

کنترل آرایشی مجموعه کوادروتور به روش پیشرو- پیرو با استفاده از کنترلگر مد لغزشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۳

علیرضا طلوعی^۱، مرضیه حبیبی^۲، رضا قاسمی^۳، فاطمه قادری^۴

۱- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، toloei@sbu.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۳- دانشیار، مهندسی برق، دانشگاه قم، قم

۴- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده

این مقاله باهدف ردیابی مسیر مشخصی توسط سه کوادروتور با حفظ شکل مثلثی در طول مسیر با در نظر گرفتن اغتشاشات وارد بر سیستم تدوین شده است. با توجه به دینامیک غیرخطی کوادروتور و وجود اغتشاشات در سیستم، برای کنترل مستقل کوادروتور از کنترل کننده مد لغزشی استفاده شد. نتایج شبیه سازی حاصل از طراحی کنترل کننده مد لغزشی، وقوع پدیده چترینگ را در فرمان های کنترلی نشان داد که برای حذف آن از روش تقریب توابع پیوسته استفاده شد و شبیه سازی های حاصل از این روش بیانگر حذف چترینگ در فرمان های کنترلی و ردیابی نرم و بدون نوسان در سیگنال های کنترلی بود، همچنین نتایج شبیه سازی کنترل آرایش بندی در قالب سه مأموریت آمده است. نتایج شبیه سازی گویای این است که با افزایش تعداد کوادروتورها، کنترل آرایش بندی همچنان با موفقیت انجام شده است. نتایج این سه مأموریت با مسیرهای متفاوت، هندسه آرایش بندی متفاوت و تعداد کوادروتورهای متفاوت بیانگر پیروزی پیروها از پیشرو و موفقیت کنترل آرایش بندی است.

واژه های کلیدی: کنترل آرایش بندی، روش پیشرو-پیرو، کنترل آرایش بندی غیرمتمرکز، کنترل کوادروتور، کنترل غیرخطی

Formation control of multi-quadrotor using leader-follower method based on sliding mode

Alireza Toloee¹, Marziyeh Habibi², Reza Ghasemi³, Fatemeh Ghaderi⁴

1- Professor, faculty of new technologies and aerospace engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, toloei@sbu.ac.ir

2- Graduated Student, faculty of new technologies and aerospace engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

3- Professor, faculty of engineering, Qom University, Qom

4- PhD Student, faculty of new technologies and aerospace engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract

In this paper, formation tracking control by maintaining a triangular shape for three quadrotors is discussed. Because of the nonlinear dynamic of the quadrotor and the presence of the external disturbance in the quadrotor dynamic model, a sliding mode controller was used for independent control of the quadrotor. Also, the results of the simulation of formation control are presented in the form of three missions. In the first mission, the formation of three triangular quadrotors along the spiral path has been successfully controlled. In the second mission, the three quadrotors linearly trace the s-shaped path. The simulation results showed that the followers followed the leader and the formation was successfully performed. The third mission is the same as the previous one, except that the number of followers has increased to five. The simulation results show that with increasing the number of quadrotors, the formation control is still performed successfully. The results of these three missions with different paths, different geometry and number of different quadrotors indicate that the followers follow the leader and succeed in controlling the formation.

Keywords: formation control, Lead-follower, decentralized formation control, quadrotor control, nonlinear control

۶۳

سال ۱۳ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۲

نشریه علمی

دانش و فناوری هوافضا



با الهام از ایده توزیع شده، الگوریتم‌های کنترل توزیع شده متعددی برای مسئله کنترل آرایشی بدون رهبر کوادروتورها متعدد پیشنهاد شده‌اند. به‌عنوان مثال، با در نظر گرفتن موضوع ارتباط متناوب و تأخیری، یک الگوریتم کنترل توزیع شده در [۱۳] توسعه داده شد، به‌طوری‌که آرایش بدون رهبر سیستم‌های زیر تحریک حاصل شد. برای حصول همین هدف، الگوریتم کنترل توزیع شده دیگری با مکانیزم حفظ اتصال توپولوژی در [۱۴] بر روی یک توپولوژی شبکه مبتنی بر فاصله پیشنهاد شد. علاوه بر این، با در نظر گرفتن یک الگوی شکل‌گیری متغیر با زمان، دو استراتژی کنترل توزیع شده در [۱۵، ۱۶] برای گروهی از کوادروتورها طراحی شد به‌طوری‌که آن‌ها موفق به تکمیل مانور تشکیل بدون رهبر شدند. علاوه بر این، یک طرح کنترل تشکیلات بدون رهبر توزیع شده در [۶] بر روی توپولوژی شبکه سوئیچینگ پیشنهاد شد که به یک عضو خاص اجازه می‌دهد در یک دوره زمانی با دیگران تعامل نداشته باشد.

هنگامی که کنترل تشکیل رهبر-پیرو در نظر گرفته می‌شود، مسئله در دسترس بودن جزئی اطلاعات مرجع مربوط به یک رهبر با تکنیک توزیع شده قابل حل است. به‌طور خاص، برای کنترل رهبر-پیرو کوادروتور، یک رویکرد کنترل توزیع شده در [۷] با معرفی تخمین‌گرهای توزیع شده برای به دست آوردن اطلاعات مرجع طراحی شد. الگوریتم کنترل توزیع شده دیگری در [۱۷] برای ردیابی آرایش پروازی رهبر پیرو چندگانه کوادروتور پیشنهاد شد. علاوه بر این، یک الگوریتم کنترل توزیع شده ناهموار در [۱۸] توسعه داده شد، به‌طوری‌که ردیابی کنترل

کوادروتورها با توانایی مانور و قابلیت اطمینان بالا و تطبیق‌پذیری زیاد، به‌طور گسترده در زمینه‌های نظامی و غیرنظامی مانند عملیات ضد تروریسم، شناسایی، اکتشاف، کشاورزی و غیره استفاده شده‌اند [۱]. علاوه بر این، به‌جای استفاده از یک کوادروتور، کوادروتورهای متعدد در یک آرایش گروهی بدون هزینه‌های گزاف قادر به تکمیل برخی از مأموریت‌های پیچیده هستند [۲، ۳].

باین‌حال، در عمل مسیری دوگانه برای دستیابی به کنترل آرایشی کوادروتورها وجود دارد. از یک طرف، از منظر دینامیکی، ماهیت غیرخطی زیر تحریک کوادروتور، توسعه کنترل را پیچیده می‌کند [۴، ۵]. از سوی دیگر، از منظر کنترل آرایشی، تعامل اطلاعاتی بین کوادروتورها اغلب در سناریوهای عملی محلی است به این معنا که هر کوادروتور فقط با همسایگان خود تعامل دارد [۶]؛ بنابراین، توسعه الگوریتم‌های کنترل با عملکرد بالا برای کنترل آرایشی کوادروتورها همچنان چالش برانگیز است. از سوی دیگر، کنترل آرایشی کوادروتورهای متعدد به‌طور کلی به دودسته بدون رهبر و رهبر-پیرو دسته‌بندی می‌شود [۷]. در مسئله کنترل آرایشی بدون رهبر، کوادروتورها به سمت یک الگوی تعیین شده با سرعت خاصی سوق داده می‌شوند، درحالی‌که در مسئله کنترل رهبر-پیرو، کوادروتورهای پیرو درحالی‌که الگوی تعیین شده را حفظ می‌کنند، در مورد اطلاعات مرجع مربوط به یک رهبر به توافق می‌رسند. علاوه بر این، ایده توزیع شده برای آرایش چندعاملی [۸، ۱۲] به‌صورت محلی اعضای درگیر را برای دستیابی به یک هدف کلی هماهنگ می‌کند، با این ایده، مسئله تعامل محدود کنترلی آرایشی را می‌توان به‌طور مؤثر



