



نظارت مرزی با استفاده از برنامه‌ریزی آشوبناک حرکت برای ربات کوادروتور

پیام شفیعی گوهری¹، سجاد تقوایی^{2*}، حسین محمدی²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز

* شیراز صندوق پستی 713481154، sj.taghvaei@shirazu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 02 شهریور 1395

پذیرش: 09 مهر 1395

ارائه در سایت: 09 آبان 1395

کلید واژگان:

نظارت مرزی

برنامه‌ریزی آشوبناک حرکت

کوادروتور

کنترل مد لغزشی

یکی از نکات اساسی در انجام اهداف نظارتی به کمک ربات‌ها پیچیدگی و غیرقابل پیش‌بینی بودن مسیر حرکت ربات است. این مسأله به‌ویژه در شرایط خصمانه که مسیر ربات ناظر توسط عامل دیگری تعقیب می‌گردد، حائز اهمیت است. بر این اساس، برنامه‌ریزی حرکت ربات ناظر با استفاده از دو روش توالی تصادفی و توالی آشوبناک می‌تواند در رسیدن به این هدف مؤثر باشد؛ اما روش توالی آشوبناک به علت طبیعت معین و قطعی خود، برای این موضوع، مناسب‌تر است. همچنین مقاوم و ارگودیک بودن ذاتی مسیرهای آشوبناک در مقایسه با توابع تصادفی، در پیاده سازی سیستم نظارت مرزی که نیازمند پوشش همه‌جانبه است، مزیت دیگری است که می‌توان به آن اشاره نمود. در این مقاله روشی جهت برنامه‌ریزی آشوبناک حرکت به‌منظور انجام نظارت مرزی ارائه می‌گردد و بر یک ربات کوادروتور ناظر اعمال می‌گردد. ربات کوادروتور به جهت قابلیت مانور بالا و کارکرد هوایی خود به‌عنوان گزینه مناسبی در کاربرد نظارت مرزی معرفی می‌گردد. مسیر آشوبناک مورد نیاز توسط دینامیک آشوبناک سیستم هنون تولید می‌شود. سپس به بررسی دینامیک و کنترل کوادروتور با استفاده از روش مد لغزشی پرداخته می‌شود. در انتها نیز حرکت کوادروتور طبق معادلات دینامیکی، مسیر آشوبناک و کنترلر ارائه شده، برای دو وضعیت نمونه شبیه‌سازی می‌گردد. کارایی روش ارائه شده، به ویژه از منظر غیر قابل پیش‌بینی بودن و عدم تجاوز از همسایگی تعیین شده در اطراف مرز، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. حالت مسیر دایروی و مسیر غیر هموار برای این منظور در نظر گرفته شده است.

Boundary surveillance using chaotic motion planning and control for a quadrotor robot

Payam Shafiei Gohari, Sajjad Taghvaei*, Hossein Mohammadi

School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

* P.O.B. 713481154 Shiraz, Iran, sj.taghvaei@shirazu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 23 August 2016
Accepted 30 September 2016
Available Online 30 October 2016

Keywords:

Boundary Surveillance
Chaotic Motion Planning
Quadrotor
Sliding Mode Control

ABSTRACT

One of the most important factors in surveillance systems using robots is the complexity and unpredictability of the robot trajectories. This becomes more vital in hostile conditions where the robot trajectory is being followed by another agent. Therefore, random or chaotic sequences can be used in motion planning of surveillance robots. However, chaotic sequences would be more effective due to their deterministic nature. Moreover, the intrinsic robustness and ergodicity of chaotic systems, compared to random functions, would be another advantage to be considered in surveillance systems which require comprehensive coverage. In this paper, a method is proposed for chaotic motion planning for boundary surveillance and implemented to a quadrotor robot. Quadrotor robot is introduced as an appropriate choice for boundary surveillance application due to high maneuverability and aerial functions. The chaotic trajectory is produced using Henon map. Then the dynamics of the system is derived and a sliding mode controller is designed for such chaotic motion. Finally, the dynamics of the robot and the proposed controller are simulated to generate the chaotic trajectories for two cases. The performance of the proposed algorithm is discussed according to unpredictability and staying in the allowable region. A circular path and a non-smooth path are considered for simulation examples.

1- مقدمه

ربات‌های خودگردان، سیستم‌های بی‌درنگ² هوشمندی هستند که می‌توانند بدون دخالت انسان در محیط‌های طبیعی و غیرطبیعی عمل کرده و وظایف مختلفی از جمله نظارت را به انجام برسانند. الگوریتم برنامه‌ریزی حرکت از نکات مهم و ضروری در طراحی ربات‌های ناظر به شمار می‌رود [2]. در شرایط عادی به علت وجود تغییرات متوالی و تصادفی در محیط، الگوریتم برنامه‌ریزی حرکت باید به‌گونه‌ای باشد که یک مسیر بهینه را برای حرکت

مسأله نظارت از جمله مسائل بسیار مهم در انواع سیستم‌های امنیتی است. استفاده از سیستم‌های رباتیک هوشمند می‌تواند عملکرد مناسبی را در این امر نشان دهد. از میان مسائل مختلف نظارت، نظارت مرزی نیز که در بسیاری مواقع با کمک انسان صورت می‌گیرد، می‌تواند به‌وسیله ربات‌های خودگردان¹ انجام شود [1].

² Real-Time

¹ Autonomous

می‌باشد که با عدم قطعیت‌هایی نیز همراه است؛ از این رو کنترل آن دارای چالش‌های زیادی می‌باشد. یکی از معایب کوادروتور مصرف انرژی زیاد آن می‌باشد؛ بنابراین روش مناسب کنترل کوادروتور و تعیین پارامترهای کنترلی بهینه از اهمیت بالایی برخوردار است.

در این مقاله ضمن در نظر گرفتن دینامیک ربات کوادروتور، با استفاده از نگاشت آشوبناک هنون، برنامه‌ریزی حرکت برای نظارت مرزی انجام شده و سپس، با توجه به زیرعملی بودن سیستم، کنترلر مناسب بر مبنای مدل لغزشی طراحی و شبیه‌سازی شده است. در انتها نیز موارد شبیه‌سازی شده و نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به‌طور خلاصه موارد نوآوری این مقاله عبارت‌اند از:

- تعریف و حل مسأله نظارت "مرزی" برای ربات پرنده بدون سرنشین؛ در کارهای پیشین این نوع خاص از نظارت برای ربات پرنده در نظر گرفته نشده است [14].

- استفاده از نگاشت هنون در طراحی برنامه‌ریزی حرکت ربات پرنده بدون سرنشین.

