادروتور گرفته تا کنترل شکل‌گیری موبایل ربات‌ها) هدف اصلی این مقاله است که در مدل‌های دینامیکی مختلف و تحت گراف جهت‌دار به همراه تحلیل پایداری مبتنی بر لیاپانوف ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم‌های چند عامله، کنترل مشارکتی، باند فرود، کنترل شکل‌گیری

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.1.153

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۰۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر عبدالله امیرخانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - میدان رسالت - خیابان فرجام - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده‌ی مهندسی خودرو

## ۱- مقدمه

فرود فراهم است و عامل هیچگونه محدودیتی در خصوص موقعیت فرود ندارد. اگرچه این امر در واقعیت صادق نبوده و یافتن مکان مناسب برای فرود، از ابتدایی‌ترین و مهم‌ترین ملزومات می‌باشد [۱۲]. از آنجایی که یکی از کاربردهای اصلی عامل‌های پرنده همچون کوادروتورها و بالگردها در عملیات مرتبط با نظارت و نجات است، این عامل‌ها باید توانایی فرود اضطراری در هر مکان و موقعیتی را داشته باشند. به عنوان مثال، گاه پیش می‌آید که یک بالگرد می‌خواهد روی سطح آب یا سطح شن فرود بیاید. در این مواقع اگر باند فرودی متناسب با این محیط‌ها طراحی و تعبیه نشود، بالگرد به درون آب یا شن فرو رفته و عملیات با شکست مواجه خواهد شد. رودریگز راموس و همکارانش در [۱۳]، مسئله فرود خودکار هواپیماهای بدون سرنشین بر روی یک موبایل ربات در حال حرکت را مورد بررسی قرار دادند. لازم به ذکر است که ابعاد این هواپیمای بدون سرنشین در حدود یک خودروی سدان بوده و کنترل فرود آن نیز با تکنیک‌های مبتنی بر بینایی کامپیوتر<sup>۱</sup> و یادگیری ماشین<sup>۱</sup> صورت گرفته است.

سه استراتژی اصلی کنترل برای شکل‌گیری وجود دارد که توسط محققان قبلی ارائه شده است، مانند ساختار رفتاری<sup>۲</sup>، ساختار مجازی<sup>۱۱</sup> و ساختار رهبر-پیرو. هر یک از روش‌های کنترل شکل‌گیری دارای مزایا و معایب مخصوص به خود است. بالچ و آرکین [۱۴] کنترل شکل‌گیری مبتنی بر ساختار رفتاری را برای تیم‌های متشکل از ربات‌ها پیشنهاد دادند. رویکرد مبتنی بر ساختار رفتاری به چندین رفتار مورد نظر عوامل مانند جستجوی هدف، جلوگیری از موانع، جلوگیری از برخورد و غیره اشاره دارد. مزیت این روش این است که می‌تواند برای هدایت عوامل یا روبات‌ها در محیطی ناشناخته با استفاده از اطلاعات محلی که هر یک از عوامل دارند، استفاده شود. با این وجود، این ساختار نمی‌تواند همگرایی عوامل به نقطه هدف را تضمین کند.

در این مقاله مسئله کنترل عامل‌هایی ناهمگن با مدل‌های دینامیکی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. فرض بر آنست که عاملی پرنده همچون کوادروتور، به صورت معلق در هوا وجود داشته و به دلایلی نامعلوم تصمیم به فرود اضطراری می‌گیرد. این در حالی است که بستری مسطح و مناسب فرود در دسترس نبوده و شرایط برای یافتن یک محیط مناسب فراهم نمی‌باشد. هدف، ساخت باند فرودی متحرک با کمک تعداد دلخواهی عامل‌های زمینی (موبایل ربات) است.

هریک از عامل‌ها مجهز به صفحه‌هایی مسطح و مشبک در قسمت فوقانی خود بوده که با نزدیک شدن این عامل‌ها به یکدیگر و ایجاد راس‌های یک شکل هندسی معین، این صفحه‌ها به یکدیگر متصل شده و سطح وسیع‌تری شبیه به باند فرود را ایجاد می‌کنند. در نهایت، عامل پرنده قادر خواهد بود بر روی صفحه مسطح ایجاد شده فرود بیاید. علت استفاده از صفحه‌هایی مشبک، کاهش فشار هوای ایجاد شده توسط ملخ‌ها در زیر کوادروتور و حذف اثر گرانولی<sup>۱۲</sup> می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که تا پیش از این مقاله، مسئله فرود یک عامل بر

سیستم‌های چند عامله<sup>۱</sup> سیستم‌هایی هستند که در آن‌ها چندین عامل با کمک یکدیگر یک ماموریت یا عملی را انجام می‌دهند. معمولاً ماموریتی که به سیستم‌های چند عامله واگذار می‌شود به گونه‌ای است که از عهده یک عامل به تنهایی بر نمی‌آید، یا هزینه و پیچیدگی استفاده از یک عامل بیشتر از استفاده از چند عامل ساده است [۳-۱]. ایده اصلی سیستم‌های چند عامله نخستین بار با الهام گرفتن از رفتارهای بیولوژیکی موجودات مانند حرکت دسته جمعی ماهی‌ها و پرندگان در طبیعت بیان شد. در طبیعت هر یک از اجزاء از هوشمندی بسیار ناچیزی بهره‌مند هستند اما مجموعه گروهی آن‌ها یک شبکه هوشمند را تشکیل خواهد داد. به عنوان مثال، حرکت گروهی پرندگان که آن را Flocking و حرکت دسته جمعی ماهی‌ها را که schooling می‌نامند، سبب می‌شود تا گروه در مقابل دشمنان قوی‌تر بوده و نیز شانس یافتن غذا را برای خود افزایش دهند [۴-۶].

در سال‌های اخیر، مسئله اجماع<sup>۲</sup> در کاربردهای مختلفی از جمله: وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین<sup>۳</sup>، وسایل نقلیه زیرآبی، کنترل ترافیک، شبکه‌های حسگر بیسیم<sup>۴</sup> و تصمیم‌گیری در سیستم‌های اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال در [۷] به طراحی الگوریتمی بر پایه اجماع و همچنین ساختار کنترلی رهبر-پیرو<sup>۵</sup> به منظور عدم برخورد به موانع در وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین در سرعت‌های بالا و در فضایی سه بعدی پرداخته شده است. الگوریتم ردیابی چند هدفه در وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین و بر اساس اجماع تخصیص وظایف در [۸] پیشنهاد شده است. همچنین بررسی اجماع موقعیت زمان محدود و مشکلات اجتناب از برخورد به موانع برای سیستم‌های چند پهپادی (هواپیمای بدون سرنشین) در [۹] مورد بررسی قرار گرفته است.

کنترل شکل‌گیری<sup>۶</sup> مسئله مهمی برای هماهنگی و کنترل گروهی از عامل‌ها است. عامل‌ها باید ضمن حفظ موقعیت و جهت‌گیری نسبی خود از یک مسیر از پیش تعیین شده پیروی کرده تا بتوانند به یک نقطه خاص یا همان مقصد برسند. در بحث کنترل شکل‌گیری موضوعات بسیاری از قبیل پایداری شکل‌گیری، قابلیت کنترل الگوهای مختلف در حین شکل‌گیری، ایمنی و عدم قطعیت در شکل‌گیری باید مورد توجه قرار گیرند. دسته دیگر از موضوعاتی که در طراحی کنترل کننده برای شکل‌گیری عامل‌ها مطرح می‌شوند، موضوعاتی مربوط به تولید شکل هندسی شکل‌گیری، پیکربندی مجدد شکل‌گیری، ردیابی شکل‌گیری<sup>۷</sup> و همچنین تعیین وظایف هر یک از عامل‌ها در شکل‌گیری هستند [۱۰].