رهبر-پیرو کوادروتور حاصل شد. علاوه بر این، با یک استراتژی زیر بهینه H^∞ ، الگوریتم کنترل رهبر پیرو توزیع شده در [۱۹] طراحی شده که در برابر اختلالات و عدم قطعیت‌های پارامتری مقاوم است. علاوه بر این، یک کنترل ترکیبی بازخورد غیرخطی (CNF) در [۲۰] برای ردیابی شکل‌گیری رهبر-پیرو کوادروتور توسعه داده شد، به طوری که ردیابی را بهبود بخشید. همچنین با در نظر گرفتن همگرایی زمان محدود و مقاوم در برابر اغتشاش، یک چارچوب کنترل سلسله مراتبی برای آرایش رهبر-پیرو سیستم کوادروتور در [۲۱] پیشنهاد شد. علاوه بر این، با معرفی یک شبکه عصبی تطبیقی مبتنی بر مشاهده‌گر، یک طرح کنترل توزیع شده در [۲۲] برای کنترل رهبر-پیرو چند کوادروتور بر روی یک توپولوژی سوئیچینگ هدایت شده پیشنهاد شد. در [۲۳]، با توسل به یک ناظر توزیع شده زمان محدود برای بازسازی اطلاعات رهبر برای هر کوادروتور، ردیابی کنترل آرایش پروازی رهبر-پیرو کوادروتور توسط الگوریتم کنترل توزیع شده پیشنهادی به دست آمد. اگرچه طرح‌های کنترل توزیع شده پیشنهاد شده در [۱۷، ۲۳] ردیابی کنترل آرایشی رهبر-پیرو به صورت سلسله مراتبی را اقلع می‌کند، اما استخراج فرمان کنترلی ممکن است باعث تکینگی و چترینگ شود که ممکن است باعث ایجاد مشکل پیاده‌سازی در کاربردهای عملی شود.

این مقاله با هدف ردیابی مسیر مشخصی توسط سه کوادروتور با حفظ شکل مثلثی در طول مسیر تدوین شده است. در اینجا مدل دینامیکی کوادروتور به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده و اغتشاشات وارد بر سیستم کوادروتور نیز لحاظ شده است. با توجه به حضور اغتشاشات

در سیستم در این مقاله کنترل مد لغزشی مرتبه اول برای کنترل مستقل کوادروتورها اعمال شده است. در ادامه با استفاده از روش تقریب توابع پیوسته پدیده چترینگ در فرمان‌های کنترلی حذف شد. برای کنترل آرایش بندی نیز، روش کنترل آرایش بندی غیرمتمرکز به کار رفته است. در این روش برای هر عامل یک کنترل کننده در نظر گرفته شده است و مشکل از کارافتادن کنترل کننده مرکزی که در کنترل متمرکز باعث شکست در آرایش بندی می‌شود، برطرف شده است. در بین الگوهای آرایش بندی که شامل پیشرو-پیرو، ساختار مجازی و مبتنی بر رفتار... هستند، از الگوی کنترل آرایش بندی پیشرو-پیرو به دلیل فهم آسان و عملی‌تر بودن آن در پیاده‌سازی، استفاده شده است. در این روش در هر لحظه هر دو کوادروتور پیرو یک فاصله و یک زاویه ثابت را نسبت به کوادروتور رهبر حفظ می‌کنند. به منظور کنترل آرایش بندی با توجه به الگوی انتخاب شده، دینامیک خطای آرایش بندی به دست آمد و کنترل کننده مد لغزشی انتگرالی بر روی آن اعمال شد. به طور خلاصه در بخش 2 مدل‌سازی شش درجه آزادی کوادروتور در قسمت بعدی کنترل مد لغزشی و پروسه حذف چترینگ آمده است. در ادامه کنترل آرایش بندی و در آخر نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده است.

۲. مدل‌سازی کوادروتور بر اساس زوایای اوپلر

مدل کوادروتور بر اساس زوایای اوپلر را به دو روش نیوتن- اوپلر و اوپلر - لاگرانژ می‌توان به دست آورد. در اینجا مدل کوادروتور طبق روش نیوتن اوپلر به دست آمده است.

معادله زیر سرعت زاویه‌ای موتورها و بردار



$$E_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & b & b & b \\ 0 & -bl & 0 & bl \\ -bl & 0 & bl & 0 \\ -d & d & -d & d \end{bmatrix} \quad (3)$$

معادلات دینامیکی غیرخطی و کوپل کوادروتور در زیر آمده است [24]:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= (v r - w q) + g s_\theta \\ \dot{v} &= (w p - u r) - g c_\theta s_\phi \\ \dot{w} &= (u q - v p) - g c_\theta s_\phi + \frac{U_1}{m} \\ \dot{p} &= \frac{I_{YY} - I_{ZZ}}{I_{XX}} q r - \frac{J_{Tp}}{I_{XX}} q \Omega + \frac{U_2}{I_{XX}} \\ \dot{q} &= \frac{I_{ZZ} - I_{XX}}{I_{YY}} p r + \frac{J_{Tp}}{I_{YY}} p \Omega + \frac{U_3}{I_{YY}} \\ \dot{r} &= \frac{I_{XX} - I_{YY}}{I_{ZZ}} p q + \frac{U_4}{I_{ZZ}} \end{aligned} \quad (4)$$

در این معادلات J_{TP} ممان اینرسی چرخشی کل حول محور ملخ، (u, v, w) سرعت خطی، (p, q, r) سرعت زاویه‌ای و I_{xx} ، I_{yy} و I_{zz} به ترتیب ممان‌های اینرسی حول محور x ، y و z هستند که مقادیر آنها در جدول ۱ آمده است. همچنین U_1 ، U_2 ، U_3 و U_4 ، سیگنال‌های کنترلی تراکتل، رول، پیچ و یاو، از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} U_1 &= b (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ U_2 &= l b (-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\ U_3 &= l b (-\Omega_1^2 + \Omega_3^2) \\ U_4 &= d (-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ \Omega &= -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 \end{aligned} \quad (5)$$

همان‌طور که معادلات دینامیکی نشان می‌دهند، کوادروتور یک سیستم چند ورودی-چند خروجی با شش درجه آزادی و چهار ورودی کنترلی یک نیرو U_1 و سه گشتاور (U_2, U_3, U_4) در مختصات تعمیم‌یافته است. در نتیجه کوادروتور یک سیستم زیرتحرک است و تنها می‌تواند مسیر مطلوب در چهار درجه آزادی را به صورت مستقل دنبال کند.

سرعت ملخ را معرفی می‌کند (شکل ۱):

$$\Omega = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 \quad \text{و} \quad \Omega = \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \\ \Omega_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

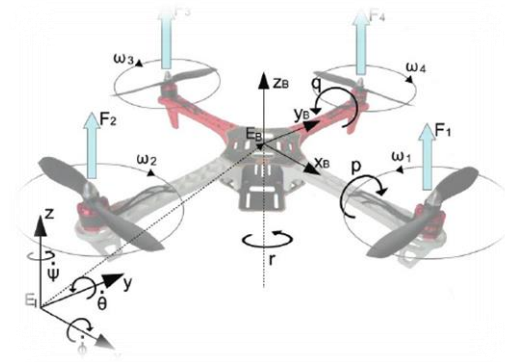
Ω_1 سرعت ملخ جلویی، Ω_2 سرعت ملخ سمت راست، Ω_3 سرعت ملخ عقبی و Ω_4 سرعت ملخ سمت چپ است.