- در نظر گرفتن دینامیک ربات ناظر ضمن حرکت بر مسیر آشوبناک.

ساختار مقاله پیش رو بدین ترتیب است: ابتدا مسیر آشوبناک مورد نظر معرفی و طراحی می‌گردد. در قسمت 3 مدل دینامیکی بررسی شده و در قسمت 4 کنترلر مورد نظر معرفی می‌گردد. در پایان نتایج شبیه‌سازی و جمع‌بندی ارائه می‌گردد.

2- مسیرهای آشوبناک

در شرایط خصمانه یک کوادروتور نظارتی خودگردان باید یک مسیر غیر قابل پیش‌بینی برای هر دشمن احتمالی را طی کند. در مورد مأموریت نظارت مرزی یک مسیر بسته در مختصات دوبعدی باید توسط کوادروتور، مورد نظارت قرار گیرد هدف طراحی یک مسیر غیر قابل پیش‌بینی برای عوامل متخاصم در نزدیکی این مسیر بسته دلخواه می‌باشد.

در این بخش در ابتدا به معرفی سیستم هنون پرداخته سپس با استفاده از این سیستم به طراحی مسیری غیر قابل پیش‌بینی در مجاورت یک مرز بسته دلخواه پرداخته می‌شود.

2-1- سیستم آشوبناک هنون

نگاشت هنون یک سیستم دینامیکی با گسستگی زمانی می‌باشد. این نگاشت نقطه (x_n, y_n) را در صفحه دریافت کرده و آن را به نقطه‌ای جدید می‌نگارد.

$$\begin{cases} x_{n+1} = y_n + 1 - a \cdot x_n^2 \\ y_{n+1} = b \cdot x_n \end{cases} \quad (1)$$

این نگاشت یک نمونه ساده‌شده از نگاشت پوانکاره برای معادلات لورنز بوده و با مقادیر $a=1.4$ و $b=0.3$ رفتاری آشوبناک از خود نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است نگاشت هنون دارای ناحیه بدام اندازی (ناحیه‌ای که همه مسیرهای ورودی به آن هرگز از آن خارج نخواهند شد [6])، به‌صورت یک چهارضلعی با رئوس $(-1.33, 0.42)$ ، $(1.32, 0.133)$ ، $(1.245, 0.14)$ و $(-1.06, -0.5)$ می‌باشد [15]. از آنجاکه هدف نزدیک نگاه‌داشتن کوادروتور اطراف یک مرز بسته دلخواه است؛ این خاصیت نگاشت هنون نقشی اساسی در رسیدن به این هدف ایفا خواهد نمود.

2-2- تعیین مسیرهای آشوبناک با استفاده از سینماتیک حرکت

نسبی [8]

ربات در شرایط مختلف به‌منظور تکمیل اهداف مورد نظر فراهم آورد. در شرایط خصمانه¹ مأموریت‌های نظارتی ربات‌ها باید مسیر حرکت به‌صورت غیر قابل پیش‌بینی برای مشاهده‌گر خارجی طراحی شود. به‌منظور حل این مسأله و غلبه بر عوامل متخاصم احتمالی می‌توان از دو مقوله کلی استفاده نمود: تئوری بازی² [4,3] و استفاده از توالی‌های آشوبناک و تصادفی در تولید مسیرهای غیر قابل پیش‌بینی [5]. تئوری بازی از مدل‌های ریاضی محیط، ربات و دشمنان احتمالی برای طراحی و ترسیم مأموریت‌های گشت-زنی و نظارتی مختلف استفاده می‌کند و تلاش دارد تا مسأله را با کاهش آن به یک بازی تعقیب و گریز حل نماید. با وجود کارایی و قابلیت اطمینان این تئوری، به علت ساده‌سازی فرضیات و پیچیدگی برنامه‌ریزی و محاسبات، این روش مناسبی برای به‌کارگیری در محیط‌ها و کاربردهای واقعی را ندارد. هرکدام از روش‌های توالی تصادفی و توالی آشوبناک می‌تواند در تولید نقطه-مسیرهای³ غیر قابل پیش‌بینی مورد استفاده قرار گیرند. از جمله مزیت‌های روش توالی آشوبناک به روش توالی تصادفی می‌توان به: محدود و کران‌دار بودن توالی آشوبناک و قابلیت انطباق آن به مسیرهای متفاوت اشاره نمود [6]. همچنین به علت طبیعت معین و قطعی آن نیروهای هم‌پیمان با اطلاع از شرایط اولیه و معادلات سیستم آشوبناک می‌توانند مسیر حرکت را پیش‌بینی و تصمیمات لازم را اتخاذ نمایند. علاوه بر این موضوع، مقاوم⁴ و ارگودیک بودن⁵ [7] ذاتی مسیرهای آشوبناک در مقایسه با توابع تصادفی، در پیاده‌سازی سیستم نظارت مرزی که نیازمند پوشش همه‌جانبه است، مزیت دیگری است که می‌توان به آن اشاره نمود.

مأموریت‌های نظارتی ربات‌ها به سه بخش نظارت مرزی [8]، نظارت بر محیط [5] و نظارت بر نقطه مورد نظر [9] تقسیم می‌شود. سیستم‌های آشوبناک به علت ویژگی "حساسیت به شرایط اولیه"، چهارچوب مورد نیاز برای هدف "غیر قابل پیش‌بینی بودن مسیر" در همه انواع سه‌گانه نظارت را فراهم می‌آورند.

به همین منظور محققان مختلفی به استفاده از نگاشت‌های آشوبناک در برنامه‌ریزی مسیر حرکت ربات‌های ناظر روی آورده‌اند. کوریاک و همکاران با استفاده از نگاشت هنون⁶ مسیر یک ربات سیار را به‌گونه‌ای طراحی نموده‌اند که برای عامل خارجی قابل پیش‌بینی نباشد [8]. منتها این برنامه‌ریزی بدون در نظر گرفتن دینامیک ربات و قید غیرهولونومیک حاکم بر آن انجام پذیرفته است. علاوه بر این استفاده از ربات پرنده در مقایسه با ربات چرخ‌دار می‌تواند کارکرد به‌مراتب بهتری در اهداف نظارتی را برآورده سازد.