در میان انواع عامل‌های موجود، عامل‌های پرنده به ویژه کوادروتورها و پهپادها در دهه گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۱]. یکی از چالش‌های اصلی در این حوزه، کنترل فرود می‌باشد. در غالب تحقیقات صورت گرفته فرض بر آنست که بستر مناسب برای

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } (i, j) \in E \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad a_{ij} = a_{ji}, \quad i \neq j \quad (2)$$

با بهره‌گیری از رابطه فوق، ماتریس لاپلاسیان<sup>۱۴</sup>  $L = [\ell_{ij}] \in R^{n \times n}$  را بیان می‌کنیم که در آن

$$\ell_{ii} = \sum_{j=1}^n a_{ij}, \quad \ell_{ij} = -a_{ij}, \quad i \neq j \quad (3)$$

لازم به ذکر است که ماتریس لاپلاسیان، ماتریسی متقارن بوده و شرط ذیل را ارضا خواهد کرد.

$$\sum_{j=1}^n \ell_{ij} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

### ۳- روش کار

همانطور که پیش تر نیز اشاره شد، هدف در این مقاله ایجاد بستری مناسب جهت فرود وسیله هوایی سرگردان در فضا می‌باشد. این بستر مناسب توسط ربات‌هایی (عامل‌هایی) ایجاد خواهد شد که در سطح زمین وجود دارند. فرض بر آن بوده است که در قسمت فوقانی هریک از این ربات‌ها، یک سطح صاف و هموار کوچکی تعبیه شده است. بنابراین، زمانی که ربات‌ها به یکدیگر نزدیک شوند، این سطوح به یکدیگر اتصال پیدا کرده و سطح بزرگتری را ایجاد می‌کنند که کوادروتور می‌تواند در آن فرود بیاید. از آنجایی که حل این مسئله بر اساس سیستم‌های چند عامله صورت می‌پذیرد، می‌توان تعداد ربات‌ها را از دو تا هزاران عدد در نظر گرفت. در این بخش ما ابتدا روش‌های کنترلی موجود را به طور مفصل بیان کرده و از آن‌ها برای کنترل ربات‌های زمینی و کوادروتور استفاده خواهیم کرد تا جای می‌شود.

#### ۳-۱- مدل‌های دینامیکی عامل‌های زمینی

همانطور که بیان شد، تبادل اطلاعات جز جداناپذیری در سیستم‌های چند عامله و به خصوص در مسئله اجماع است که در آن، هر عامل حالت اطلاعاتی فعلی خود را بر اساس اطلاعات دریافت شده از همسایگان خود به روز می‌کند. قبل از بیان الگوریتم‌ها و پروتکل‌های اجماع، ابتدا ضروری است تا هریک از عامل‌ها را با ساختارهای دینامیکی مدل سازی کرده و برای هریک الگوریتم اجماعی مختص آن ارائه دهیم. بر اساس نوع کاربرد و دقت لازم در مسئله اجماع، می‌توان مدل‌های مختلفی از قبیل مدل تک انتگرالی<sup>۱۵</sup>، دو انتگرالی<sup>۱۶</sup> و مدل مرتبه بالاتر<sup>۱۷</sup> را به کار برد [۱۸]. در تمامی مدل‌های ارائه شده، فرض بر آنست که سیستم چند عامله مورد نظر از  $n$  عدد عامل تشکیل شده است و هر عامل را معادل یک گره و کانال ارتباطی موجود بین آن‌ها را معادل با یک یال در نظر می‌گیریم.

#### ۳-۱-۱- مدل دینامیکی تک انتگرالی

این مدل ساده ترین حالت برای توصیف حرکت عامل‌ها در سیستم‌های چند عامله بوده و ساده شده‌ی مدل سینماتیکی برای موبایل ربات‌های

روی چندین عامل کوچک‌تر مورد بررسی قرار نگرفته است. قوانین کنترلی طراحی شده را می‌توان به دو بخش الف) کنترل شکل‌گیری عامل‌های زمینی با مدل‌های دینامیکی مختلف و تعامل مبتنی بر گراف بدون جهت<sup>۱۳</sup> و ب) کنترل عامل پرنده تا لحظه فرود، دسته بندی نمود.

به طور کلی، نوآوری‌های صورت گرفته در این مقاله را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- به دست آوردن قانون کنترلی برای شکل‌گیری عامل‌هایی با مدل دینامیکی تک انتگرالی، دو انتگرالی
- در نظر گرفتن استراتژی کنترل شکل‌گیری هندسی
- مدل سازی دینامیکی کوادروتور و نحوه کنترل آن برای فرود روی سطح موبایل ربات‌های زمینی

در ادامه، در بخش ۲ به بیان پیش‌نیازها می‌پردازیم. در بخش ۳ نیز رویکرد پیشنهادی را به همراه قانون‌های کنترلی ذکر خواهیم کرد. اثبات پایداری شکل‌گیری هندسی در بخش ۴ و نتایج شبیه سازی نیز در بخش ۵ آورده شده‌اند. در بخش ۶ نیز، به نتیجه‌گیری و کارهای آینده خواهیم پرداخت.

### ۲- پیش‌نیازها

یک گراف شامل مجموعه‌ای ناتهی از رئوس (گره‌ها) و مجموعه‌ای از یال‌ها است. یک گراف را با نماد  $G = (V, E)$  نشان می‌دهند که  $V$  بیانگر مجموعه‌ی رئوس و  $E$  نیز بیانگر مجموعه‌ی یال‌ها است. به منظور مدل‌سازی ارتباط بین عامل‌ها در سیستم‌های چندعامله از گراف‌ها استفاده می‌کنیم [۱۵-۱۷]. در این حالت هریک از رئوس را معادل با عامل‌ها و هریک از یال‌ها را معادل ارتباط و تعامل بین دو عامل در نظر می‌گیریم. بنابراین برای سیستم‌های چند عامله‌ی متشکل از  $n$  عامل، گراف متناظر جهت دار یا بدون جهت به صورت  $G = (V, E)$  بوده که در آن  $V = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  و  $E \subseteq V \times V$  خواهند بود. یالی که به صورت  $(i, j) \in E$  نمایش داده می‌شود به این معنی است که عامل  $j$  ام با عامل  $i$  ام ارتباط و دسترسی داشته و قادر به دریافت اطلاعات و تعامل با آن عامل است و همچنین عامل  $i$  یک همسایه برای عامل  $j$  می‌باشد. مجموعه همسایگان راس  $i$  را به صورت زیر نمایش می‌دهند:

$$N_i(E) = \{j \in V \mid (i, j) \in E\} \quad (1)$$

برای هر گراف دلخواه، تعداد یال‌های  $l$  به صورت مجموعه‌ای از  $l = \{1, \dots, n(n-1)/2\}$  خواهد بود. گراف  $G$  را گرافی کامل گویند، هرگاه هر راس با یک یال به تمامی راس‌های دیگر متصل باشد و در نتیجه تعداد یال‌ها برابر با  $l = n(n-1)/2$  است و آن را به صورت قراردادی به شکل  $K_n$  نمایش می‌دهند. ماتریس همسایگی برای  $A = [a_{ij}] \in R^{n \times n}$  گراف  $G = (V, E)$  را به صورت زیر تعریف خواهیم کرد:

