ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

نظارت مرزی با استفاده از برنامهریزی آشوبناک حرکت برای ربات کوادروتور

پيام شفيعى گوهرى 1 ، سجاد تقوايى 2 ، حسين محمدى 2

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

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز

* شيراز صندوق پستى sj.taghvaei@shirazu.ac.ir ،713481154

چکیدہ	اطلاعات مقاله
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 قطحی خود، برای این موضوع، مناسبتر است. همچنین مقاوم و ارگودیک بودن ذاتی مسیرهای آشوبناک در مقایسه با توابع تصادفی، در پیاده	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 02 شهریور 1395 پذیرش: 09 مهر 1395 ارائه در سایت: 09 آبان 1395 <i>کلید واژگان:</i>
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 موردنیاز 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 کنترل کوادروتور با استفاده از روش مد لغزشی پرداخته میشود. در انتها نیز شده، به ویژه از منظر غیر قابل پیش بینی 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.	نظارت مرزی برنامهریزی آشوبناک حرکت کوادروتور کنترل مد لغزشی

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 surveillant 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 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.

رباتهای خودگردان، سیستمهای بی درنگ² هوشمندی هستند که می توانند بدون دخالت انسان در محیطهای طبیعی و غیرطبیعی عمل کرده و وظایف مختلفی از جمله نظارت را به انجام برسانند. الگوریتم برنامه ریزی حرکت از نکات مهم و ضروری در طراحی رباتهای ناظر به شمار می رود [2]. در شرایط عادی به علت وجود تغییرات متوالی و تصادفی در محیط، الگوریتم برنامه ریزی حرکت باید به گونه ای باشد که یک مسیر بهینه را برای حرکت

1- مقدمه

مسأله نظارت ازجمله 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].

¹ Autonomous



² Real-Time

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ربات در شرایط مختلف بهمنظور تکمیل اهداف موردنظر فراهم آورد.

در شرایط خصمانه مأموریتهای نظارتی رباتها باید مسیر حرکت بهصورت غیر قابل پیشبینی برای مشاهده گر خارجی طراحی شود. بهمنظور حل این مسأله و غلبه بر عوامل متخاصم احتمالی می توان از دو مقوله کلی استفاده نمود: تئورى بازى2 [4,3] و استفاده از توالىهاى آشوبناك و تصادفي 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، روش مناسبی برای به کارگیری در محیطها و کاربردهای واقعی را ندارد. هرکدام از روشهای توالی تصادفی و توالی آشوبناک میتواند در تولید نقطه-مسیرهای³ غیر قابل پیش بینی 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 می توانند 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 موردنظر [9] تقسیم میشود. سیستمهای آشوبناک به علت ویژگی "حساسیت به شرایط اولیه"، چهارچوب موردنیاز 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 به گونهای طراحی نمودهاند که برای عامل خارجی قابل پیش بینی 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 می تواند کارکرد به مراتب بهتری در اهداف نظارتی را بر آورده سازد.

در میان رباتهای خودگردان پرندههای بدون سرنشین به دلایل مختلف ازجمله: اشراف بر اهداف مورد نظارت، چابکی و مانورپذری 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 موردتوجه قرار نگرفته است.

مدل دینامیکی کوادروتور یک سیستم زیرعملی⁷ کوپل شده و غیرخطی

میباشد که با عدم قطعیتهایی نیز همراه است؛ ازاینرو 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 مود لغزشی طراحی و شبیهسازی شده است. در انتها نیز موارد شبیهسازی شده و نتایج موردبررسی قرار می گیرد.

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 موردنظر معرفی و طراحی میگردد. در قسمت 3 مدل دینامیکی بررسی شده و در قسمت 4 کنترلر موردنظر 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 می باشد.

در این بخش در ابتدا به معرفی سیستم هنون پرداخته سپس با استفاده از این سیستم به طراحی مسیری غیر قابل پیش بینی در مجاورت یک مرز بسته دلخواه پرداخته می شود.

1-2- سيستم آشوبناک هنون

نگاشت هنون یک سیستم دینامیکی با گسستگی زمانی میباشد. این نگاشت نقطه ((۲٫۱٫۷٫ را در صفحه دریافت کرده و آن را به نقطهای جدید مینگارد.