در میان ربات‌های خودگردان پرنده‌های بدون سرنشین به دلایل مختلف از جمله: اشراف بر اهداف مورد نظارت، چابکی و مانورپذیری بالا، تأثیرپذیری کمتر از موانع و عوارض جغرافیایی و غیره، گزینه مناسبی جهت به‌کارگیری در انواع مأموریت‌های نظارتی می‌باشند [10]. در میان پرنده‌های بدون سرنشین کوادروتورها وسیله مناسبی جهت به‌کارگیری در اهداف نظارتی مختلف می‌باشند [11-13]. در به‌کارگیری کوادروتورها به‌عنوان ربات‌های ناظر، مسأله نظارت بر مرز و همچنین استفاده از نگاشت‌های آشوبناک جهت برنامه‌ریزی حرکت در شرایط خصمانه مورد توجه قرار نگرفته است.

مدل دینامیکی کوادروتور یک سیستم زیرعملی⁷ کوپل شده و غیرخطی

¹ Hostile Situations

² Game Theory

³ Waypoints

⁴ Robust

⁵ Ergodicity

⁶ Henon Map

⁷ Underactuated

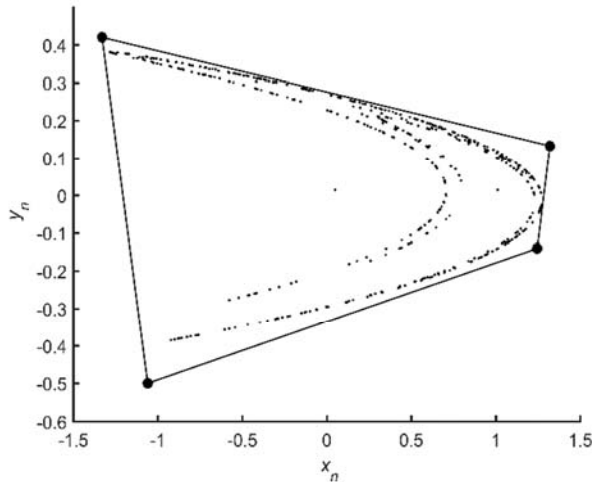


Fig. 1 The Henon map and its trapping region

شکل 1 نگاهت هنون و ناحیه بدام‌اندازی آن

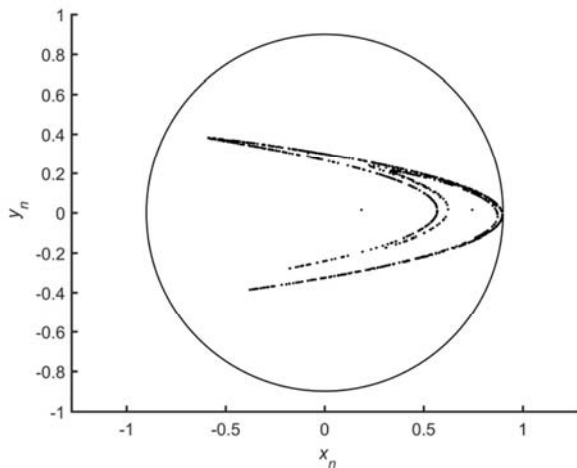


Fig. 2 The circular trapping region of adapted Henon system for $d=1.8m$

شکل 2 ناحیه بدام‌اندازی دایروی نگاهت تغییر یافته هنون با قطر 1.8 متر

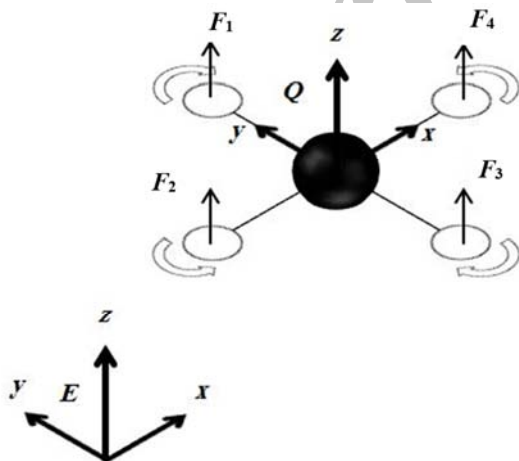


Fig. 3 Forces and moments acting on quadrotor

شکل 3 نیروها و گشتاورهای اعمالی بر کوادروتور

تغییر خواهد نمود، زاویه رول³ (ϕ) حرکت کوادروتور در جهت y و زاویه پیچ⁴ (θ) حرکت آن در جهت x را تأمین می‌کنند (شکل 4 قسمت b و c). زاویه

بدین منظور ابتدا یک دامنه دوبعدی با سیستم مختصات ساکن S' در نظر گرفته می‌شود. سپس در این چهارچوب مبنا یک مسیر بسته C که مرکز مختصات چهارچوب متحرک S روی آن با سرعت ثابت حرکت تناوبی انجام می‌دهد مستقر می‌شود. محورهای مختصات چهارچوب S نسبت به محورهای S' موازی خواهند بود و هرگونه دوران محورها صورت نخواهد گرفت. حرکت نسبی توسط معادله (2) توصیف می‌شود.

$$\vec{r}'(t) = \vec{r}(t) + \vec{r}'_o(t) \quad (2)$$

که در آن بردار موقعیت مسیر نسبت به چهارچوب ثابت، r بردار موقعیت مسیر نسبت به چهارچوب متحرک و r'_o بردار موقعیت مرکز چهارچوب متحرک نسبت به چهارچوب ثابت می‌باشند. آنچه در نشانه‌گذاری اهمیت دارد آن است که متغیرهای پرایم دار در دستگاه مختصات ثابت و متغیرهای بدون پرایم در دستگاه مختصات متحرک تعریف شده‌اند.

بدین ترتیب حرکت کلی را می‌توان توسط معادلات (3) توصیف نمود.

$$\begin{cases} \dot{x}'_{n+1} = x_{n+1} + \dot{x}'_{n+1} \\ \dot{y}'_{n+1} = y_{n+1} + \dot{y}'_{n+1} \\ \dot{x}_{n+1} = y_n + 1 - a \cdot x_n^2 \\ \dot{y}_{n+1} = b \cdot x_n \\ (\dot{x}'_{n+1}, \dot{y}'_{n+1}) = f(\dot{x}'_n, \dot{y}'_n) \end{cases} \quad (3)$$

مسیر جدید حاصله از لغزش سیستم هنون روی مرز بسته دارای خواص آشوبناک می‌باشد.

3-2- ناحیه بدام‌اندازی

با تغییر سیستم آشوبناک هنون توسط یک تبدیل همگر¹ می‌توان ناحیه بدام‌اندازی مسیر آشوبناک را تغییر داد؛ در این صورت کوادروتور از ناحیه بدام‌اندازی خارج نشده و نزدیک خط راهنمای مسیر آشوبناک خواهد ماند. به‌طور مثال برای ناحیه بدام‌اندازی به شکل یک دایره با قطر d می‌توان از تبدیل (4) استفاده نمود.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_n &= 0.3225 \cdot d \cdot x_n + 0.0875d \\ \tilde{y}_n &= y_n \end{aligned} \quad (4)$$

در شکل 2 ناحیه بدام‌اندازی نگاهت تغییر یافته هنون با قطر 1.8 متر نشان داده شده است.