دارد که در آن،  $q_i$  حالت اطلاعاتی عامل  $i$  ام،  $v_i$  مشتق اول حالت اطلاعاتی عامل  $i$  ام و  $u_i$  کنترل ورودی آن است. در حالتی خاص، اگر حالت اطلاعاتی هر یک از عاملها را موقعیت آنها در فضا در نظر بگیریم، آنگاه، مدل دینامیکی دو انتگرالی، عاملها را مانند جرم نقطه ای در نظر گرفته و شتابی را به آن اختصاص می‌دهد و نیز،

$q_i, v_i, u_i$  به ترتیب بیانگر موقعیت، سرعت و کنترل شتاب ورودی عامل  $i$  ام خواهند بود. در [۱۸] الگوریتم‌های اجماع برای مدل دینامیکی دو انتگرالی و در چهار مورد خاص که عبارتند از: (۱) با یک ورودی کنترل محدود، (۲) بدون اندازه گیری سرعت نسبی، (۳) با یک سرعت مرجع گروهی در دسترس برای هر یک از اعضای تیم و (۴) با یک ورودی کنترل محدود هنگامی که یک حالت مرجع فقط برای زیر مجموعه‌های تیم در دسترس است، بررسی و ارائه داده شده است. تابع انتقال سیستم فوق در حوزه لاپلاس به صورت

$G_i(s) = \frac{1}{s^2} I_m$  بوده و دارای یک انتگرال اضافی نسبت به مدل قبلی است که علت این نامگذاری را توجیه می‌کند [۲۱]. مدل دو انتگرالی دارای کاربردهایی همچون، حرکت با اصطکاک کم، حرکت بدون ساختاری صلب مانند چرخش فضاپیما تک محوره و حرکت جرقیلی چرخشی است.

الگوریتم اجماع برای این مدل دینامیکی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u_i = -\sum_{j=1}^n a_{ij} [(q_i - q_j) + \gamma(v_i - v_j)], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

که در آن،  $a_{ij}$  برابر با درآیه  $(i, j)$  واقع در ماتریس همسایگی وزن دار و  $\gamma$  مقدار گین مثبت است.

اجماع زمانی صورت گرفته و به همگرایی می‌رسد که به ازای تمامی حالت‌های اطلاعاتی اولیه یعنی  $q_i(0)$  و مشتق اول هر یک یعنی  $v_i(0)$  به ازای تمامی  $i, j = 1, 2, \dots, n$ ، حد‌های زیر برقرار باشند:

$$\|q_i - q_j\| \rightarrow 0 \quad \text{که زمانی } t \rightarrow 0$$

$$\|v_i - v_j\| \rightarrow 0 \quad \text{که زمانی } t \rightarrow 0$$

### ۳-۲- کنترل کوادروتور

کوادروتورها که به عنوان هواپیماهای بدون سرنشین استفاده می‌شوند، با استفاده از یک سیستم کنترل الکترونیکی و سنسورهای الکترونیکی کنترل می‌شوند. معمولاً کوادروتورها از چند مولفه اصلی و اضافی تشکیل می‌شوند. چارچوب ESC ها (کنترل کننده‌های سرعت الکترونیکی)، موتورها، پروانه‌ها، باتری، تخته مدار کنترل و IMU (واحد اندازه گیری اینرسی) این گونه در نظر گرفته می‌شوند که اجزای اساسی و جدایی ناپذیر کوادروتور هستند [۲۲].

همانطو که اشاره شد، کوادروتور دارای شش درجه آزادی می‌باشد و صرفاً دارای چهار عملگر است. با ترکیب خطی نیروها و گشتاورهای تولید شده به وسیله عملگرهای آن می‌توان برای آن چهار ورودی کنترلی به صورت مستقل تعریف کرد [۲۳]. بنابراین آنچه که گفته شد

همه جهت (دارای چرخ‌های سوئدی<sup>۱۸</sup> [۱۷]) است. این مدل به طور گسترده در مسائل کنترل مشارکتی سیستم‌های چند عامله همچون مسئله اجماع و کنترل شکل‌گیری به کار رفته و تنها از دو متغیر سرعت و موقعیت تشکیل شده است و رابطه‌ای به صورت زیر بین آن‌ها برقرار است:

$$\dot{q}_i = u_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

که در آن،  $q_i$  موقعیت موبایل ربات  $i$  ام و  $u_i$  کنترل سرعت ورودی آن است. در عمل، موقعیت و سرعت هر یک از عاملها با بهره‌گیری از فیلتر مکمل تعیین می‌شوند. به عنوان مثال، در [۱۹] سرعت و موقعیت هر یک از کوادروتورها با کمک سنسورهای GPS<sup>۱۹</sup> و شتاب سنسورهای تعبیه شده در آن‌ها بدست آمده و تبادل این اطلاعات با عاملها همسایه با بهره‌گیری از شبکه‌های زیگی<sup>۲۰</sup> صورت گرفته است. ناگفته نماند که علت نامگذاری "تک‌انتگرالی" در این سیستم‌ها بدین جهت است که تابع انتقال مذکور در حوزه لاپلاس، به شکل زیر بوده و ورودی و خروجی آن با تابع تک‌انتگرالی از یکدیگر جدا می‌شوند [۲۰].

$$G_i(s) = \frac{1}{s} I_m \quad (6)$$

برای این مدل دینامیکی، ما الگوریتم اجماعی به صورت زیر را در نظر خواهیم گرفت:

$$u_i = -\sum_{j=1}^n a_{ij} [(q_i - q_j)], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

که در آن،  $a_{ij}$  برابر با درآیه  $(i, j)$  واقع در ماتریس همسایگی وزن دار است. با ترکیب معادلات (۵) و (۷) می‌توان به ماتریس زیر دست یافت:

$$\dot{q} = -[L_n(t) \otimes I_m] q \quad (8)$$

که  $L_n(t) \in R^{n \times n}$  ماتریس لاپلاسی نامتقارن در لحظه  $t$  و  $\otimes$  نیز بیانگر حاصلضرب کرونیگر است.