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= y_n + \mathbf{1} - a \cdot x_n^2 \\ y_{n+1} &= b \cdot x_n \end{aligned} \tag{1}$$

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 ۱ نشان داده شده است نگاشت هنون دارای ناحیه بدام اندازی (ناحیهای که همه مسیرهای ورودی به آن هرگز از آن خارج نخواهند شد [6].) به صورت یک چهارضلعی با رئوس (1.33,0.42-)، (1.32,0.13)، (1.245,-0.14) و (0.5-,106-) می باشد [15]. از آنجاکه هدف نزدیک نگه داشتن 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]

¹ Hostile Situations

Game Theory Waypoints

⁴ Robust

⁵ Ergodicity

⁶ Henon Map ⁷ Underactuated



Fig. 1 The Henon map and its trapping region







شکل 2 ناحیه بداماندازی دایروی نگاشت تغییریافته هنون با قطر 1.8 متر





Fig. 3 Forces and moments acting on quadrotor شکل 3 نیروها و گشتاورهای اعمالی بر کوادروتور

 4 تغيير خواهد نمود. زاويه رول $^{3}\left(\phi
ight)$ حركت كوادروتور در جهت y و زاويه پيچ حركت آن در جهت x را تأمين مىكنند (شكل 4 قسمت b و c). زاويه (θ)

³ Roll ⁴ Pitch

219

بدین منظور ابتدا یک دامنه دوبعدی با سیستم مختصات ساکن 'S در نظر گرفته می شود. 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 نسبى توسط معادله (2) توصيف مىشود.

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

که در آن r بردار موقعیت مسیر نسبت به چهارچوب ثابت، r بردار موقعیت مسیر نسبت به چهارچوب متحرک و r_0 بردار موقعیت مرکز چهارچوب متحرک نسبت به چهارچوب ثابت میباشند. آنچه در نشانه گذاری 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 می توان توسط معادلات (3) توصیف نمود. $x'_{n+1} = x_{n+1} + \hat{x'}_{n+1}$ $y'_{n+1} = y_{n+1} + \hat{y'}_{n+1}$ $x_{n+1} = y_n + \mathbf{1} - a \cdot x_n^2$ $y_{n+1} = b \cdot x_n$ $\left(\left(\widehat{x'}_{n+1}, \widehat{y'}_{n+1}\right) = f\left(\widehat{x'}_{n}, \widehat{y'}_{n}\right)$ (3)

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

3-2- ناحيه بدام اندازى

با تغییر سیستم آشوبناک هنون توسط یک تبدیل همگر¹ می توان ناحیه بدام اندازی مسیر آشوبناک را تغییر داد؛ دراینصورت کوادروتور از ناحیه بدام-اندازی خارج نشده و نزدیک خط راهنمای مسیر آشوبناک خواهد ماند. بهطور مثال برای ناحیه بداماندازی به شکل یک دایره با قطر d می توان از تبدیل (4) استفاده نمود.

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

در شکل 2 ناحیه بداماندازی نگاشت تغییریافته هنون با قطر 1.8 متر نشان داده شده است.

3- مدل ديناميكي

مدل ديناميكى كوادروتور باوجود سيستم مكانيكى ساده داراى اثرات فيزيكى مختلفی ازجمله: اثرات گرانشی، اثرات ژیروسکوپی حاصل از حرکت جسم صلب در فضا و چرخش چهار پیشرانه، اثرات آیرودینامیکی و غیره می باشد .[16]

همان طور 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 اویلر $(\phi, heta, \psi)$ مشخص می شود. جهات زوایای اویلر، 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 درحالی که دو موتور دیگر 2 و 4 در جهت مخالف می گردند تا پاد-گشتاور² را خنثی سازند. درصورتی که هر چهار موتور با یک سرعت گردش نمایند (شکل 4 قسمت c) با تغییر یکسان و همزمان سرعتهای آنها ارتفاع کوادروتور

x,

¹ Affine ² Anti-Torque

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

مدل ديناميكي كلى كوادروتور بهصورت معادله (5) تعريف مي شود [20].

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} = \frac{(l_y - l_z)}{l_x} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J_R}{l_x} \Omega \dot{\theta} + \frac{l}{l_x} U_2 \\ \ddot{\theta} = \frac{(l_z - l_x)}{l_y} \dot{\phi} \dot{\psi} - \frac{J_R}{l_y} \Omega \dot{\phi} + \frac{l}{l_y} U_3 \\ \ddot{\psi} = \frac{(l_x - l_y)}{l_z} \dot{\theta} \dot{\phi} + \frac{1}{l_z} U_4 \\ \ddot{z} = -g + (\cos\phi \cos\theta) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{z} = u_x \frac{U_1}{m} \\ \ddot{y} = u_y \frac{U_1}{m} \end{cases}$$
(5)

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

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

4-كنترل كوادروتور

(6)

1-4- استراتژی کنترل

ازآنجاکه کوادروتور طبعا 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 مستقیما به وضعیت کوادروتور نسبت به 4 درجه آزادی دیگر وابسته است. همان طور که از معادله (5) مشاهده می شود زوایا و مشتقاتشان به مؤلفه های حرکت انتقالی بستگی ندارند؛ اما برعکس



شکل 5 طرح کلی کنترل کوادروتور ^۱ Yaw

U

حرکتهای انتقالی به زوایا بستگی دارند. این مهم بهصورت فیزیکی نیز قابل درک می باشد به طور مثال در شکل 4 قسمت *b* برای حرکت کوادرو تور به سمت پایین باید زاویه رول تغییر کند (در این حالت خاص). اما در شکل 4 قسمت *a* برای چرخش کوادرو تور حول محور *z* نیاز به هیچ حرکت انتقالی نمی باشد.