معادله زیر تأثیر بردار حرکت را بر دینامیک کوادروتور نشان می‌دهد.

$$U_B(\Omega) = E_B \Omega^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ bl(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ bl(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ d(\Omega_2^2 + \Omega_4^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{bmatrix}$$

که در آن فاصله بین مرکز جرم کوادروتور و مرکز جرم ملخ b ضریب نیروی تراست و d ضریب نیروی درگ است. ارتباط آنها با سرعت ملخ‌ها از طریق محاسبات آئرو دینامیکی به دست می‌آید. ماتریس ثابت E_B که نشانگر ماتریس حرکت است که در مربع سرعت ملخ‌ها Ω^2 ضرب شده و بردار حرکت $U_B(\Omega)$ را تولید می‌کند، به صورت زیر تعریف می‌شود.



شکل ۱. جهت چرخش موتورها



جدول ۱. مشخصات کوادروتور مورد استفاده در

شبیه‌سازی

پارامتر	توضیح	مقدار
I_{xx}	ممان اینرسی محور x	$11 \times 10^{-2} \text{ kg m}^2$
I_{yy}	ممان اینرسی محور y	$19 \times 10^{-2} \text{ kg m}^2$
I_{zz}	ممان اینرسی محور z	$1.3 \times 10^{-2} \text{ kg m}^2$
J_{Tp}	ممان اینرسی محور روتور	$6 \times 10^{-5} \text{ kg m}^2$
m	جرم کوادروتور	3.23 kg
l	طول بازو	0.23 m
b	ضریب نیروی تراست	$3.13 \times 10^{-5} \text{ N s}^2$
d	ضریب نیروی درگ	$7.5 \times 10^{-7} \text{ N m s}^2$

$$\begin{aligned} S_\varphi &= \ddot{\varphi} + \lambda_\varphi \dot{\varphi} \\ S_\theta &= \ddot{\theta} + \lambda_\theta \dot{\theta} \\ S_\psi &= \ddot{\psi} + \lambda_\psi \dot{\psi} \\ S_x &= \ddot{x} + \lambda_x \dot{x} \\ S_y &= \ddot{y} + \lambda_y \dot{y} \\ S_z &= \ddot{z} + \lambda_z \dot{z} \end{aligned} \quad (9)$$

پایداری لیاپانوف سطح لغزش، پایداری حالت‌های سیستم را تأمین خواهد کرد؛ بنابراین با در نظر گرفتن تابع مناسب لیاپانوف به صورت زیر و بررسی تغییرات آن قانون کنترلی برای دستیابی به پایداری مجانبی طراحی خواهد شد.

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} s^2 \\ \dot{V} &= s \dot{s} \end{aligned} \quad (10)$$

در نتیجه، سطح لغزش s به سمت صفر همگرا خواهد شد تنها اگر:

$$s \dot{s} < 0 \quad (11)$$

معادله بالا یک شرط بر روی متغیر لغزش s و مشتق اول آن نشان می‌دهد و یک شرط رسیدن است. اگر s ، هر یک از معادلات زیر را ارضا کند، به طوری که k_1 و k_2 ثابت‌های مثبت باشند، s شرط رسیدن را ارضا می‌کند.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= -k_1 s \\ \dot{s} &= -k_2 \text{sign}(s) \\ \dot{s} &= -k_1 s - k_2 \text{sign}(s) \end{aligned} \quad (12)$$

کنترل‌کننده مد لغزشی از دو قسمت کنترل معادل و کنترل ناپیوسته تشکیل می‌شود:

$$u = u_{eq} + u_{dis} \quad (13)$$

که u_{eq} از برابر صفر قرار دادن مشتق سطح لغزش و u_{dis} از اقناع شرط پایداری لیاپانوف سطح لغزش حاصل می‌شود. با قرار دادن \dot{s} به صورت توابع بالا، کنترل ناپیوسته را می‌توان به صورت یکی از توابع زیر در نظر گرفت:

$$u_{disc} = -k_2 \text{sign}(s) \quad (14)$$

$$u_{disc} = -k_1 s - k_2 \text{sign}(s) \quad (15)$$

۳. طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی مرتبه اول برای سیستم کوادروتور

سیستم غیرخطی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\dot{x}^{(n)}(t) = f(x, t) + g(x, t)u(t) + d(t) \quad (6)$$

که در آن $d(t)$ نامعینی یا اغتشاش سیستم است.

$$d(t) \leq D \quad (7)$$

که در آن D بیشینه اغتشاش است و یک عدد مثبت است. برای طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی، ابتدا لازم است سطح لغزشی به صورت جمع وزن دار خطای متغیرهای حالت، به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{x} \quad (8)$$

که در آن λ یک مقدار ثابت بزرگ‌تر از صفر است و:

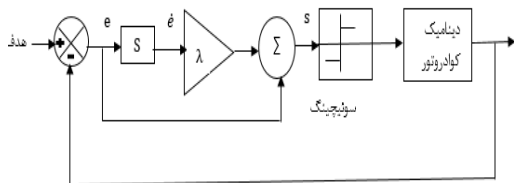
$$\tilde{x} = x - x_d$$

در نتیجه سطوح لغزش برای متغیرهای حالت کوادروتور به صورت زیر در نظر گرفته شده است:
[۲۵]



$$\begin{aligned}
 U_1 &= \frac{I_{xx}}{I} \left(-\frac{(I_{yy} - I_{zz})}{I_{xx}} \dot{\theta} \dot{\psi} + \frac{J_{TP}}{I_{xx}} \dot{\theta} \Omega \right. \\
 &\quad \left. + \dot{\varphi}_d - \lambda \dot{\varphi} \right. \\
 &\quad \left. - k_\varphi \text{sign}(S_\varphi) \right) \\
 U_2 &= \left(\frac{I_{yy}}{I} \right) \left(-\frac{(I_{zz} - I_{xx})}{I_{yy}} \dot{\varphi} \dot{\psi} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{J_{TP}}{I_{yy}} \dot{\varphi} \Omega + \dot{\theta}_d - \lambda \dot{\theta} \right. \\
 &\quad \left. - k_\theta \text{sign}(S_\theta) \right) \\
 U_3 &= I_{zz} \left(-\frac{(I_{xx} - I_{yy})}{I_{zz}} \dot{\varphi} \dot{\theta} + \ddot{\psi}_d \right. \\
 &\quad \left. - \lambda \dot{\psi} \right. \\
 &\quad \left. - k_\psi \text{sign}(S_\psi) \right) \\
 U_x &= \left(\frac{m}{U_1} \right) (\ddot{x}_d - \lambda \dot{x} - k_x \text{sign}(S_x)) \\
 U_y &= \left(\frac{m}{U_1} \right) (\ddot{y}_d - \lambda \dot{y} - k_y \text{sign}(S_y)) \\
 U_z &= \frac{m}{(\cos \theta \cos \varphi)} (g + \ddot{z}_d - \lambda \dot{z} \\
 &\quad - k_z \text{sign}(S_z))
 \end{aligned} \tag{21}$$

در این روابط (U_x, U_y, U_z) سیگنال‌های کنترلی موقعیت (x, y, z) هستند، شکل ۲ بلوک دیاگرام کنترل کوادروتور و شکل‌های ۳ و ۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترل‌کننده مد لغزشی را نشان می‌دهند. همچنین شکل ۵ شبیه‌سازی موقعیتی در فضای سه‌بعدی را نشان می‌دهد که بیانگر ردیابی موفق است. پارامترهای به‌کاررفته در طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی در جدول ۲ آمده است این پارامترها با استفاده از محدودیت‌های بیان‌شده در روابط ذکرشده و با سعی و خطا حاصل شده‌اند.