اجماع زمانی صورت گرفته و به همگرایی می‌رسد که به ازای تمامی حالت‌های اطلاعاتی اولیه یعنی  $q_i(0)$  به ازای تمامی  $i, j = 1, 2, \dots, n$ ، حد زیر برقرار باشد:

$$\|q_i(t) - q_j(t)\| \rightarrow 0 \quad \text{که زمانی } t \rightarrow 0 \quad (9)$$

### ۳-۱-۲- مدل دینامیکی دو انتگرالی

برخلاف مسائل اجماع در مدل دینامیکی تک‌انتگرالی که تمامی حالات اطلاعاتی به مقادیر ثابت و یکسانی همگرا می‌شوند، گاهی لازم است تا برخی حالات اطلاعاتی به یک مقدار ثابت همگرا شوند و بقیه حالات اطلاعاتی به مقدار ثابتی متمایز همگرا گردند که در اینصورت ناگزیر به استفاده از مدل‌های دینامیکی دو انتگرالی خواهیم بود. لازم به ذکر است که بسط الگوریتم اجماع از مدل دینامیکی تک انتگرالی به مدل دینامیکی دو انتگرالی به صورت غیر بدیهی صورت خواهد گرفت [۱۸]. مدل دو انتگرالی، یکی از ساده‌ترین مدل‌های دینامیکی برای موبایل ربات‌های همه جهت است و معادله حرکتی به شکل

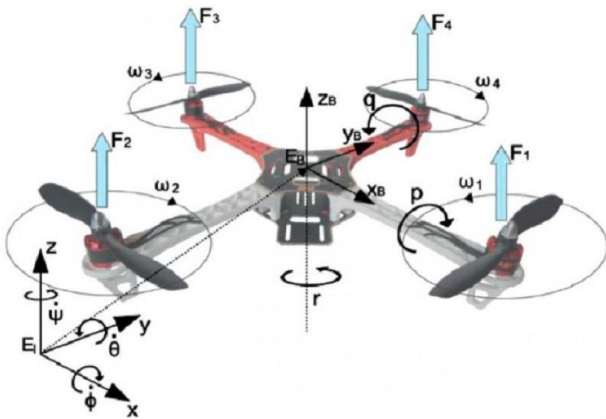
$$\begin{cases} \dot{q}_i = v_i \\ \dot{v}_i = u_i, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

طراحی شده است. سرعت های مورد نظر روتور را می توان به صورت ترکیبی خطی از چهار عبارت به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} \omega_1^{des} \\ \omega_2^{des} \\ \omega_3^{des} \\ \omega_4^{des} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_h + \Delta\omega_F \\ \Delta\omega_\phi \\ \Delta\omega_\theta \\ \Delta\omega_\psi \end{bmatrix} \quad (20)$$

که در آن سرعت اسمی روتور مورد نیاز برای معلق ماندن در حالت ثابت است و انحرافات از این بردار اسمی عبارتند از  $\Delta\omega_\psi, \Delta\omega_\theta, \Delta\omega_\phi$  و  $\Delta\omega_F$  که منجر به نیروی خالص در امتداد محور  $z_B$  می شوند.

در ادامه و مطابق شکل ۲ کنترل کننده PID<sup>۲۲</sup> را برای فرود کوادروتور طراحی و روش کنترل موقعیتی را ارائه می کنیم که از زوایای رول و گام به عنوان ورودی استفاده می کنند. به عبارتی:



شکل (۱): ساختار کوادروتور [۲۲]

$$\begin{aligned} \Delta\omega_\phi &= k_{p,\phi}(\phi^{des} - \phi) + k_{d,\phi}(p^{des} - p) \\ \Delta\omega_\theta &= k_{p,\theta}(\theta^{des} - \theta) + k_{d,\theta}(q^{des} - q) \\ \Delta\omega_\psi &= k_{p,\psi}(\psi^{des} - \psi) + k_{d,\psi}(r^{des} - r) \end{aligned} \quad (21)$$

بنابراین، در طراحی کنترلر به منظور معلق ماندن کوادروتور، ما از زاویه پیچ و رول برای کنترل موقعیت در صفحه  $x_W$  و  $y_W$  استفاده می کنیم.  $\Delta\omega_F$  و  $\Delta\omega_\psi$  به ترتیب برای کنترل زاویه انحراف و موقعیت در امتداد  $z_W$  به کار می روند. در ادامه، ما از فیدبک PID و خطای موقعیت، یعنی  $e_i = (r_{i,T} - r_i)$ ، برای تعیین  $\dot{r}_i^{des}$  مطابق زیر استفاده می کنیم.

$$\begin{aligned} (\ddot{r}_{i,T} - \ddot{r}_i^{des}) + k_{d,i}(\dot{r}_{i,T} - \dot{r}_i) + k_{p,i}(r_{i,T} - r_i) \\ + k_{i,i} \int (r_{i,T} - r_i) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

که در آن  $\dot{r}_{i,T} = \dot{r}_i = 0$  برای حالت معلق ماندن است. با خطی سازی معادله (۲۲) و ساده سازی خواهیم داشت:

می توان ربات چهارپره را به صورت یک سیستم زیر تحریک در نظر گرفت. برای بدست آوردن حرکت در راستای درجات آزادی در سیستم های زیر تحریک شونده می بایست از اثر حرکات در راستایی که عملگر وجود دارد بهره برد [۲۲].

رابطه بین نیروها و شتابها را می توان با توجه به تجزیه برداری نیروها به صورت زیر بدست آورد:

$$U_1 x = U_1 \cdot \sin(\alpha) \quad (12)$$

$$U_1 y = U_1 \cdot \cos(\alpha) = mg \quad (13)$$

$$a_x = \frac{U_1 x}{m} = g \cdot \tan(\alpha) \quad (14)$$

مطابق روابط فوق، برای رسیدن به حرکات عرضی و طولی، به ترتیب می بایست زاویه رول و زاویه پیچ را تغییر داد. اما برای تغییر ارتفاع، تغییر زوایا لازم نیست. بلکه مستقیماً با نیروی کنترلی موجود در راستای  $Z$  تغییر ارتفاع حاصل خواهد شد. ساختار یک کوادروتور را می توان در شکل ۱ مشاهده کرد.

### ۳-۲-۱- مدل موتور

هر روتور دارای سرعت زاویه ای  $\omega_i$  است و بر اساس آن نیروی عمودی  $F_i$  تولید می کند.

$$F_i = k_F \omega_i^2 \quad (15)$$

آزمایش با یک روتور ثابت در حالت پایدار نشان می دهد که  $k_F \approx 6.11 \times 10^{-8} N / rpm^2$  روتورها نیز گشتاوری مطابق زیر تولید می کنند.

$$M_i = k_M \omega_i^2 \quad (16)$$

با تطبیق عملکرد شبیه سازی با سیستم واقعی، ثابت،  $k_M$  برابر با  $1.5 \times 10^{-9} N / rpm^2$  خواهد بود.

نتایج سیستم نشان می دهد که سرعت روتور برحسب سرعت مطلوب، توسط معادله دیفرانسیل مرتبه اول تعیین می شود. به عبارتی:

$$\dot{\omega}_i = k_m(\omega_i^{des} - \omega_i) \quad (17)$$

که با تطبیق عملکرد شبیه سازی با سیستم واقعی، گین موتور حدود  $20S^{-1}$  بدست خواهد آمد. به منظور معلق ماندن کوادروتور در محل، نیروهای اسمی پرها باید به صورت زیر برآورده شوند:

$$F_{i,0} = \frac{mg}{4} \quad (18)$$

و سرعت موتور نیز توسط رابطه زیر تعیین می شود.

$$\omega_{i,0} = \omega_h = \sqrt{\frac{mg}{4k_F}} \quad (19)$$

اکنون یک کنترل کننده حالت را ارائه می کنیم که برای کنترل کوادروتور به جهت هایی که نزدیک به حالت معلق اسمی هستند

$$\dot{e}_{ij} = \frac{d}{dt}(\sqrt{\tilde{q}_{ij}^T \tilde{q}_{ij}}) = (\tilde{q}_{ij}^T \tilde{q}_{ij})^{-\frac{1}{2}} \tilde{q}_{ij}^T (u_i - u_j) = \frac{\tilde{q}_{ij}^T (u_i - u_j)}{e_{ij} + d_{ij}} \quad (25)$$