همانطورکه در شکل 5 نشان داده شده است کنترل کوادروتور به دو بخش کنترل چرخش و کنترل موقعیت تقسیم میشود [18]. در کنترل u_y و u_x u_1 میترل کننده u_x و u_x u_y و u_z سه کنترل کننده u_x و u_y محاسبه شده سپس با استفاده از معادله (7) بدست میآید [19]:

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

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

2-4- كنترل مد لغزشى

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

$$\begin{cases} x_{1} = \phi \\ x_{3} = \theta \\ x_{5} = \psi \\ x_{7} = z \\ x_{9} = x \\ x_{11} = y \end{cases} \begin{pmatrix} x_{1} = \dot{x}_{1} = \dot{\phi} \\ x_{6} = \dot{x}_{5} = \psi \\ x_{10} = \dot{x}_{11} = \dot{y} \\ x_{11} = y \\ x_{12} = \dot{x}_{11} = \dot{y} \end{cases} (9)$$

$$(9)$$

$$(9)$$

$$(10)$$

$$(10)$$

$$(10)$$

$$(10)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

$$(3)$$

X, Y, Z

U

Ux

Ouadrotor

Dynamics

^{φ,θ,ψ}

Rotation

Controller

Fig. 5 Strategy of control

Position

Controller

 $\arcsin\left(u_x\sin(\psi_d) - u_y\cos(\psi_d)\right)$

 $rcsin\left(\frac{u_x cos(\psi_d) - u_y sin(\psi_d)}{u_y sin(\psi_d)}\right)$

 $\cos(\phi_d)$

 $\begin{pmatrix} a_1 = (I_y - I_z)/I_x \\ a_2 = -J_R/I_x \\ a_3 = (I_z - I_z)/I_y \\ a_4 = J_R/I_y \\ a_5 = (I_x - I_y)/I_z \end{cases}$

$$a_5 = (I_x - I_y)/I_z$$

$$b_1 = l/I_x$$

$$b_{2} = l I_{y}$$

$$b_{2} = l I_{y}$$

$$b_{3} = \mathbf{1} I_{z}$$
(11)

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

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

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

$$s_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{id} + \lambda_i x_i - \lambda_i x_{id}$$
 , $i = 1,3,...,11$ (14)
با مشتق گیری از سطوح لغزش داریم:

 $\dot{s}_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{id} + \lambda_i \dot{x}_i - \lambda_i \dot{x}_{id}$, i = 1,3,...,11 (15) μ با برابر صفر قرار دادن مشتق سطوح لغزش به دست می آید:

$$\dot{x}_{j} - \ddot{x}_{id} + \lambda_{i}x_{j} - \lambda_{i}\dot{x}_{id} = \mathbf{0}$$

 $i = \mathbf{1}, \mathbf{3}, \dots, \mathbf{11}$, $j = \mathbf{2}, \mathbf{4}, \dots, \mathbf{12}$ (16)

از معادلات (10) و(16) ورودىھاى كنترلى بدست مىآيند:

$$\begin{cases} \hat{u}_{1} = (m/\cos x_{1}\cos x_{3})(g + \ddot{x}_{7d} - \lambda_{7}x_{8} + \lambda_{7}\dot{x}_{7d}) \\ \hat{u}_{x} = (m/u_{1})(\ddot{x}_{9d} - \lambda_{9}x_{10} + \lambda_{9}\dot{x}_{9d}) \\ \hat{u}_{y} = (m/u_{1})(\ddot{x}_{11d} - \lambda_{11}x_{12} + \lambda_{11}\dot{x}_{11d}) \\ \hat{u}_{2} = (\ddot{x}_{1d} + \lambda_{1}\dot{x}_{1d} - \lambda_{1}x_{2} - x_{4}x_{6}a_{1} - x_{4}a_{2}\Omega)/b_{1} \\ \hat{u}_{3} = (\ddot{x}_{3d} + \lambda_{3}\dot{x}_{3d} - \lambda_{3}x_{4} - x_{2}x_{6}a_{3} - x_{2}a_{4}\Omega)/b_{2} \\ \hat{u}_{4} = (\ddot{x}_{5d} + \lambda_{5}\dot{x}_{5d} - \lambda_{5}x_{6} - x_{4}x_{2}a_{5})/b_{3} \end{cases}$$
(17)

برای طراحی کنترلر مد لغزشی بردارهای ورودی بهصورت معادلات (18) در نظر گرفته می شود که در آن *i*^A یک عدد ثابت است و باید به گونهای انتخاب شود که سیستم در مرز پایداری قرار گیرد. زیرا مقادیر کوچک *A* می تواند باعث ناپایداری سیستم شده و مقادیر بزرگ آن منجر به ورودی کنترلی بزرگ می شود [22].

