مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 1-11

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

الگوریتم همکاری پرنده‌های بدون سرنشین خودکار جهت تعقیب هدف متحرک در محیط پرخطر

اسماعیل خان‌میرزا[1*]، مرتضی حق‌بیگی[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 163-16765، khanmirza@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 بهمن 1395

پذیرش: 22 فروردین 1396

ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

همکاری

هدایت خودکار

تعقیب هدف

طراحی مسیر

پرنده بدون سرنشین

چکیده

خودکاری و همکاری از مهم‌ترین جنبه‌های تحقیقاتی سیستم‌های بدون سرنشین است که به واسطه آن‌ها استفاده بیشتری از مزیت این سیستم‌ها امکان‌پذیر می‌شود. بیشترین کاربردها مربوط به موسسات دولتی مانند گشت ساحلی، گشت مرزی، خدمات اورژانسی و پلیس است که نیاز به سیستم‌های نظارت و مراقبت دارند. در این تحقیق یک الگوریتم همکاری برای تیمی از پهپادهای خودکار جهت تعقیب هدف متحرک در محیطی پرخطر طراحی و شبیه‌سازی شده است. ابتدا یک فرمول‌بندی ریاضی برای تعریف منطقه عملیات شامل انواع مختلف تهدیدات در یک چارچوب واحد ارائه شده است، سپس یک استراتژی هدایت با به کارگیری سیستم قانون پایه، برای هدایت هر پهپاد به موقعیت مشخص شده توسط الگوریتم همکاری ارائه شده است که الزامات تکمیل مأموریت، اجتناب از موانع، کمینه کردن سطح تهدیدات، اجتناب از برخورد و در نظر گرفتن قیود دینامیکی پهپادها را شامل می‌شود. الگوریتم همکاری توسط یک آرایش متغیر وابسته به یک تابع هزینه تعریف شده و به واسطه آن عملکرد تیم تعقیب بهبود یافته است، زیرا منطقه تحت پوشش سنسورها، کیفیت تخمین و انعطاف پهپادها برای یافتن مسیر پروازی افزایش می‌یابد. در انتها کارایی الگوریتم در یک محیط شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار متلب مورد ارزیابی قرار گرفته است که شامل دینامیک پرنده‌ها، مدل اندازه‌گیری و ارتباطی و اجرای گسسته الگوریتم هدایت می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم‌های پیشنهادی موفق به ایجاد مسیرهای پروازی مناسب با توجه به الزامات و اهداف مأموریت شده است.

Cooperation Algorithm of Autonomous UAVs for Tracking a Dynamic Target in an Adversarial Environment

Esmaeel Khanmirza[1*], Morteza Haghbeigi[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 16765-163 Tehran, Iran, khanmirza@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 23 January 2017
Accepted 11 April 2017
Available Online 29 April 2017

Keywords:
Cooperation
Autonomous Guidance
Target Tracking
Path Planning
UAV

ABSTRACT

Cooperation and autonomy are among the most important aspects of unmanned systems through which greater use of these systems is possible. Most applications in civil market are related to government organizations requiring surveillance and inspection, such as coast guards, border patrol, emergency services and police. A cooperation algorithm is developed and simulated in this research for autonomous UAVs to track a dynamic target in an adversarial environment. First, a mathematical formulation is developed to represent the area of operation that contains various types of threats in a single framework. Then a search point guidance algorithm is developed by using a rule-based approach to guide every UAV to the way points created by the cooperation algorithm, with the requirements of completing mission, avoiding restricted areas, minimizing threat exposure level, considering the dynamic constraints of the UAVs and avoiding collision. The cooperation algorithm is designed based on a variable formation which depends on a cost function. The efficiency of the team is improved in terms of increasing the area of coverage of the sensors, flexibility of the UAVs to search for better trajectories in terms of restricted area avoidance and threat exposure minimization, and improving the estimation. Finally, the performance of the algorithm is evaluated in a MATLAB environment, which includes the dynamics of vehicles, the models of sensor measurement and data communication and the discrete execution of the algorithms. The simulation results demonstrate that the proposed algorithms successfully generated the trajectories that satisfy the given mission objectives.

1- مقدمه

تحقیقاتی بسیاری در حوزه وسیع پرنده‌های بدون سرنشین در کاربردهای نظامی و غیرنظامی انجام شده که این تلاش‌ها روبه فزونی است. از آن‌جایی که پرنده‌های بدون سرنشین نیازی به خلبان ندارند می‌توانند ارزان‌تر، با اندازه کوچک‌تر و چابک‌تر باشند. مطالعات بسیاری پیش‌بینی می کنند که بازار پهپادها شاهد پیشرفت بسیاری در دهه آینده خواهد بود [1].