و در آن  $z_{ij} = \| \tilde{q}_{ij} \|^2 - d_{ij}^2$  استکه به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$z_{ij} = e_{ij}(e_{ij} + 2d_{ij}) \quad (26)$$

ما همچنان تابع کاندیدای لیاپانوف<sup>۲۴</sup> را به صورت زیر تعریف خواهیم کرد:

$$W(e) = \frac{1}{4} \sum_{(i,j) \in E^*} z_{ij}^2 = \frac{1}{4} z^T z \quad (27)$$

از آنجایی که  $\| \tilde{q}_{ij} \| \neq -d_{ij}$  زیرا  $\| \tilde{q}_{ij} \| \geq 0$  (با به طور معادل،  $e_{ij} \neq -2d_{ij}$  زیرا  $e_{ij} \geq -d_{ij}$ )، از (۲۶) واضح است که  $z_{ij} = 0$  اگر و تنها اگر  $e_{ij} = 0$  باشد. بنابراین، بررسی اینکه رابطه (۲۷) مثبت معین و در  $e_{ij}$  نامحدود شعاعی است، دشوار نخواهد بود.

مشق زمانی تابع کاندیدای لیاپانوف (۲۷) به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{W} = \sum_{(i,j) \in E^*} e_{ij} (e_{ij} + 2d_{ij}) \tilde{q}_{ij}^T (u_i - u_j) \quad (28)$$

با استناد به روابط (۲۵) و (۲۷)، می‌توان دریافت که:  $\dot{W} = z^T R(\tilde{q})u$  که در آن  $u = [u_1, \dots, u_2] \in R^{mm}$  بردار ورودی‌های کنترلی است. پیش از ارائه نتایج اصلی، با تعریف یک لم رابطه‌ای را برای تابع کاندیدای لیاپانوف بیان خواهیم کرد.

**لم ۱:** برای ثابت‌های نامنفی  $c$  و  $\delta$ ، مقدار  $W(e) \leq c$  معادل خواهد بود با  $\Psi(F(t)) \leq \delta$  که در آن  $\Psi$  و  $W$  به ترتیب برابر شکل‌گیری هندسی و تابع کاندیدای لیاپانوف می‌باشند.

#### اثبات:

$$\begin{aligned} \Psi(F(t)) &= \sum_{(i,j) \in E} (\|q_i - q_j\| - \|q_i^* - q_j^*\|)^2 \\ q_i \text{ که} &= \sum_{(i,j) \in E} (\|q_i - q_j\| - d_{ij})^2 \\ &= \sum_{(i,j) \in E} e_{ij}^2 \end{aligned} \quad (29)$$

و  $q_i^*$  به ترتیب موقعیت ابتدایی و نهایی عامل  $\lambda_m$  را در فرآیند شکل-گیری هندسی نمایش می‌دهد.

بنابراین، قانون کنترلی برای شکل‌گیری هندسی برابر خواهد بود با:

$$u_i = -k_v \sum_{j \in N_i(E^*)} \tilde{q}_{ij} z_{ij}, \quad i = 1, \dots, n \quad (30)$$

که در آن،  $k_v > 0$  گین کنترلی است که توسط کاربر تعیین می‌شود.

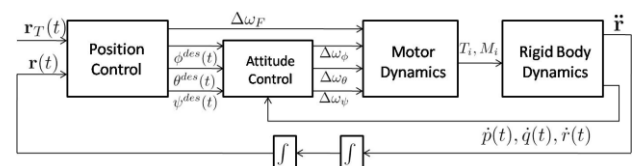
**اثبات پایداری:** با ارجاع به رابطه (۲۷)، می‌دانیم گزاره-ی  $W(e) \leq c$  بیانگر آنست که  $e_{ij}$  به ازای  $(i, j) \in E$ ، مقداری کراندار و محدود می‌باشد. این کراندار در راستای لم ۱ بیان می‌کند که  $\Psi(F(t)) \leq \delta$  که در آن ثابتی نامنفی است. در ادامه و با شرط  $\Psi(F(t)) \leq \delta$  نتیجه خواهیم گرفت که،  $e_{ij}$  به ازای  $(i, j) \in E$  مقداری کراندار و محدود دارد. به عبارتی بهتر، این گزاره بیانگر آنست که مقدار  $z_{ij}$  به ازای  $(i, j) \in E$  محدود بوده و  $W(e) \leq c$  می‌باشد که در آن  $c$  ثابتی نامنفی است.

$$\phi^{des} = \frac{1}{g} (\ddot{r}_1^{des} \sin \psi T - \ddot{r}_2^{des} \cos \psi T)$$

$$\theta^{des} = \frac{1}{g} (\ddot{r}_1^{des} \cos \psi T - \ddot{r}_2^{des} \sin \psi T) \quad (23)$$

$$\Delta \omega_F = \frac{m}{8k_F \omega_h} \ddot{r}_3^{des}$$

برای بدست آوردن ضرایب کنترل کننده PID مذکور، از تکنیک زیگلر نیکولز استفاده شده است. این تکنیک، یک روش تنظیم پارامتر PID بر اساس تجزیه و تحلیل پایداری است. در این راستا و برای بدست آوردن ضریب تناسبی  $k_p$ ، ابتدا مقادیر بهره انتگرالی و مشتقی را یکسان و معادل صفر قرار می‌دهیم،  $k_d = k_i = 0$ . در ادامه، مقدار ضریب تناسبی  $k_p$  را آنقدر افزایش می‌دهیم تا قطب‌های سیستم



شکل (۲): طراحی کنترل کننده PID

حلقه بسته روی محور موهومی  $j\omega$  قرار بگیرند. در نهایت نیز، ضریب تناسبی  $k_p$  را در ۰٫۶ ضرب کرده و ضریب تناسبی نهایی کنترل کننده بدست خواهد آمد. معادلات تنظیم ضرایب کنترل کننده عبارتند از:

$$\begin{aligned} k_p &= 0.6k_m, \\ k_d &= \frac{k_p \pi}{4\omega_m}, \\ k_i &= \frac{k_p \omega_m}{\pi}, \end{aligned} \quad (24)$$

که در آن،  $k_m$  برابر با مقدار ضریب تناسبی  $k_p$  است هنگامی که قطب‌های سیستم حلقه بسته روی محور موهومی  $j\omega$  قرار گرفته است و  $\omega_m$  نیز بیانگر فرکانس نوسان می‌باشد.  $k_m$  و  $\omega_m$  را می‌توان با روش مکان هندسی ریشه‌ها<sup>۲۳</sup> بدست آورد.