3- مدل دینامیکی

مدل دینامیکی کوادروتور با وجود سیستم مکانیکی ساده دارای اثرات فیزیکی مختلفی از جمله: اثرات گرانشی، اثرات ژيروسکوپی حاصل از حرکت جسم صلب در فضا و چرخش چهار پیشرانه، اثرات آیرودینامیکی و غیره می‌باشد [16].

همان‌طور که در شکل 3 مشخص است مختصات ثابت زمین با E و مختصات متصل به کوادروتور با Q نشان داده شده است.

موقعیت مرکز ثقل کوادروتور با سه جهت (x, y, z) و وضعیت آن، با زوایای اوپلر (ϕ, θ, ψ) مشخص می‌شود. جهات زوایای اوپلر، نیروها و گشتاورهای لازم برای کنترل کوادروتور را فراهم می‌آورند. همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است دو موتور قطری 1 و 3 در یک جهت گردش می‌کنند در حالی که دو موتور دیگر 2 و 4 در جهت مخالف می‌گردند تا پاد-گشتاور² را خنثی سازند. در صورتی که هر چهار موتور با یک سرعت گردش نمایند (شکل 4 قسمت c) با تغییر یکسان و هم‌زمان سرعت‌های آن‌ها ارتفاع کوادروتور

³ Roll
⁴ Pitch

¹ Affine
² Anti-Torque

حرکت‌های انتقالی به زوایا بستگی دارند. این مهم به صورت فیزیکی نیز قابل درک می‌باشد به طور مثال در شکل 4 قسمت d برای حرکت کوادروتور به سمت پایین باید زاویه رول تغییر کند (در این حالت خاص). اما در شکل 4 قسمت a برای چرخش کوادروتور حول محور z نیاز به هیچ حرکت انتقالی نمی‌باشد.

همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است کنترل کوادروتور به دو بخش کنترل چرخش و کنترل موقعیت تقسیم می‌شود [18]. در کنترل موقعیت با داشتن مقادیر مطلوب x_d, y_d, z_d سه کنترل‌کننده u_x, u_y و u_z محاسبه شده سپس با استفاده از معادله (7) بدست می‌آید [19]:

$$\begin{cases} \phi_d = \arcsin(u_x \sin(\psi_d) - u_y \cos(\psi_d)) \\ \theta_d = \arcsin\left(\frac{u_x \cos(\psi_d) - u_y \sin(\psi_d)}{\cos(\phi_d)}\right) \end{cases} \quad (8)$$

زوایای رول و پیچ مطلوب (ϕ_d, θ_d) بدست آمده همراه با زاویه یاو مطلوب (ψ_d) در کنترل چرخش استفاده خواهند شد تا سه ورودی دیگر u_2, u_3 و u_4 بدست آیند. با اعمال ورودی‌های u_1 تا u_4 به سیستم، متغیرهای حالت با حل دستگاه معادلات دیفرانسیل بدست خواهند آمد.

2-4- کنترل مد لغزشی

سیستم 6 درجه آزادی غیرخطی (5) را در نظر می‌گیریم این سیستم دارای 6 معادله دینامیکی و 12 متغیر حالت می‌باشد. برای بدست آوردن معادلات در فضای حالت از تغییر متغیرهای (9) استفاده می‌شود.

$$\begin{cases} x_1 = \phi & x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\phi} \\ x_3 = \theta & x_4 = \dot{x}_3 = \dot{\theta} \\ x_5 = \psi & x_6 = \dot{x}_5 = \dot{\psi} \\ x_7 = z & x_8 = \dot{x}_7 = \dot{z} \\ x_9 = x & x_{10} = \dot{x}_9 = \dot{x} \\ x_{11} = y & x_{12} = \dot{x}_{11} = \dot{y} \end{cases} \quad (9)$$

بنابراین معادلات فضای حالت به شکل رابطه (10) نوشته می‌شوند.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_4 a_6 \Omega + x_4 a_2 \Omega + b_1 U_2 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = x_2 a_6 a_3 + x_2 a_4 \Omega + b_2 U_3 \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = x_4 x_2 a_5 + b_3 U_4 \\ \dot{x}_7 = x_8 \\ \dot{x}_8 = -g + (\cos x_1 \cos x_3) (1/m) U_1 \\ \dot{x}_9 = x_{10} \\ \dot{x}_{10} = u_x (1/m) U_1 \\ \dot{x}_{11} = x_{12} \\ \dot{x}_{12} = u_y (1/m) U_1 \end{cases} \quad (10)$$

که در آن:

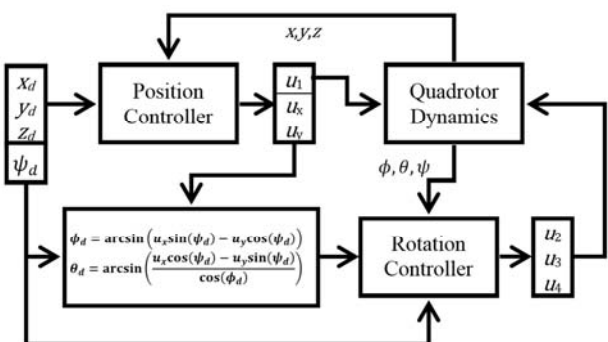


Fig. 5 Strategy of control

شکل 5 طرح کلی کنترل کوادروتور

یاو¹ (ψ) نیز چرخش کوادروتور حول محور z را با تغییر هم‌زمان سرعت موتورهای قطری (روبرو) موجب می‌شود (شکل 4 قسمت d).

مدل دینامیکی کلی کوادروتور به صورت معادله (5) تعریف می‌شود [20].