شکل ۲. بلوک دیاگرام کنترل کوادروتور

با در نظر گرفتن تابع لیپانوف معرفی‌شده در رابطه ۱۰ و شرط به‌دست‌آمده از آن در رابطه ۱۱ مقدار k_2 را در رابطه ۹ می‌توان به دست آورد. با توجه به رابطه ۱۲ که بیانگر منفی بودن مشتق تابع لیپانوف است، علاوه بر منفی بودن اگر از صفر دورتر باشد، تابع لیپانوف مطلوب‌تری را خواهیم داشت؛ زیرا در این صورت با شیب سریع‌تری انرژی درونی آن صفر می‌شود؛ بنابراین هرچه قدر مشتق تابع لیپانوف منفی‌تر باشد بهتر است. در نتیجه به‌جای آنکه بخواهیم تابع لیپانوف منفی شود آن را کوچک‌تر از یک منفی قرار می‌دهیم و بعداً از این پارامتر به‌عنوان یک پارامتر طراحی در شبیه‌سازی استفاده خواهیم کرد.

$$\dot{V} = s\dot{s} \leq -\eta \tag{16}$$

$$s\dot{s} \leq -\eta|s| \tag{17}$$

$$s(f(x) + g(x)u + d(t)) \leq -\eta|s| \tag{18}$$

با قرار دادن u در معادله بالا داریم:

$$\begin{aligned}
 s(-k_2 \text{sign}(s) + d(t)) \\
 \leq -k_2|s| \\
 + |s||d(t)| \\
 |s|(-k_2 + |d(t)|) \leq -\eta|s|
 \end{aligned} \tag{19}$$

در نتیجه داریم:

$$k_2 \geq \eta + D \tag{20}$$

که در آن η یک عدد مثبت است، بنابراین اگر k_2 را به صورت بالا انتخاب کنیم، سیستم پایدار می‌شود.

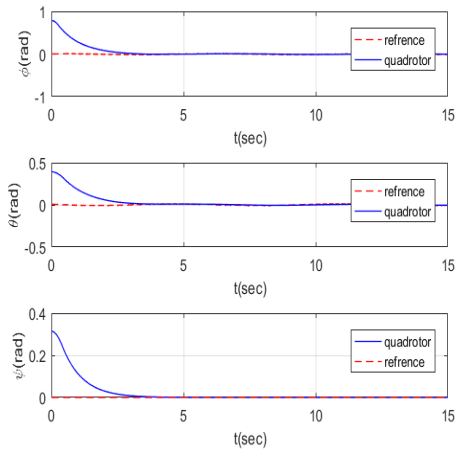
با توجه به معادله‌های ذکرشده کنترل‌کننده مد لغزشی برای سیستم کوادروتور به صورت زیر به دست آمد:



جدول ۲. مقادیر پارامترهای ثابت در طراحی کنترل کننده

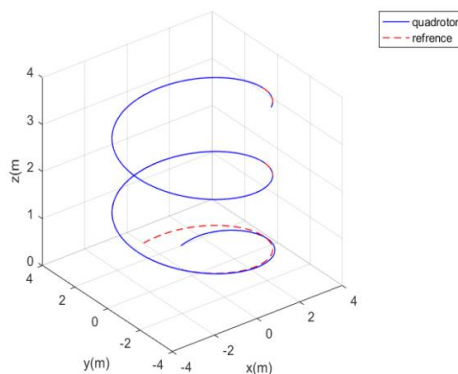
مد لغزشی مرتبه اول

پارامتر طراحی	مقدار	پارامتر طراحی	مقدار
k_x	۰.۸۹۹۴	λ_x	۳.۴۲۸۷
k_y	۲.۰۸۸۸	λ_y	۱.۰۱۴۶
k_z	۱.۳۲۳۱	λ_z	۱.۹۱۹۳
k_ϕ	۳.۴۹۰۴	λ_ϕ	۱.۱۸۷۳
k_θ	۰.۸۴۴۲	λ_θ	۱.۰۲۵۲
k_ψ	۰.۹۸۰۳	λ_ψ	۱.۳۰۱۵

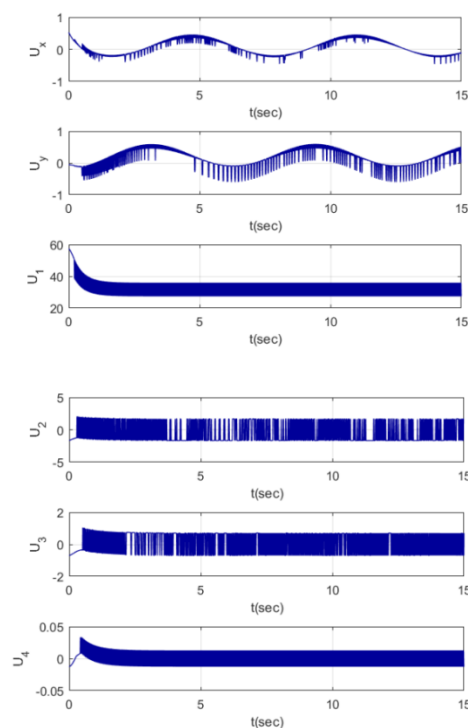


شکل ۴. حالت‌های کوادروتور با استفاده از روش کنترل

مد لغزشی مرتبه اول

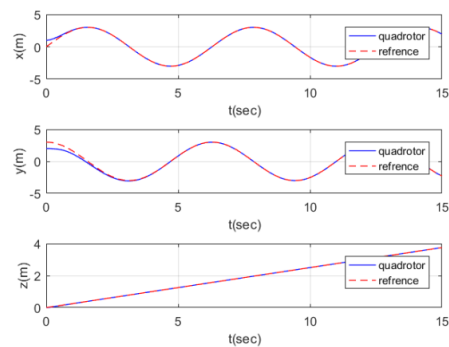


شکل ۵. نمودار سه‌بعدی از ردیابی مسیر کوادروتور با استفاده از روش کنترل مد لغزشی مرتبه اول



شکل ۳. فرمان‌های کنترلی کوادروتور با استفاده از روش

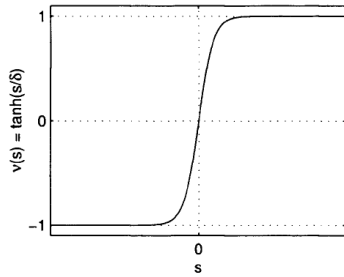
کنترل مد لغزشی مرتبه اول



۳-۱. پدیده چترینگ

نتایج شبیه‌سازی حاکی از پدیده چترینگ در سیگنال کنترلی طراحی‌شده در روش مد لغزشی مرتبه اول در نتیجه حضور تابع علامت است چراکه این تابع در فرمان کنترلی، عملگر را به سوئیچ کردن لحظه‌ای وادار می‌کند. از آنجایی که پیاده‌سازی کنترل‌کننده مد لغزشی به صورت ایده‌آل صورت نمی‌گیرد و عملگرها نیز قادر به سوئیچ کردن لحظه‌ای نمی‌باشند و با تأخیر این کار را انجام می‌دهند و همچنین مقدار متغیر لغزش که مجموع وزن‌دار خطاست با دقت بی‌نهایت معلوم نیست، پدیده چترینگ اتفاق