## ۴- اثبات پایداری در شکل‌گیری هندسی

### ۴-۱- عامل با مدل تک انتگرالی

همانطور که بیان شد، ما به دنبال طراحی نیروی کنترلی  $u_i = u_i(q_i - q_j, d_{ij})$ ،  $i = 1, \dots, n$  هستیم که ورودی‌های  $u_i$  مستقیماً فواصل  $(i, j) \in E^*$  را کنترل کنند. بنابراین، آنها فقط می‌توانند مستقیماً اطمینان حاصل کنند که،  $\|q_i - q_j\| \rightarrow d_{ij}$  برای ساده کردن نمادگذاری در مشتقات، موقعیت نسبی دو عامل و خطای فاصله را به ترتیب، به صورت  $\tilde{q}_{ij} = q_i - q_j$  و  $e_{ij} = \| \tilde{q}_{ij} \| - d_{ij}$  تعریف می‌کنیم. در ادامه، می‌توان روابط را مجدداً به صورت زیر بازنویسی کرد:

## ۲-۴- عامل با مدل دو انتگرالی

روابط مرتبط با کنترل شکل گیری در بخش های قبل بیان شد. در ادامه، می توان دینامیک های خطای فاصله را مطابق زیر بدست آورد:

$$\dot{e}_{ij} = \frac{\dot{q}_{ij}^T (v_i - v_j)}{e_{ij} + d_{ij}} \quad (31)$$

که نتیجه می دهد:

$$\dot{W} = \frac{1}{2} z^T \dot{z} = z^T R(\tilde{q})v \quad (32)$$

و در آن  $v = [v_1, \dots, v_n] \in R^m$  است.

لازم به ذکر است که  $v$  در این رابطه را نمی توان مستقیماً بدست آورد زیرا یک حالت سیستم است، به همین دلیل ما از تکنیک backstepping پیروی کرده و متغیر زیر را معرفی می کنیم.

$$s = v - v_f \quad (33)$$

که در آن  $v_f \in R^m$  سرعت ورودی مطلوب را نشان می دهد. همچنین، متغیر  $s$  بیانگر خطای بین سرعت فعلی و سرعت مطلوب را نشان می دهد. در این مسئله و برای اثبات پایداری، ما از تابع کاندیدای لیاپوف زیر بهره می گیریم.

$$W_d(e, s) = W(e) + \frac{1}{2} s^T s \quad (34)$$

با مشتق گرفتن از این رابطه، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{W}_d &= z^T R(\tilde{q})v + s^T \dot{s} \\ &= z^T R(\tilde{q})(s + v_f) + s^T (u - \dot{v}_f) \\ &= z^T R(\tilde{q})v_f + s^T (u + R^T(\tilde{q})z - \dot{v}_f) \end{aligned} \quad (35)$$

کنترل کننده مورد نیاز برای دستیابی به کنترل شکل گیری هندسی در این بخش، دارای فرم کلی  $j \in N_i(E^*)$  و  $u_i = u_i(q_i - q_j, v_i - v_j, v_i, d_{ij})$ ،  $i = 1, \dots, n$  می باشد.

نیروی کنترلی در این حالت برابر با  $u = -k_a s + \dot{v}_f - R^T(\tilde{q})z$  بوده که در آن  $v_f = u_a$  و  $k_a > 0$  نیز گین کنترلی تعریف شده توسط کاربر خواهد بود. عبارت  $\dot{v}_f$  موجود در نیروی کنترلی  $u = -k_a s + \dot{v}_f - R^T(\tilde{q})z$  به صورت زیر بدست می آید:

$$\dot{v}_f = -k_v \dot{R}^T z - k_v R^T \dot{z} \quad (36)$$

$$\dot{R}(\tilde{q}) = R(\tilde{v}) \quad (37)$$

روابط کنترلی مذکور را به ازای  $i = 1, \dots, n$  می توان به فرم زیر بازنویسی کرد.

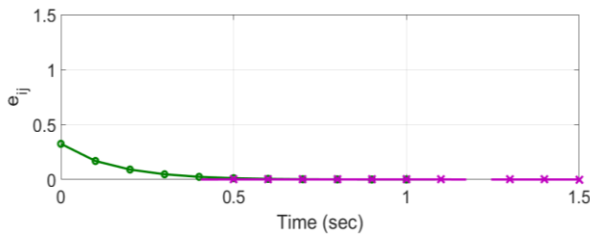
$$u_i = -k_a v_i - \sum_{j \in N_i(E^*)} [(k_a k_v + 1) \tilde{q}_{ij} z_{ij} + k_v (z_{ij} I_2 + 2 \tilde{q}_{ij} \tilde{q}_{ij}^T) \tilde{v}_{ij}] \quad (38)$$

همچنین  $\tilde{v}_{ij} = v_i - v_j$ ،  $(i, j) \in E^*$

## ۵- نتایج و شبیه سازی

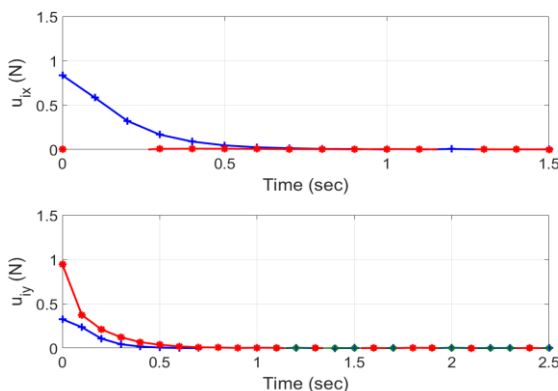
در روابط بیان شده، تعداد عامل ها را می توان برابر با هر مقدار دلخواهی در نظر گرفت. ما در این مقاله، تعداد عامل ها را به صورت پیش فرض

یکبار برابر با ۳ و بار دیگر برابر با ۵ در نظر گرفته و نتایج را برای هر یک ترسیم خواهیم کرد. خطای فاصله بین عامل ها و نیروی کنترلی در سناریوی شکل گیری هندسی با مدل های دینامیکی تک انتگرالی و برای سیستمی با تعداد ۳ و ۵ عامل به ترتیب در شکل های ۳ و ۴ و شکل های ۵ و ۶ نمایش داده شده اند. همچنین تمامی نتایج در محیط متلب شبیه سازی و خطای فاصله بین عامل ها،  $e_{ij}$ ، به عنوان معیار ارزیابی در نظر گرفته شده است.



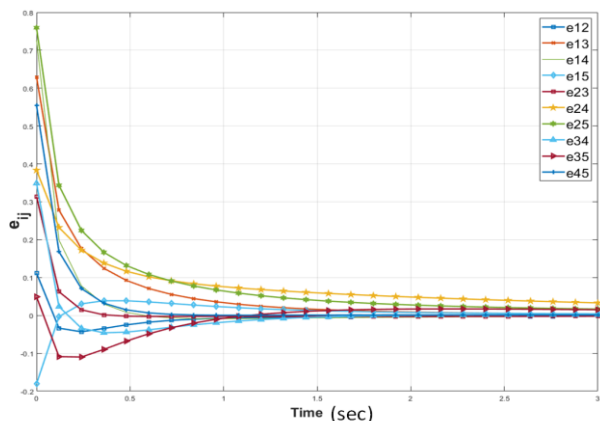
شکل (۳): خطای بین عامل های تک انتگرالی در شکل گیری هندسی متشکل از ۳ عامل

برای حالتی که تعداد عامل ها برابر ۳ می باشد، موقعیت اولیه عامل ها در مختصات دکارتی  $(x, y)$  به صورت  $(0.3010, 0.5292)$ ،  $(-0.5222, 0.5393)$  و  $(-0.8213, -0.9305)$  بوده و موقعیت نهایی آن ها نیز در شکل گیری برابر  $(0, 1)$ ،  $(-\sin(2\pi/5), \cos(2\pi/5))$  و  $(-\sin(4\pi/5), -\cos(\pi/5))$  در نظر گرفته شده است.