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \frac{(I_y - I_z)}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J_R}{I_x} \Omega \dot{\theta} + \frac{l}{I_x} U_2 \\ \ddot{\theta} = \frac{(I_z - I_x)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} - \frac{J_R}{I_y} \Omega \dot{\phi} + \frac{l}{I_y} U_3 \\ \ddot{\psi} = \frac{(I_x - I_y)}{I_z} \dot{\theta} \dot{\phi} + \frac{1}{I_z} U_4 \\ \ddot{z} = -g + (\cos \phi \cos \theta) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{x} = u_x \frac{U_1}{m} \\ \ddot{y} = u_y \frac{U_1}{m} \end{cases} \quad (5)$$

که در آن:

$$\begin{cases} U_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ U_2 = b(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ U_3 = b(\Omega_1^2 - \Omega_3^2) \\ U_4 = d(\Omega_2^2 + \Omega_4^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \\ \Omega = \Omega_2 + \Omega_4 - \Omega_1 - \Omega_3 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_x = (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi) \\ u_y = (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi) \end{cases} \quad (7)$$

همچنین b ضریب پیش‌رانش و d ضریب درگ است. m جرم کوادروتور و l فاصله مرکز جرم کوادروتور از مرکز هر موتور می‌باشد. $I(x, y, z)$ نیز ممان اینرسی در جهات مختلف و J_R ممان اینرسی پروانه می‌باشد.

4- کنترل کوادروتور

1-4- استراتژی کنترل

از آنجاکه کوادروتور طبعاً سیستمی زیرعملی است قابلیت کنترل هر 6 درجه آزادی تنها با استفاده از 4 ورودی کنترلی را داراست [17]. بنابراین در این حالت 2 درجه آزادی کوپل شده (حرکت در راستای محور x و y) وجود خواهد داشت. حرکت در این جهات مستقیماً به وضعیت کوادروتور نسبت به 4 درجه آزادی دیگر وابسته است. همان‌طور که از معادله (5) مشاهده می‌شود زوایا و مشتقاتشان به مؤلفه‌های حرکت انتقالی بستگی ندارند؛ اما برعکس

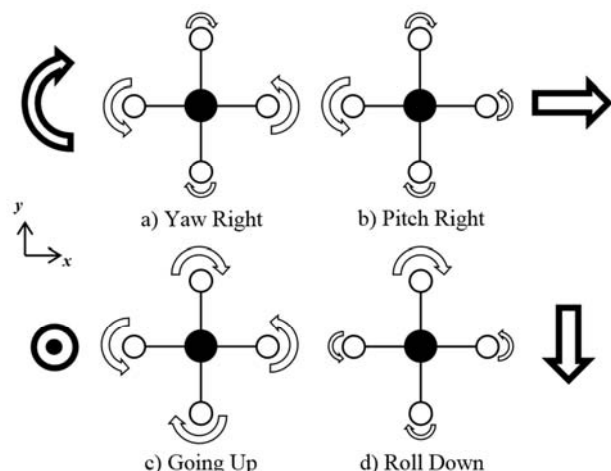


Fig. 4 Quadrotor concept motion description

شکل 4 توصیف مفهومی حرکت کوادروتور

¹ Yaw

2-5- انتخاب یک همسایگی که کوادروتور باید در محدوده آن حرکت

کند

همان‌گونه که پیش‌تر در بخش 2 بیان شد، با تغییر سیستم هنون با استفاده از یک تبدیل همگر می‌توان ناحیه بدام اندازی آن را تغییر داد. در این صورت کوادروتور در همسایگی خط راهنمای انتخاب‌شده خواهد ماند و از دایره‌ای به قطر d و با مرکزیت نقطه دلخواه p'_i روی مسیر بسته c خارج نخواهد شد.

انتخاب قطر دایره همسایگی به عوامل متعددی از جمله: رنج پروازی کوادروتور، سرعت متوسط آن، قانون کنترلی استفاده‌شده در کوادروتور، میزان خطر در ناحیه مورد نظارت، بحث حقوقی نقض حریم‌های هوایی و غیره بستگی خواهد داشت.

3-5- ایجاد مسیر جدید آشوبناک با استفاده از مفهوم حرکت نسبی

همان‌گونه که در بخش 2 بیان گردید با داشتن خط راهنما و انتخاب همسایگی موردنظر می‌توان نقطه مسیره‌های موردنیاز برای حرکت آشوبناک را تعیین نمود.

4-5- کنترل کوادروتور در مسیر موردنظر

با در نظر گرفتن $p'_n = (x'_n, y'_n, z'_0)$ به‌عنوان نقطه کنونی قرارگیری کوادروتور و $p'_{n+1} = (x'_{n+1}, y'_{n+1}, z'_0)$ و به‌عنوان نقطه مطلوب به کنترل کوادروتور پرداخته خواهد شد. که در آن ارتفاع پروازی می‌باشد. این مرحله تا پایان کامل مأموریت کوادروتور تکرار خواهد شد.

شمای کلی فرایندهای ذکرشده در این بخش به طور خلاصه در شکل 6 نشان داده شده است.

6- شبیه‌سازی و بحث در نتایج

1-6- مسیر آشوبناک

در این بخش دو مسیر نمونه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مورد اول به حرکت آشوبناک کوادروتور در اطراف یک مسیر ساده دایروی پرداخته می‌شود. از آنجا که امکان وجود اشکال مختلف از مرزهای موردنظر برای نظارت وجود خواهد داشت، الگوریتم برنامه‌ریزی حرکت باید قابلیت انطباق با هندسه‌های مختلف و نامنظم را دارا باشد؛ بنابراین از مسیری آشوبناک با خط راهنمای دلخواه برای اثبات کارایی روش ذکرشده استفاده خواهد شد.

1-1-6- مسیر آشوبناک با خط راهنمای دایروی

معادلات حرکت تناوبی گسسته روی دایره با شعاع R' و با P نقطه روی محیط آن با معادلات (19) تعریف می‌شود.

$$\begin{cases} \hat{x}' = R' \cdot \cos(\theta'_0 + 2\pi n/P) + x'_c \\ \hat{y}' = R' \cdot \sin(\theta'_0 + 2\pi n/P) + y'_c \end{cases} \quad (19)$$

θ'_0 زاویه مرکزی اولیه پادساعت‌گرد از محور افقی مثبت بوده و (x'_c, y'_c) مختصات مرکز دایره می‌باشد. با جایگذاری معادلات (19) در رابطه (3) مجموعه معادلات سیستم آشوبناک جدید بدست خواهد آمد.

$$\begin{cases} x'_{n+1} = x_{n+1} + \hat{x}'_{n+1} \\ y'_{n+1} = y_{n+1} + \hat{y}'_{n+1} \\ x_{n+1} = y_n + 1 - a \cdot x_n^2 \\ y_{n+1} = b \cdot x_n \\ \hat{x}'_{n+1} = R' \cdot \cos(\theta'_0 + 2\pi n/P) + x'_c \\ \hat{y}'_{n+1} = R' \cdot \sin(\theta'_0 + 2\pi n/P) + y'_c \end{cases} \quad (20)$$