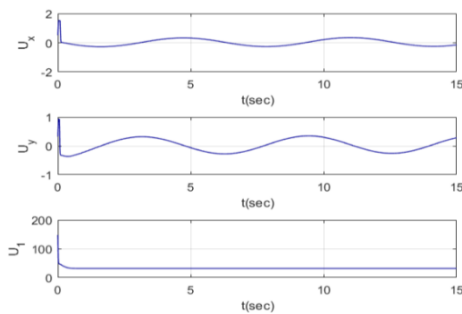


شکل ۷- تابع $\tanh(s/\delta)$

پارامترهای ثابت طراحی که در شبیه‌سازی کنترل مد لغزشی مرتبه اول با وجود لایه‌مرزی به کار گرفته شده است، در جدول ۳ و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل‌های ۸ تا ۱۰ آمده است که نشان می‌دهد چترینگ در فرمان‌های کنترلی حذف شده و ردیابی مسیر مورد نظر به صورت نرم و بدون نوسان در فرمان‌های کنترلی صورت پذیرفته است.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای ثابت در طراحی کنترل کننده مد لغزشی مرتبه اول با وجود لایه‌مرزی

پارامتر طراحی	مقدار	پارامتر طراحی	مقدار
k_x	۲۱,۰۰۰۱	λ_x	۰,۹۲۴۱
k_y	۱۷,۸۸۵۴	λ_y	۱,۳۰۵۱
k_z	۲۰	λ_z	۱,۴۰۶۰
k_φ	۱۰	λ_φ	۵,۰۲۵۵
k_θ	۱۰	λ_θ	۵,۹۴۸۴
k_ψ	۱۰	λ_ψ	۱,۱۵۱۲
δ	۰,۱		



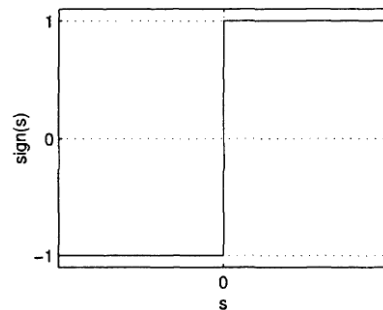
می‌افتد. حالت کلی چترینگ بسیار نامطلوب بوده چون معایبی همچون فعالیت کنترلی زیاد، تحریک دینامیک‌های مدل نشده فرکانس بالا، کاهش دقت کنترل کننده، افزایش تلفات گرمایی در مدارهای الکتریکی و افزایش فرسودگی در قسمت‌های مکانیکی و محرک‌ها دارد. این معایب کارایی سیستم را کاهش داده و ممکن است به ناپایداری منجر شوند. بعضی از رویکردها برای جلوگیری از چترینگ یک لایه‌مرزی را در مجاورت سطح ناپیوستگی ایجاد می‌کنند راه‌حل ساده این است که یک تابع اشباع با بهره بالا به کار رود (شبه لغزشی) که در این مقاله تابع زیر به کار رفته است و در قسمت سوئیچینگ دیاگرام کنترل کوادروتور (شکل ۲) به کار می‌رود:

$$\delta v(s, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(s) & \text{if } |s| > \delta \\ (\delta/|s|)^{q-1} \text{sign}(s) & 0 < |s| < \delta \\ 0 & s = 0 \end{cases} \quad (22)$$

در معادله‌های بالا برای دست آوردن تقریب نزدیک به تابع sign (شکل ۶) می‌توان از تابع \tanh (شکل ۷) استفاده کرد:

$$(s, \delta) = \tanh\left(\frac{s}{\delta}\right) \quad (23)$$

به طوری که $\delta < 1$ عدد مثبت کوچکی است که به عنوان قطب منحنی تعریف می‌شود.

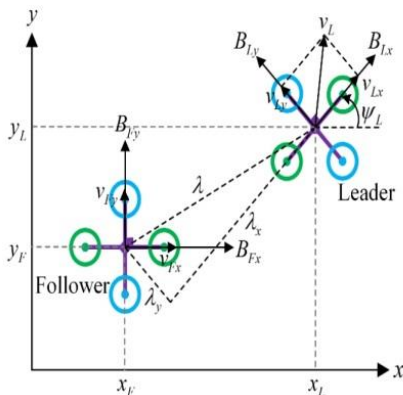


شکل ۶. تابع علامت

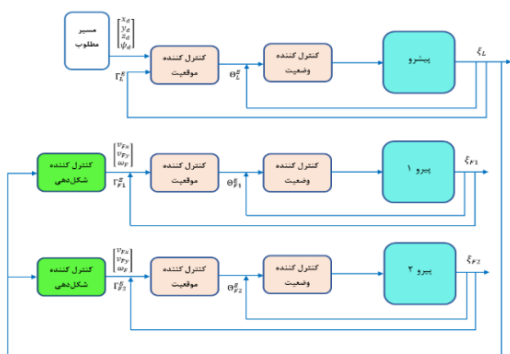


۴. کنترل آرایش بندی کوادروتور

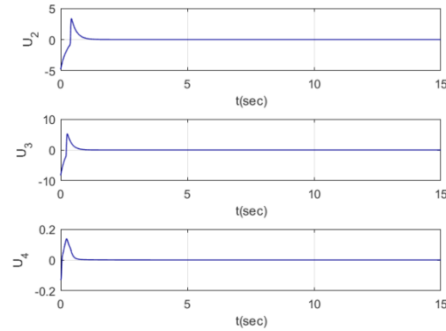
در این مقاله، در فرایند کنترل آرایش بندی پیشرو-پیرو ابتدا رهبر یک مسیر از پیش تعیین شده را دنبال می کند و موقعیت رهبر در هر لحظه به عنوان ورودی کنترل آرایش بندی برای کوادروتورهای پیرو استفاده می شود و سپس دینامیک خطای آرایش بندی به دست آمده و کنترل کننده ای برای آن طراحی شده است. در این روش کنترل آرایش بندی، فاصله و زاویه ثابت بین پیشرو و پیرو حفظ شده است. همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است λ ، فاصله مرکز جرم پیشرو تا مرکز جرم پیرو است و φ ، زاویه بین محور x پیشرو و λ است. شکل ۱۲ نیز بلوک دیاگرام کنترل آرایش بندی کوادروتور را نشان می دهد.



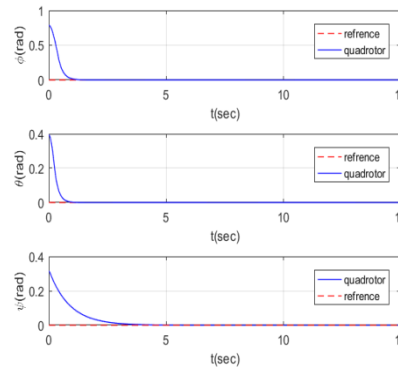
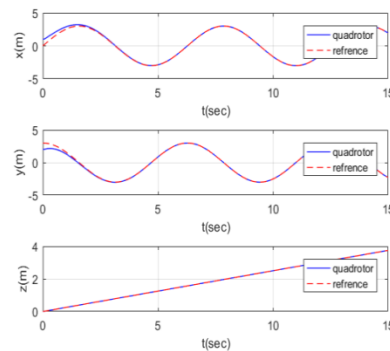
شکل ۱۱. آرایش بندی کوادروتور در صفحه X-Y



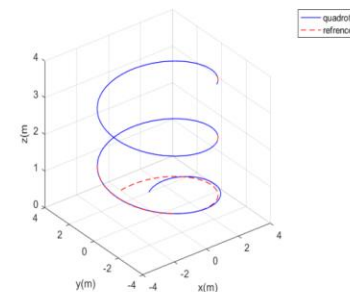
شکل ۱۲. بلوک دیاگرام کنترل آرایش بندی کوادروتور