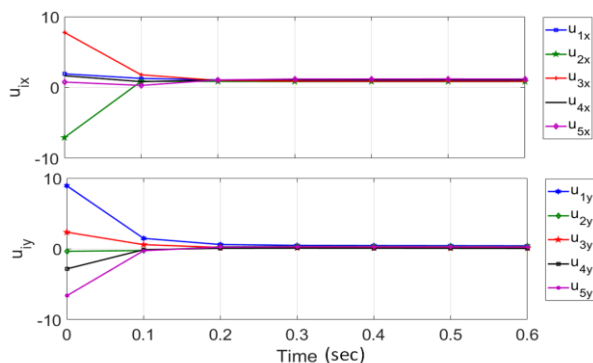


شکل (۴): نیروی بین عامل های تک انتگرالی در شکل گیری هندسی متشکل از ۳ عامل

کنترل شکل‌گیری هندسی در مدل دینامیکی دو انتگرالی، یک کنترل غیرمتمرکز است زیرا اجرای آن فقط به هر عاملی نیاز دارد که سرعت خود و موقعیت نسبی و سرعت نسبی را نسبت به عوامل همسایه اندازه‌گیری کند. سرعت عامل را می‌توان با استفاده از حسگرهای داخلی مانند کیلومتر شمار و قطب‌نما اندازه‌گیری کرد. خطای بین عامل‌ها و نیروی کنترلی هر یک در سناریوی شکل‌گیری هندسی با مدل‌های دینامیکی دو انتگرالی، به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده شده‌اند.

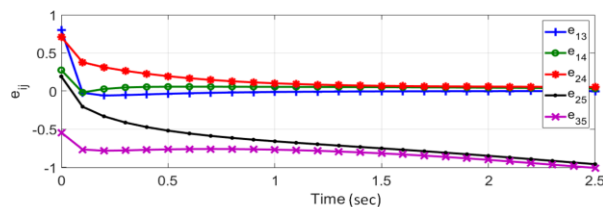
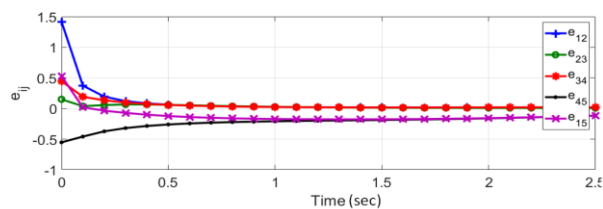


شکل (۸): خطای بین عامل‌های دو انتگرالی در شکل‌گیری هندسی متشکل از ۵ عامل

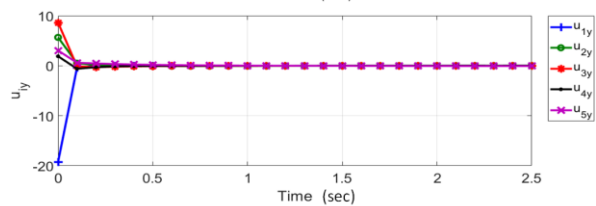
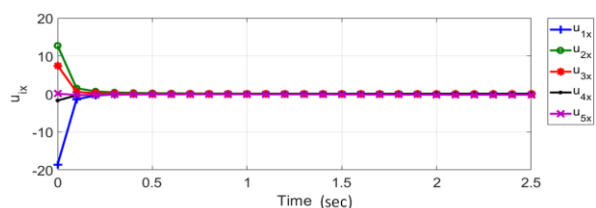


شکل (۹): نیروی بین عامل‌های دو انتگرالی در شکل‌گیری هندسی متشکل از ۵ عامل

در شکل ۱۰، خروجی مربوط به کنترل کوادروتور و نحوه فرود بر روی ربات‌ها نمایش داده شده است. همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در این حالت فرض بر آنست که زمان و مکان فرود کوادروتور برای تمامی ربات‌ها از قبل تعیین شده و عامل‌ها می‌توانند در هر لحظه از زمان با یکدیگر ارتباط برقرار کرده و اطلاعات خود را برای یکدیگر ارسال کنند. به بیانی دقیق‌تر، مختصات نقطه فرود کوادروتور در مرکز شکل هندسی تشکیل شده توسط عامل‌های زمینی می‌باشد. به عنوان مثال، اگر تعداد عامل‌های زمینی برابر با ۴ بوده و تشکیل یک مربع را بدهند، آنگاه مکان فرود کوادروتور برابر با نقطه تلاقی قطرهای مربع مذکور خواهد بود.

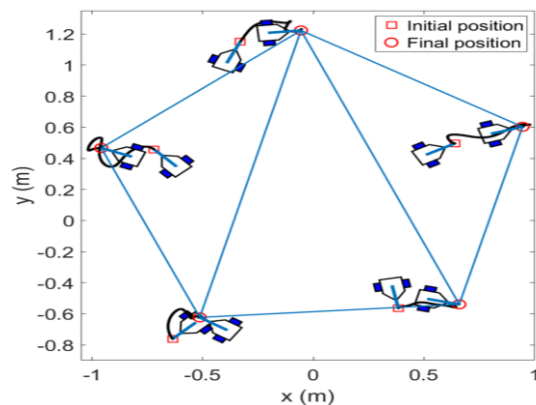


شکل (۵): خطای بین عامل‌های تک انتگرالی در شکل‌گیری هندسی متشکل از ۵ عامل



شکل (۶): نیروی بین عامل‌های تک انتگرالی در شکل‌گیری هندسی متشکل از ۵ عامل

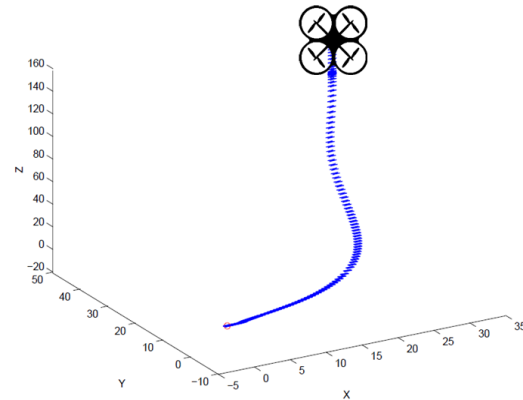
نحوه حرکت عامل‌ها به منظور تشکیل شکل‌گیری هندسی، در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این شکل‌گیری، موقعیت اولیه‌های اول تا پنجم به ترتیب برابر  $(-0.4201, 1.09)$ ،  $(-0.712, 0.431)$ ،  $(-0.664, -0.723)$ ،  $(0.407, -0.561)$  و  $(0.635, 0.529)$  بوده و موقعیت نهایی هر یک نیز به ترتیب برابر با  $(-0.901, 1.193)$ ،  $(-\sin(2\pi/5), \cos(2\pi/5))$ ،  $(\sin(4\pi/5), -\cos(4\pi/5))$  و  $(\sin(2\pi/5), \cos(2\pi/5))$  است.