مسیر آشوبناک طی شده توسط کوادروتور با $R' = 4$ و $P = 50$ در شکل 7 نشان داده شده‌است. شروع حرکت کوادروتور از نقطه (6,2) روی مسیر بسته بوده و با دو دور گردش در جهت پادساعت‌گرد در اطراف مسیر

$$\begin{cases} a_1 = (I_y - I_z)/I_x \\ a_2 = -J_R/I_x \\ a_3 = (I_z - I_x)/I_y \\ a_4 = J_R/I_y \\ a_5 = (I_x - I_y)/I_z \\ b_1 = l/I_x \\ b_2 = l/I_y \\ b_3 = 1/I_z \end{cases} \quad (11)$$

از مزایای کنترل مد لغزشی می‌توان به غیر حساس بودن به خطاهای مدل دینامیک، عدم قطعیت‌های پارامتری و دیگر اختلالات اشاره نمود [20]. برای طراحی کنترل مد لغزشی خطای ردیابی به‌صورت رابطه (12) و صفحه لغزشی به‌صورت معادله (13) تعریف می‌شوند [21].

$$\tilde{x}_i = x_i - x_{i_d} \quad , \quad i = 1, 3, \dots, 11 \quad (12)$$

$$s_i(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_i\right)^{N-1} \tilde{x}_i \quad , \quad i = 1, 3, \dots, 11 \quad (13)$$

در رابطه (13)، λ یک ثابت اکیدا مثبت بوده و N مرتبه سیستم می‌باشد.

از رابطه (12) و (13) و با در نظر گرفتن $N=2$ بدست می‌آید:

$$s_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{i_d} + \lambda_i x_i - \lambda_i x_{i_d} \quad , \quad i = 1, 3, \dots, 11 \quad (14)$$

با مشتق‌گیری از سطوح لغزش داریم:

$$\dot{s}_i = \ddot{x}_i - \ddot{x}_{i_d} + \lambda_i \dot{x}_i - \lambda_i \dot{x}_{i_d} \quad , \quad i = 1, 3, \dots, 11 \quad (15)$$

با برابر صفر قرار دادن مشتق سطوح لغزش به دست می‌آید:

$$\begin{cases} \dot{x}_j - \dot{x}_{j_d} + \lambda_j \dot{x}_j - \lambda_j \dot{x}_{j_d} = 0 \\ i = 1, 3, \dots, 11 \quad , \quad j = 2, 4, \dots, 12 \end{cases} \quad (16)$$

از معادلات (10) و (16) ورودی‌های کنترلی بدست می‌آیند:

$$\begin{cases} \hat{u}_1 = (m/\cos x_1 \cos x_3)(g + \ddot{x}_{7_d} - \lambda_7 x_8 + \lambda_7 \dot{x}_{7_d}) \\ \hat{u}_x = (m/u_1)(\ddot{x}_{9_d} - \lambda_9 x_{10} + \lambda_9 \dot{x}_{9_d}) \\ \hat{u}_y = (m/u_1)(\ddot{x}_{11_d} - \lambda_{11} x_{12} + \lambda_{11} \dot{x}_{11_d}) \\ \hat{u}_2 = (\ddot{x}_{1_d} + \lambda_1 \dot{x}_{1_d} - \lambda_1 x_2 - x_4 x_6 a_1 - x_4 a_2 \Omega)/b_1 \\ \hat{u}_3 = (\ddot{x}_{3_d} + \lambda_3 \dot{x}_{3_d} - \lambda_3 x_4 - x_2 x_6 a_3 - x_2 a_4 \Omega)/b_2 \\ \hat{u}_4 = (\ddot{x}_{5_d} + \lambda_5 \dot{x}_{5_d} - \lambda_5 x_6 - x_4 x_2 a_5)/b_3 \end{cases} \quad (17)$$

برای طراحی کنترل مد لغزشی بردارهای ورودی به‌صورت معادلات (18) در نظر گرفته می‌شود که در آن k_i یک عدد ثابت است و باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که سیستم در مرز پایداری قرار گیرد. زیرا مقادیر کوچک k می‌تواند باعث ناپایداری سیستم شده و مقادیر بزرگ آن منجر به ورودی کنترلی بزرگ می‌شود [22].

$$\begin{cases} u_1 = \hat{u}_1 - k_1 \text{sgn}(s_7) \\ u_x = \hat{u}_x - k_2 \text{sgn}(s_9) \\ u_y = \hat{u}_y - k_3 \text{sgn}(s_{11}) \\ u_2 = \hat{u}_2 - k_4 \text{sgn}(s_1) \\ u_3 = \hat{u}_3 - k_5 \text{sgn}(s_3) \\ u_4 = \hat{u}_4 - k_6 \text{sgn}(s_5) \end{cases} \quad (18)$$

5- الگوریتم کلی

بر اساس بخش‌های گذشته می‌توان یک متد کلی برای ایجاد حرکت آشوبناک یک کوادروتور طراحی نمود. این متد را می‌توان در 4 مرحله دسته‌بندی نمود.

1-5- انتخاب یک مسیر بسته در دامنه فضای دو بعدی

مسیر بسته (c) انتخاب شده در این مرحله خط راهنمای موردنظر برای مسیر آشوبناک نهایی را فراهم می‌آورد. این مسیر بسته باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که در مجاورت مرز موردنظر برای نظارت قرار گیرد. مسیر بسته انتخاب شده باید به‌صورت یک تابع متناوب گسسته فرمول‌بندی شود.