شکل ۸. فرمان های کنترلی کوادروتور با استفاده از روش کنترل مد لغزشی مرتبه اول با وجود لایه مرزی



شکل ۹. حالت های کوادروتور با استفاده از روش کنترل مد لغزشی مرتبه اول با وجود لایه مرزی



شکل ۱۰. نمودار سه بعدی از ردیابی مسیر کوادروتور با استفاده از روش کنترل مد لغزشی مرتبه اول با وجود لایه مرزی

داریم:

$$G(x) = \begin{bmatrix} -\cos e_\psi & \sin e_\psi & 0 \\ -\sin e_\psi & -\cos e_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

با توجه به دینامیک خطای آرایش بندی، لازم است یک قانون کنترلی طراحی شده تا خطا به سمت صفر همگرا شود. در اینجا برای کنترل دینامیک خطای آرایش بندی از کنترل کننده مد لغزشی انتگرالی استفاده شده است. سطح لغزش به صورت زیر تعریف شده است:

$$s = x + k_f \int x dt \quad (35)$$

که k_f یک ماتریس ثابت است. کنترل مد لغزشی انتگرالی از دو قسمت کنترل معادل و کنترل ناپیوسته به صورت زیر تشکیل شده است:

$$v = v_{eq} + v_{disc} \quad (36)$$

که با مشتق گیری از سطح لغزش و برابر صفر قرار دادن آن به صورت زیر به دست آمده است:

$$v_{eq} = G^{-1}(x)(-F(x) - k_f x) \quad (37)$$

برای اطمینان از اینکه سیستم با در نظر گرفتن اغتشاشات بر روی سطح $s = 0$ نگه داشته شود، می توان آن را به صورت زیر در نظر گرفت.

$$s = \dot{x} + k_f x = F(x) + G(x)v_{eq} + k_f x = -L \operatorname{sgn}(s) \quad (38)$$

که L ثابت مثبت است. که در نتیجه آن v_{disc} به صورت زیر به دست آمده است:

$$v_{disc} = -L \operatorname{sgn}(s) \quad (39)$$

با توجه به روابط ذکر شده فرمان کنترل آرایش بندی به صورت معادله زیر حاصل شد:

$$v = G^{-1}(x)(-F(x) - k_f x - L \operatorname{sgn}(s)) \quad (40)$$

برای اثبات پایداری کنترل آرایش بندی ابتدا تابع لیپانوف دلخواه و مشتق آن به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$V = \frac{1}{2} s^T s \quad (41)$$

$$\begin{cases} \lambda_x = -(x_L - x_F) \cos \psi_L - (y_L - y_F) \sin \psi_L \\ \lambda_y = -(x_L - x_F) \sin \psi_L - (y_L - y_F) \cos \psi_L \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \lambda_x^d = \lambda \cos \varphi \\ \lambda_y^d = \lambda \sin \varphi \end{cases} \quad (25)$$

بنابراین خطای آرایش بندی را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\begin{cases} \dot{e}_x = \lambda_x^d - \dot{\lambda}_x \\ \dot{e}_y = \lambda_y^d - \dot{\lambda}_y \\ \dot{e}_\psi = \dot{\psi}_F - \dot{\psi}_L \end{cases} \quad (26)$$

دینامیک انتقالی در صفحه $x-y$ نیز به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_{ix} \cos \psi_i - v_{iy} \sin \psi_i \\ \dot{y}_i = v_{ix} \sin \psi_i + v_{iy} \cos \psi_i \\ \dot{\psi}_L = \omega_L \end{cases} \quad (27)$$

که در آن \dot{x}_i و \dot{y}_i مؤلفه های سرعت در دستگاه مختصات زمینی هستند. زیروند i نمایانگر پیشرو ($i = L$) یا پیرو ($i = F$) است. زاویه بین جهت محور x دستگاه بدنی و دستگاه مختصات زمینی و v_{ix} و v_{iy} مؤلفه های سرعت در دستگاه مختصات بدنی هستند که از رابطه های زیر به دست می آیند [26]:

$$\begin{cases} v_{ix} = \dot{x}_i \cos \psi_i + \dot{y}_i \sin \psi_i \\ v_{iy} = -\dot{x}_i \sin \psi_i + \dot{y}_i \cos \psi_i \end{cases} \quad (28)$$

با استفاده از رابطه های ذکر شده داریم:

$$\begin{cases} \dot{e}_x = -(\lambda_y^d - e_y) \omega_L - v_{Fx} \cos e_\psi + v_{Fy} \sin e_\psi + v_{Lx} \\ \dot{e}_y = (\lambda_x^d - e_x) \omega_L - v_{Fx} \sin e_\psi - v_{Fy} \cos e_\psi + v_{Ly} \\ \dot{e}_\psi = \omega_F - \omega_L \end{cases} \quad (29)$$

و در فرم فضای حالت:

$$\dot{x} = F(x) + G(x)v \quad (30)$$

که در آن x بردار فضای حالت و v بردار فرمان کنترلی و $F(x)$ و $G(x)$ به صورت زیر هستند:

$$x = [e_x \quad e_y \quad e_\psi]^T \quad (31)$$

$$v = [v_{Fx} \quad v_{Fy} \quad \omega_F]^T \quad (32)$$

$$F(x) = \begin{bmatrix} e_y \omega_L + v_{Lx} - \omega_L \lambda_y^d \\ -e_x \omega_L + v_{Ly} + \omega_L \lambda_x^d \\ -\omega_L \end{bmatrix} \quad (33)$$



برای کنترل آرایش بندی برای n عامل استخراج شده است از نظر تئوری برای تعداد n کوادروتور نتایج موفقیت آمیز است.

جدول ۴. مشخصات سه مأموریت پیاده شده در شبیه سازی کنترل آرایش بندی

تعداد کوادروتور	مشخصات مسير مورد نظر	مشخصات هندسه آرایش بندی	فاموریت:
سه کوادروتور	$\begin{cases} x_d = 3 \sin(t) \\ y_d = 3 \cos(t) \\ z_d = \frac{1}{4}t \end{cases}$	$\begin{cases} \lambda_1 = 2 \cdot \varphi_1 = \pi/3 \\ \lambda_2 = 2 \cdot \varphi_2 = 2 * \pi/3 \end{cases}$	مأموریت اول
سه کوادروتور	$\begin{cases} x_d = \frac{1}{4}t \\ y_d = 3 \cos(t) \\ z_d = \frac{1}{4}t \end{cases}$	$\begin{cases} \lambda_1 = 2 \cdot \varphi_1 = \pi/3 \\ \lambda_2 = 4 \cdot \varphi_2 = \pi/3 \end{cases}$	مأموریت دوم
پنج کوادروتور	$\begin{cases} x_d = \frac{1}{4}t \\ y_d = 3 \cos(t) \\ z_d = \frac{1}{4}t \end{cases}$	$\begin{cases} \lambda_1 = 2 \cdot \varphi_1 = \pi/3 \\ \lambda_2 = 4 \cdot \varphi_2 = \pi/3 \\ \lambda_3 = 6 \cdot \varphi_3 = \pi/3 \\ \lambda_4 = 8 \cdot \varphi_4 = \pi/3 \end{cases}$	مأموریت سوم

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T(F(x) + G(x)v + k_F x) \\ &= s^T(-L \operatorname{sgn}(s)) \\ &< -L |s| < 0 \end{aligned} \quad (42)$$

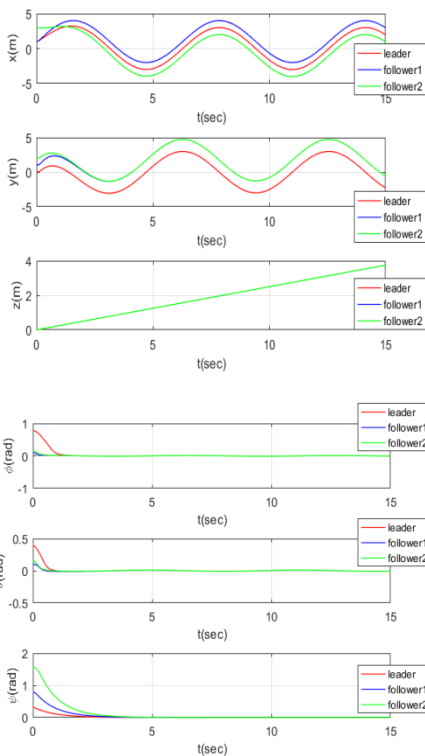
بنابراین اگر $L > 0$ باشد، اطمینان حاصل می شود که \dot{V} منفی معین است؛ بنابراین، سیستم در یک زمان محدود به سطح $s = 0$ می رسد و روی آن باقی خواهد ماند.