شکل (۷): مسیر حرکت ربات‌ها در تشکیل شکل‌گیری هندسی



- [4] Glorennec, P. Y., "Fuzzy logic-based navigation for an autonomous robot," IFAC Proc. Vol., vol. 29, no. 4, pp. 45–49, 1996.
- [5] Amirkhani, A., Barshooi, A.H. Consensus in multi-agent systems: A review. *Artif. Intell. Rev.* 2021, 1–39
- [6] Ding, T.-F., Ge, M.-F., Xiong, C.-H., Park, J. H., and Li, M., "Second-order bipartite consensus for networked robotic systems with quantized-data interactions and time-varying transmission delays," *ISA Trans.*, vol. 108, pp. 178–187, 2021.
- [7] Hu, J., et al., "Finite-time consensus for multi UAV system with collision avoidance," in 2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), 2017, pp. 517–522.
- [8] Ren, W., and Beard, R. W., *Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control*, vol. 27, no. 2. Springer, 2008.
- [9] Ando, H., Oasa, Y., Suzuki, I., and Yamashita, M., "Distributed memoryless point convergence algorithm for mobile robots with limited visibility," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 15, no. 5, pp. 818–828, 1999.
- [10] Huang, Z., "Consensus control of multiple-quadcopter systems under communication delays," 2017.
- [11] Mirzaei F, Pouyan A A. A Review of Swarm Robotic and Its Place in Multi -Robotic Systems, *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers (JIAEEE)*, vol. 17, no. 2, pp. 53-72, 2020.
- [12] Dinarvand N, Norouzi M, Dosaranian-Moghadam M. A real time optimization-based SLAM for indoor UAV flying robots. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers (JIAEEE)*, vol. 18, no. 4, pp. 197-205, 2021.
- [13] Rodriguez-Ramos, A., Sampedro, C., Bavle, H., De La Puente, P., & Campoy, P. (2019). A deep reinforcement learning strategy for UAV autonomous landing on a moving platform. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 93, no. 1, pp. 351-366, 2019.
- [14] Balch, T., & Arkin, R. C. Communication in reactive multiagent robotic sys. *Autonomous robots*, 1(1), 27-52.
- [15] Bollobás, B. *Modern graph theory*, vol. 184. Springer Science & Business Media, 2013.
- [16] Bondy, J. A., and Murty, U. S. R., *Graph theory with applications*, vol. 290. Macmillan London, 1976.
- [17] Lin, J., Morse, A. S. and Anderson, B. D. O. "The multi-agent rendezvous problem," in 42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No. 03CH37475), 2003, vol. 2, pp. 1508–1513.
- [18] Han, T., Guan, Z.-H., Chi, M., Hu, B., Li, T., and Zhang, X.-H., "Multi-formation control of nonlinear leader-following multi-agent systems," *ISA Trans.*, vol. 69, pp. 140–147, 2017.
- [19] Dong, X., Zhou, Y., Ren, Z., and Zhong, Y., "Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles with switching interaction topologies," *Control Eng. Pract.*, vol. 46, pp. 26–36, 2016.
- [20] Zhao, H., Peng, L., and Yu, H., "Quantized model-free adaptive iterative learning bipartite consensus tracking for unknown nonlinear multi-agent systems," *Appl. Math. Comput.*, vol. 412, p. 126582, 2022.
- [21] Anggraeni, P., Candra, W. A., Defoort, M., and Djemai, M., "Experimental Implementation of Fixed-Time Leader-Follower Axial Alignment Tracking," in 2019 International Conference on Mechatronics, Robotics and Systems Engineering (MoRSE), 2019, pp. 86–91.
- [22] Luo, C., Du, Z. and Yu, L., "Neural network control design for an unmanned aerial vehicle with a suspended payload", *Electronics*, vol. 8, no. 9, pp. 931, Aug. 2019.



شکل (۱۰): مسیر حرکت کوادروتور

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله به مسئله کنترل شکل گیری موبایل رباتها به منظور ایجاد بستری مناسب برای فرود عملی پرنده پرداختیم. فرض بر آن بوده است که، کوادروتوری در محیط به صورت معلق وجود داشته و به دلایلی تصمیم به فرود می گیرد در حالی که بستری مناسب جهت فرود در اختیار ندارد. در این زمان، رباتهای متحرکی که هریک از آنها به سطوحی مسطح مجهز شده اند، با ارتباط و تعامل با یکدیگر، در نقطه ای مشخص جمع شده و آرایش مناسبی را شکل می دهند. در تحقیقات پیشین، فرض بر آن بوده که وسیله هوایی قابلیت فرود بر روی یک وسیله نقلیه منفرد را دارد. همچنین مسئله طراحی کنترل کننده برای فرود کوادروتور روی بستری متشکل چند ربات تاکنون بررسی نشده است.

علاو بر تحقیقات گسترده در زمینه اجماع، چالش ها و موضوعات حل نشده ی بسیاری همچنان وجود دارند. از یک سو، اکثر تحقیقات ارائه شده در این حوزه به مطالعات نظری متکی بوده و نتایج و نوآوری ها صرفاً با شبیه سازی اثبات می شوند و کمتر به پیاده سازی پرداخته شده است. این در حالی است که در پیاده سازی، فاکتورهای مختلفی همچون نویز سنسورها، تاخیر زمانی سنسورها، تداخل ارتباطات و اغتشاشات خارجی تاثیر مخربی بر روی سیستم گذاشته و عملکرد آن را مختل می کند. در کارهای آتی، می خواهیم به پیاده سازی رویکرد پیشنهادی خود در جهان واقعی بپردازیم.

## مراجع

- [1] Zhu, J., Lu, J., and Yu, X., "Flocking of multi-agent non-holonomic systems with proximity graphs," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 60, no. 1, pp. 199–210, 2012.
- [2] Partridge, B. L., "The chorus-line hypothesis of maneuver in avian flocks," *Nature*, vol. 309, no. 6, pp. 344–345, 1984.
- [3] Olfati-Saber, R., "Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 51, no. 3, pp. 401–420, 2006.

[۲۳] یوسفی، کاظمی، "کنترل چهار پره با بار آویزان به وسیله کنترل کننده مدل داخلی و شکل‌دهی ورودی جهت کاهش نوسانات بار." Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers (JIAEEE), vol. 19, no. 3, 2021.

## زیرنویس‌ها

- <sup>1</sup> Multi-agent Systems
- <sup>2</sup> Consensus
- <sup>3</sup> Unmanned Aerial Vehicles
- <sup>4</sup> Wireless Sensor Networks
- <sup>5</sup> Leader-Follower
- <sup>6</sup> Formation Control
- <sup>7</sup> Target Interception
- <sup>8</sup> Computer Vision
- <sup>9</sup> Machine Learning
- <sup>10</sup> Behavioral Structure
- <sup>11</sup> Virtual Structure
- <sup>12</sup> Ground Effect
- <sup>13</sup> Undirected Graph
- <sup>14</sup> Laplacian Matrix
- <sup>15</sup> Single Integrator
- <sup>16</sup> Double Integrator
- <sup>17</sup> High Order
- <sup>18</sup> Swedish Wheel
- <sup>19</sup> Global Positioning System
- <sup>20</sup> Zigbee Network
- <sup>21</sup> Gain
- <sup>22</sup> Proportional-Integral-Derivative
- <sup>23</sup> Root Locus
- <sup>24</sup> Lyapunov function candidate