(18)

5- الگوريتم کلي

بر اساس بخشهای گذشته میتوان یک متد کلی برای ایجاد حرکت آشوبناک یک کوادروتور طراحی نمود. این متد را میتوان در 4 مرحله دسته-بندی 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 فرمول,ندی شود.

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

همان گونه که پیش تر در بخش 2 بیان شد، با تغییر سیستم هنون با استفاده از یک تبدیل همگر می توان ناحیه بدام اندازی آن را تغییر داد. در این صورت کوادرو تور در همسایگی خط راهنمای انتخاب شده خواهد ماند و از دایرهای به قطر *b* و با مرکزیت نقطه دلخواه *p*[']_i روی مسیر بسته c خارج نخواهد شد.

انتخاب قطر دایره همسایگی به عوامل متعددی ازجمله: رنج پروازی کوادروتور، سرعت متوسط آن، قانون کنترلی استفاده شده 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 مسیرهای موردنیاز برای حرکت آشوبناک را تعیین نمود.

4-5-كنترل كوادروتور در مسير موردنظر

با در نظر گرفتن (x'_{n}, y'_{n}, z'_{n} بهعنوان نقطه کنونی قرارگیری کوادروتور و ($p'_{n+1} = (x'_{n+1}, y'_{n+1}, z'_{n})$ بهعنوان نقطه مطلوب به کنترل کوادروتور پرداخته خواهد شد. که در آن z'_{n} 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 آنجاکه 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.

$$\begin{aligned} & \{\hat{x}' = R' \cdot \cos(\theta_0' + 2\pi n/P) + x_c' \\ & \hat{y}' = R' \cdot \sin(\theta_0' + 2\pi n/P) + y_c' \end{aligned}$$
(19)

(19) ((1) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1)) ((1))

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

P=50 مسیر آشوبناک طی شده توسط کوادروتور با $\mathbf{x}'_c = \mathbf{y}'_c = \mathbf{x}'_c = \mathbf{y}_c$ و R' = 4 و $R' = y'_c$ در شکل 7 نشان داده شدهاست. شروع حرکت کوادروتور از نقطه (6,2) روی مسیر بسته بوده و با دو دور گردش در جهت پادساعت گرد در اطراف مسیر



Fig. 6 General algorithm for chaotic path planning of quadrotor

شکل 6 الگوریتم کلی برنامه ریزی آشوبناک

دایرهای شکل به نقطه اولیه (نقطه مطابق با نقطه اولیه روی مسیر بسته) حرکت بازگشته است. در این مثال در ایجاد نقطه مسیرهای 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 مسیرهای متفاوت و غیر قابل پیشبینی را در هر یک از دورها پیموده است.

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

در این بخش از خط راهنمای پیچیدهتری برای اثبات یافتههای خویش استفاده می شود. خط راهنمای موردنظر برای مسیر آشوبناک یک چندضلعی با رئوس (4,-4)، (0,8)، (12,8)، (7,-8) و (2,0) در مختصات کارتزین می باشد. 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 می گردد. مسیر حرکت کوادروتور در هر یک از دورها متفاوت بوده و کوادروتور مسیری غیر قابل پیشبینی را می پیماید. 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. همان گونه که از شکل پیداست کوادروتور از همسایگی تعریف شده خارج نشده و در نزدیکی مرز بسته به مسیر خود ادامه میدهد. تعداد نقاط تعریف شده 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 سخت ر می شود. از طرف دیگر طول مسیر طی شده افزایش یافته و با توجه به محدودیت انرژی کوادروتور ممکن است چندان مطلوب نباشد.

7- نتیجه گیری

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 مسیرهای 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 تغییریافته استفاده شد. همچنین کارایی و غیر قابل پیشبینی بودن مسیر به واسطه عدم تطبیق مسیرهای حاصله در دور-های مختلف حرکت کوادروتور به اثبات رسید. ضمنا نشان داده شد که با

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 رداخلی موردنیاز ناچیز، روش مناسبی برای بهکارگیری در انواع مختلف کوادروتور می بشد 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 شكل 7 حركت آشوبناك كوادروتور در نزديكي مرز بسته دايروي



شکل 8 مرز بسته چندضلعی

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. Curiac, 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. Curiac, 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. Curiac, 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 فارسى)
- [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

- 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