در ادامه نتایج شبیه سازی کنترل آرایش بندی در قالب سه مأموریت آورده شده است. مشخصات این مأموریت ها در جدول 4 آمده است و اغتشاشات باد نیز به صورت زیر لحاظ شده است:

$$\begin{aligned} V_x &= 0.5 \sin(0.1 t - \pi) \\ V_y &= 0.5 \sin(0.1 t - \pi) \end{aligned} \quad (43)$$

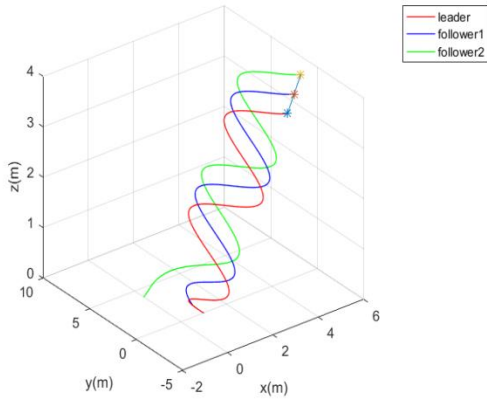
در مأموریت اول سه کوادروتور در شکل مثلثی مسیر مارپیچی را ردیابی می کنند و مأموریت های دوم و سوم برای صحت سنجی طراحی کنترل آرایش بندی آورده شده است.

نتایج شبیه سازی برای مأموریت اول که در شکل های ۱۳ و ۱۴ آورده شده است، گویای آن است که کنترل آرایش بندی این سه کوادروتور در طول مسیر مارپیچی با موفقیت انجام شده است. در مأموریت دوم، سه کوادروتور به صورت خطی، مسیر s شکلی را ردیابی می کنند. در این مأموریت، هم شکل هندسی کوادروتورها و هم مسیر مورد نظر نسبت به مأموریت قبلی تغییر کرده است. نتایج شبیه سازی در شکل های ۱۵ و ۱۶ نشان می دهد که پیروها از پیشرو پیروی کرده و کنترل آرایش بندی با موفقیت انجام شده است. مأموریت سوم همانند مأموریت قبلی است با این تفاوت که تعداد پیروها افزایش یافته است. نتایج شبیه سازی در شکل های ۱۷ و ۱۸ گویای این است که با افزایش تعداد کوادروتورها، کنترل آرایش بندی همچنان با موفقیت انجام شده است. همچنین با توجه به این که روابط استفاده شده

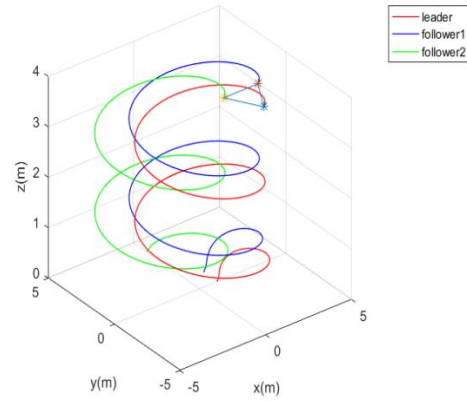


شکل ۱۳. پیروی کوادروتورهای پیرو از کوادروتور پیشرو برای حفظ آرایش بندی در طول مسیر

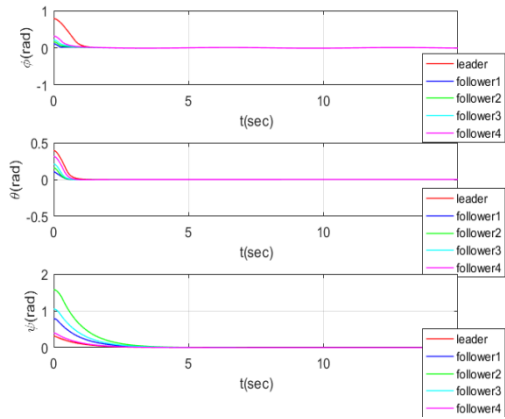
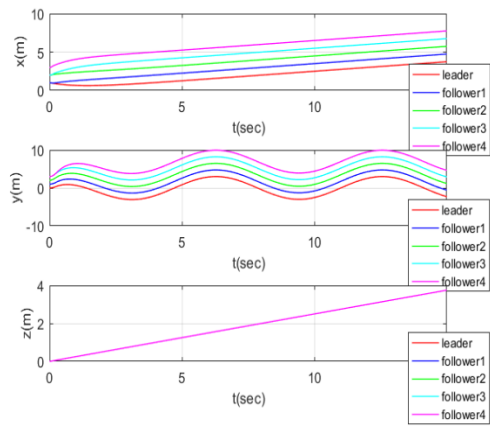




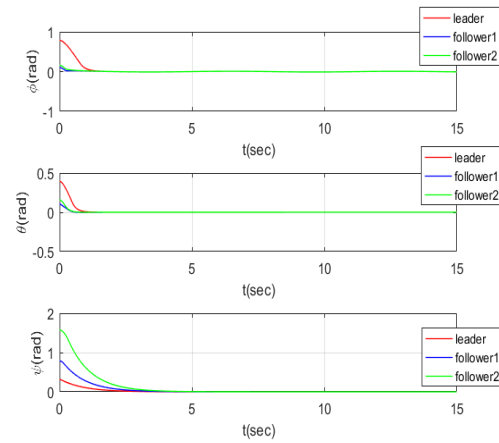
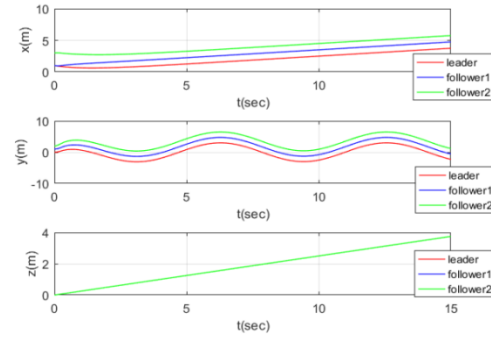
شکل ۱۶. نمودار سه بعدی از کنترل آرایش بندی پیشرو- پیرو توسط سه کوادروتور



شکل ۱۴. نمودار سه بعدی از کنترل آرایش بندی پیشرو- پیرو توسط سه کوادروتور



شکل ۱۷. پیروی کوادروتورهای پیرو از کوادروتور پیشرو برای حفظ آرایش بندی در طول مسیر



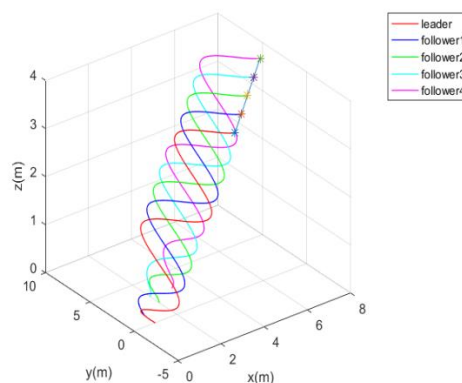
شکل ۱۵. پیروی کوادروتورهای پیرو از کوادروتور پیشرو برای حفظ آرایش بندی در طول مسیر



n کوادروتور نتایج موفقیت آمیز است.