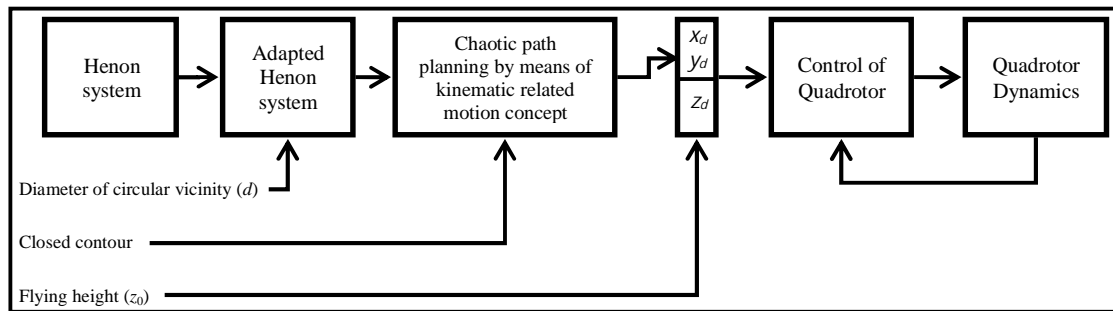


Fig. 6 General algorithm for chaotic path planning of quadrotor

شکل 6 الگوریتم کلی برنامه‌ریزی آشوبناک

کمک الگوریتم ارائه شده می‌توان محدوده نظارت بر روی مرز را تنظیم نمود. به عبارت دیگر کوادروتور از محدوده از پیش تعیین شده در همسایگی مرز تجاوز نخواهد نمود. تعریف و حل مساله نظارت "مرزی" برای یک ربات پرنده ضمن در نظر گرفتن دینامیک غیرخطی سیستم، بر پیچیدگی مساله افزوده است. اما الگوریتم ارائه شده به علت حجم محاسبات کم و همچنین حافظه داخلی موردنیاز ناچیز، روش مناسبی برای به‌کارگیری در انواع مختلف کوادروتور می‌باشد و کوادروتور می‌تواند تمام محاسبات را در حین پرواز در برد اصلی خود انجام دهد. علاوه بر این موضوع، روش ارائه شده قابلیت انطباق بر مرزهای هموار و غیرهموار را داراست و محدوده تحت پوشش با پارامتری به نام ناحیه بدام اندازی قابل تنظیم است.

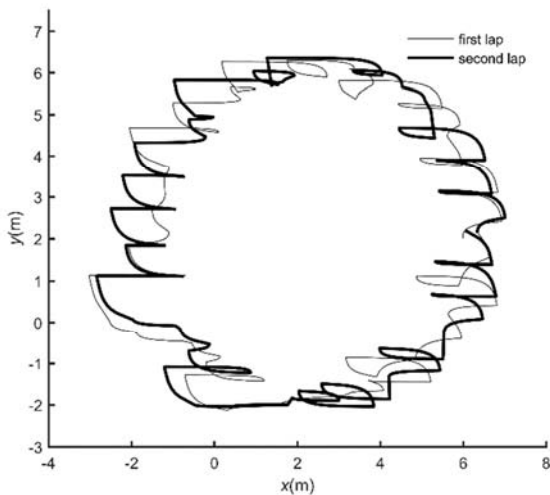


Fig. 7 Chaotic quadrotor path in the proximity of a circular contour

شکل 7 حرکت آشوبناک کوادروتور در نزدیکی مرز بسته دایروی

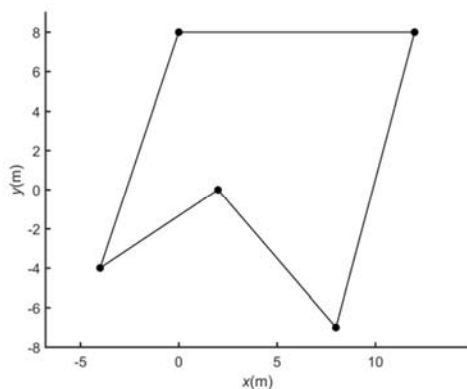


Fig. 8 Polygonal closed contour

شکل 8 مرز بسته چندضلعی

دایره‌ای شکل به نقطه اولیه (نقطه مطابق با نقطه اولیه روی مسیر بسته) حرکت بازگشته است. در این مثال در ایجاد نقطه مسیره‌های موردنظر برای حرکت کوادروتور از هیچ تبدیلی بر روی نگاشت هنون استفاده نشده است و همسایگی حرکت کوادروتور در اطراف مرز بسته توسط ناحیه بدام اندازی نگاشت هنون تعیین شده است. همان‌گونه که از شکل 7 پیداست مسیر طی شده توسط کوادروتور در دور اول و دوم گردش منطبق نبوده و کوادروتور مسیره‌های متفاوت و غیر قابل پیش‌بینی را در هر یک از دورها پیموده است.

6-1-2- مسیر آشوبناک با خط راهنمای دلخواه

در این بخش از خط راهنمای پیچیده‌تری برای اثبات یافته‌های خویش استفاده می‌شود. خط راهنمای موردنظر برای مسیر آشوبناک یک چندضلعی با رئوس $(-4, -4)$ ، $(0, 8)$ ، $(12, 8)$ ، $(8, -7)$ و $(2, 0)$ در مختصات کارترین می‌باشد. ناحیه بدام‌اندازی، دایره‌ای به قطر 1.5 متر در نظر گرفته شده است. خط راهنما و مسیر آشوبناک طی شده توسط کوادروتور به ترتیب در شکل‌های 8 و 9 نشان داده شده است. در این مثال کوادروتور حرکت خود را از نقطه $(-4, -4)$ روی مسیر بسته آغاز کرده و پس از طی دو دور کامل به نقطه اولیه باز می‌گردد. مسیر حرکت کوادروتور در هر یک از دورها متفاوت بوده و کوادروتور مسیری غیر قابل پیش‌بینی را می‌پیماید. علاوه بر این با در نظر گرفته شدن $d=1.5m$ برای همسایگی دایروی اطراف مسیر بسته، کوادروتور به مسیر نزدیک‌تر شده و در فاصله کمتری از آن حرکت می‌کند. شکل 10 همسایگی تعریف شده برای حرکت کوادروتور را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل پیداست کوادروتور از همسایگی تعریف شده خارج نشده و در نزدیکی مرز بسته به مسیر خود ادامه می‌دهد. تعداد نقاط تعریف‌شده بر روی هر یک از خطوط مستقیم مسیر بسته 10 عدد می‌باشد. با افزایش تعداد نقاط روی مسیر بسته تغییر جهت‌های متوالی کوادروتور افزایش یافته و تعقیب آن سخت‌تر می‌شود. از طرف دیگر طول مسیر طی شده افزایش یافته و با توجه به محدودیت انرژی کوادروتور ممکن است چندان مطلوب نباشد.

7- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی برنامه‌ریزی آشوبناک حرکت برای مأموریت نظارت مرزی یک کوادروتور در شرایط خصمانه پرداخته شد. در موارد نمونه ارائه شده برای ایجاد نقطه مسیره‌های موردنظر مسیر آشوبناک در یک مورد از سیستم هنون و در مورد دیگر، به منظور نزدیک کردن مسیر آشوبناک به خط راهنما، از سیستم هنون تغییر یافته استفاده شد. همچنین کارایی و غیر قابل پیش‌بینی بودن مسیر به واسطه عدم تطبیق مسیره‌های حاصله در دور-های مختلف حرکت کوادروتور به اثبات رسید. ضمناً نشان داده شد که با

patroller and single intruder, *Artificial Intelligence*, Vol. 184, pp. 78-123, 2012.

[4] E. Hernández, A. Barrientos, J. del Cerro, Selective Smooth Fictitious Play: An approach based on game theory for patrolling infrastructures with a multi-robot system, *Expert Systems with Applications*, Vol. 41, No. 6, pp. 2897-2913, 2014.

[5] C. K. Volos, I. M. Kyprianidis, I. N. Stouboulos, A chaotic path planning generator for autonomous mobile robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 60, No. 4, pp. 651-656, 2012.

[6] R. C. Hilborn, S. Coppersmith, A. J. Mallinckrodt, S. McKay, Chaos and nonlinear dynamics: an introduction for scientists and engineers, *Computers in Physics*, Vol. 8, No. 6, pp. 689-689, 1994.

[7] J.-P. Eckmann, D. Ruelle, Ergodic theory of chaos and strange attractors, *Reviews of modern physics*, Vol. 57, No. 3, pp. 617, 1985.

[8] D.-I. Curia, C. Volosencu, A 2D chaotic path planning for mobile robots accomplishing boundary surveillance missions in adversarial conditions, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 19, No. 10, pp. 3617-3627, 2014.

[9] D.-I. Curia, C. Volosencu, Chaotic trajectory design for monitoring an arbitrary number of specified locations using points of interest, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2012, 2012.

[10] Z. Sarris, S. Atlas, Survey of UAV applications in civil markets, *IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation*, pp. 11, 2001.

[11] A. Jaimes, S. Kota, J. Gomez, An approach to surveillance an area using swarm of fixed wing and quad-rotor unmanned aerial vehicles UAV(s), *IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, pp. 1-6, 2008.

[12] K. W. Weng, M. S. b. Z. Abidin, Design and Control of a Quad-Rotor Flying Robot For Aerial Surveillance, *4th Student Conference on Research and Development*, pp. 173-177, 2006.

[13] Y. Hong Chul, A. Rami, S. Belal, G. Ermal, K. Daniel, R. Osamah, Implementation of an Autonomous Surveillance Quadrotor System, *AIAA Conference on Aerospace*, pp. 1-7, 2009.

[14] D.-I. Curia, C. Volosencu, Path Planning Algorithm based on Arnold Cat Map for Surveillance UAVs, *Defence Science Journal*, Vol. 65, No. 6, pp. 483-488, 2015.

[15] M. Hénon, A two-dimensional mapping with a strange attractor, *Communications in Mathematical Physics*, Vol. 50, No. 1, pp. 69-77, 1976.

[16] E. Davoodi, M. Rezaei, Dynamic modeling, simulation and control of a quadrotor using MEMS sensors' experimental data, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 176-184, 2014. (in Persian)

[17] T. Madani, A. Benallegue, Backstepping Control for a Quadrotor Helicopter, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3255-3260, 2006.

[18] S. Bouabdallah, R. Siegwart, Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro quadrotor, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2247-2252, 2005.

[19] H. Khebbache, M. Tadjine, Robust fuzzy backstepping sliding mode controller for a quadrotor unmanned aerial vehicle, *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, Vol. 15, No. 2, pp. 3-11, 2013.

[20] R. Xu, Ü. Özgüner, Sliding mode control of a quadrotor helicopter, *45th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 4957-4962, 2006.

[21] J.-J. E. Slotine, W. Li, *Applied nonlinear control*, pp. 278, Englewood Cliffs, Prentice hall, 1991.

[22] H. K. Khalil, J. Grizzle, *Nonlinear systems*, pp. 552-578, New Jersey, Prentice hall, 1996.

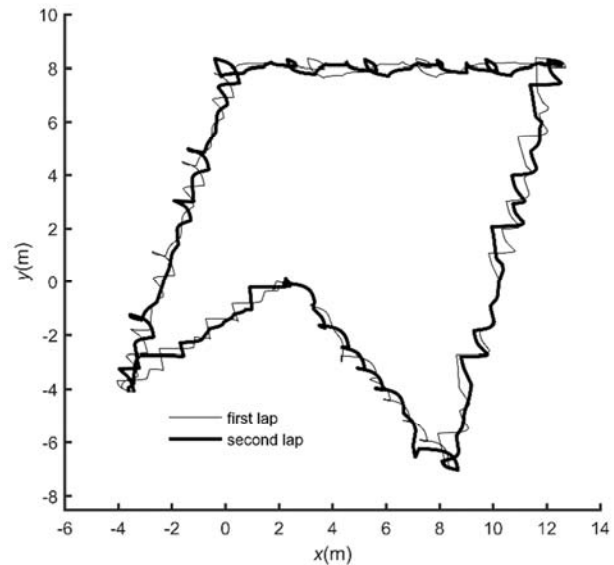


Fig. 9 Chaotic quadrotor path in the proximity of polygonal closed curve

شکل 9 حرکت آشوبناک کوادروتور در نزدیکی مرز بسته چندضلعی

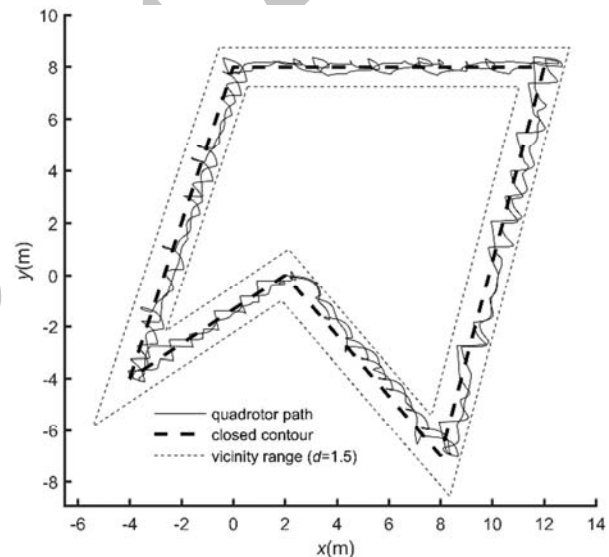


Fig. 10 Chaotic quadrotor path in its specified vicinity

شکل 10 حرکت آشوبناک کوادروتور در همسایگی تعریف شده برای آن

8- مراجع

[1] T. Miyazaki, M. Tamura, S. Kawabata, T. Yoshimi, J. Hirokawa, H. Ogawa, Surveillance system and surveillance robot, Google Patents, 2004.

[2] C.-Y. Chen, B.-Y. Shih, C.-H. Shih, W.-C. Chou, RETRACTED: The development of autonomous low-cost biped mobile surveillance robot by intelligent bricks, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 18, No. 5, pp. 577-586, 2012.

[3] N. Basilico, N. Gatti, F. Amigoni, Patrolling security games: Definition and algorithms for solving large instances with single