۶. مآخذ

- [1] Y. Choi, and H. Ahn, "Nonlinear Control of Quadrotor for Point Tracking: Actual Implementation and Experimental Tests", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 20, no. 3, pp. 1179-1192, June. 2015.
- [2] Y. Li, J. Yang, and K. Zhang, "Distributed Finite-Time Cooperative Control for Quadrotor Formation", IEEE Access, vol. 7, pp. 66753- 66763, 2019.
- [3] Z. Liang, L. Yi, X. Shida, and F. Han, "Multiple UAVs Cooperative Formation Forming Control Based on Back-stepping-like Approach", Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 29, no. 4, pp. 816-822, Aug. 2018.
- [4] A. Zulu, and S. John, "A Review of Control Algorithms for Autonomous Quadrotors", Open Journal of Applied Sciences, vol. 4, no. 14, pp. 547- 556, Feb. 2016.
- [5] Y. Yu, and X. Ding, "A Global Tracking Controller for Underactuated Aerial Vehicles: Design, Analysis, and Experimental Tests on Quadrotor", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 21, no. 5, pp. 2499-2511, Oct. 2016.
- [6] Y. Zou, Z. Zhou, X. Dong, and Z. Meng, "Distributed Formation Control for Multiple Vertical Takeoff and Landing UAVs With Switching Topologies", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 23, no. 4, pp. 1750-1761, Aug. 2018.
- [7] Y. Zou, and Z. Meng, "Coordinated Trajectory Tracking of Multiple Vertical Take-off and Landing UAVs", Automatica, vol. 99, pp. 33-40, Jan. 2019.
- [8] K. K. Oh, M. C. Park, and H. S. Ahn, "A Survey of Multi-Agent Formation



شکل ۱۸. نمودار سه بعدی از کنترل آرایش بندی پیشرو- پیرو توسط پنج کوادروتور

۵. نتیجه گیری

این مقاله باهدف ردیابی مسیر مشخصی توسط سه کوادروتور با حفظ شکل مثلی در طول مسیر و با در نظر گرفتن اغتشاشات وارد بر سیستم ارائه شده است.

نتایج شبیه سازی با استفاده از کنترل کننده مد لغزشی برای کنترل مستقل کوادروتورها، وقوع پدیده چترینگ را در فرمان های کنترلی نشان داد و نتایج استفاده از روش تقریب توابع پیوسته برای حذف آن بیانگر از بین رفتن چترینگ در فرمان های کنترلی و ردیابی مسیر مورد نظر به صورت نرم و بدون نوسان در فرمان های کنترلی بود.

نتایج شبیه سازی کنترل شکل دهی به روش متمرکز در قالب سه مأموریت با تعداد کوادروتور متفاوت و همچنین مسیرهای مختلف نیز حاکی از این است که پیروها از پیشرو پیروی کرده که این صحت کنترل آرایش بندی طراحی شده را نشان می دهد. همچنین با توجه به این که روابط استفاده شده برای کنترل آرایش بندی برای n عامل استخراج شده است از نظر تئوری برای تعداد

- Control Engineering Practice, vol. 46, pp. 26-36, 2016.
- [17] X. Dong, Y. Zhou, Z. Ren, and Y. Zhong, "Time-Varying Formation Tracking for Second-Order Multi-Agent Systems Subjected to Switching Topologies With Application to Quadrotor Formation Flying", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 6, pp. 5014-5024, June. 2017.
- [18] H. Du, W. Zhu, G. Wen, Z. Duan, and J. Lu, "Distributed Formation Control of Multiple Quadrotor Aircraft Based on Nonsmooth Consensus Algorithms", IEEE Transactions on Cybernetics, vol. 49, no. 1, pp. 342- 353, Jan. 2019.
- [19] W. Jasim, and D. Gu, "Robust Team Formation Control for Quadrotors", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 26, no. 4, pp. 1516-1523, July. 2018.
- [20] Z. Hou, and I. Fantoni, "Interactive Leader-Follower Consensus of Multiple Quadrotors Based on Composite Nonlinear Feedback Control", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 26, no. 5, pp. 1732-1743, Sept. 2018.
- [21] D. Shen, and Q. Lu, "Hierarchical Formation Control With Applications to Multi-Quadrotor Systems", IEEE Access, vol. 7, pp. 130599-130609, 2019.
- [22] Z. Jia, L. Wang, J. Yu, and X. Ai, "Distributed Adaptive Neural Networks Leader-following Formation Control for Quadrotors with Directed Switching Topologies", ISA Transactions, vol. 93, pp. 93-107, Oct. 2019.
- [23] X. Ai, and J. Yu. "Flatness-based Finite-time Leader-follower Formation Control of Multiple Quadrotors with External Disturbances", Aerospace Science and Technology, vol. 92, pp.20-33, Sept. 2019.
- [24] R. W. Beard. "Quadrotor dynamics and control". Brigham Young University, 19(3), 46-56,2008.
- Control", Automatica, vol. 53, pp. 424-440, March. 2015.
- [9] Z. Zuo, M. Defoort, B. Tian, and Z. Ding, "Distributed Consensus Observer for Multi-Agent Systems With High-Order Integrator Dynamics", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 65, no. 4, pp. 1771-1778, April. 2020.
- [10] Q. Wang, Y. Wang, and H. Zhang, "The Formation Control of Multiagent Systems on a Circle", IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 5, no. 1, pp. 148-154, Jan. 2018.
- [11] A. Mondal, L. Behera, S. R. Sahoo, and A. Shukla, "A Novel Multiagent Formation Control Law with Collision Avoidance", IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, vol. 4, no. 3, pp. 558-568, 2017.
- [12] B. Zhu, K. Guo, and L. Xie, "A New Distributed Model Predictive Control for Unconstrained Double-Integrator Multiagent Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 63, no. 12, pp. 4367-4374, Dec. 2018.
- [13] A. Abdessameud, I. G. Polushin, and A. Tayebi, "Motion Coordination of Thrust-Propelled Underactuated Vehicles with Intermittent and Delayed Communication", Systems & Control Letters, vol. 79, pp. 15-22, May. 2015.
- [14] Y. Zou, and Z. Meng, "Distributed Hierarchical Control for Multiple Vertical Takeoff and Landing UAVs with a Distance-Based Network Topology", International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 29, no. 9, pp. 2573-2588, 2019.
- [15] X. Dong, B. Yu, and Y. Zhong, "Time-Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles: Theories and Experiments", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 23, no. 1, pp. 340-348, Jan. 2015.
- [16] X. Dong, Y. Zhou, Z. Ren, and Y. Zhong, "Time-Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles with Switching Interaction Topologies",



- [25] K .Runcharoon,, and V.Srichatrapimuk,, “Sliding mode control of quadrotor”. In 2013 The International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAEECE) (pp. 552-557). IEEE.2013.
- [26] D. A .Mercado,R., Castro and R. Lozano, “Quadrotors flight formation control using a leader-follower approach”. In 2013 European Control Conference (ECC) (pp. 3858-3863). IEEE,2013.