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

E. Khanmirza, M. Haghbeigi, Cooperation Algorithm of Autonomous UAVs for Tracking a Dynamic Target in an Adversarial Environment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 1-11, 2017 (in Persian)

1-1- هدایت خودکار

زمانی می‌توان از سیستم‌های بدون سرنشین UAS[1] نهایت استفاده را برد که به صورت خودکار عمل کنند [2]. یک UAS زمانی کاملاً خودکار محسوب می‌شود که مأموریت محوله را در تطبیق با محیط و شرایط مأموریت، بدون هیچ مداخله‌ای توسط انسان یا هر سیستم خارجی دیگر انجام دهد. سطح خودکاری برای سیستم‌های هوایی بدون سرنشین براساس توابع فراهم‌کننده خودکاری موجود در پردازنده UAS تعریف می‌شود. این توابع در سه گروه اصلی هدایت، ناوبری و کنترل و به طور خلاصه GNC[2] دسته‌بندی می‌شوند. سیستم هدایت را می‌توان به عنوان محرک یک UAS تعریف کرد که توابع تصمیم گیری را برای به‌دست‌آوردن اهداف مأموریت به‌کار می‌اندازد و جایگزین فرایند شناختی خلبان یا اپراتور انسان می‌شود. سیستم هدایت دستورات لازم برای کنترل‌کننده پرواز جهت رسیدن به اهداف مأموریت را محاسبه می‌کند و یک عنصر کلیدی در افزایش سطح خودکاری پرنده بدون سرنشین است. یک سیستم هدایت برای UAS شامل پنج بخش اصلی [2] که عبارت از ایجاد ترجکتوری[3]، طراحی مسیر[4]، طراحی مأموریت، تصمیم‌گیری و استدلال و ادراک است. با توجه به نوع مأموریت، توابع مختلف GNC و سطوح مختلف آن‌ها به کار گرفته می‌شوند. در نتیجه روش‌های مختلفی برای تعریف ریاضی منطقه عملیات، طراحی مسیر و فرایند تصمیم‌گیری به کار گرفته می‌شود.

2-1- همکاری

همکاری میان پرنده‌ها توانایی و سطح خودکاری آن‌ها را افزایش می‌دهد. همکاری پرنده‌های بدون سرنشین سطوح مختلفی دارد که می‌تواند شامل همکاری در کنترل، ناوبری، هدایت و یا همه این‌ها باشد. تحقیقات اولیه در زمینه طراحی همکارانه در حوزه رباتیک انجام شده است. در سال‌های اخیر طراحی همکارانه پهپادها به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعات در زمینه‌های مختلفی نظیر آرایش پرواز پهپادها [3]، طراحی مسیر همکار [4]، تخصیص و رهگیری همکار هدف و تعقیب همکار هدف [5] انجام شده است. بهینه‌سازی مناسب تابع هزینه روش متداول در طراحی همکار است. در بیشتر مسائل طراحی مسیر و میعادگاه یک تابع هزینه به عنوان هزینه تهدیدات کلی تیم تعریف می‌شود [6].

3-1- تعریف منطقه عملیات

برای خودکار بودن با استفاده از سیستم‌های هدایت نظیر روش سیستم ماهر، منطقه عملیاتی پهپاد باید با فرمول‌بندی مناسب به صورت کمی تعریف شود. زمانی که منطقه عملیات دارای اجزای خطرناکی مانند منابع تهدید، موانع، اهداف، مناطق محصور و پرواز ممنوع باشد، فرمول‌بندی منطقه چالش برانگیزتر خواهد شد. نقشه اشغال شبکه پایه[5] رایج‌ترین روش ایجاد نقشه احتمالاتی یک منطقه نامعلوم است که احتمال وجود هدف و سطح خطر را به هر کدام از سلول‌های شبکه اختصاص می‌دهد [7]. روش نقشه اشغال شبکه پایه بیشتر برای محیط‌هایی با منابع خطر ساکن قابل اعمال است. از تخمین بایاسین به عنوان یک روش احتمالاتی برای مواجهه با محیط‌های پویای نامطمئن استفاده می‌شود [8]. استفاده از توابع توزیع احتمال pdf[6] برای تمام منابع خطر موجود در محیط روش مهم دیگر جهت ایجاد نقشه محیط عملیات است [9]. این گونه از نقشه‌ها توابع توزیع چگالی منابع تهدید نامیده می‌شوند.

4-1- طراحی مسیر و ترجکتوری

یک سیستم خودکار باید امن‌ترین مسیر برای پرنده جهت حرکت و انجام مأموریت را با استفاده از فرمول‌بندی منطقه عملیات تعیین کند. تعقیب یک هدف در منطقه عملیات با وجود موانع ساکن از کاربردهای مخصوص یک پهپاد است [9]. انجام مأموریت در منطقه عملیاتی دربردارنده موانع و تهدیدات متحرک کاربرد دیگر استفاده از پهپاد است که به فرآیند طراحی مسیر بسیار پیچیده‌تر نیاز دارد [10]. برای فهم کلی مساله طراحی حرکت و روش‌های موجود می‌توان به تحقیقات منتشر شده مانند [11] رجوع کرد. روش‌های مرسوم طراحی مسیر عبارت از نقشه‌های راه[7]، میدان‌های پتانسیل، الگوریتم‌های جستجوی ابتکاری، روش‌های بهینه‌سازی و روش‌های واکنشی و اجتناب از برخورد الهام گرفته از زیست‌شناسی است.

5-1- طرح‌ریزی مأموریت و سطح بالای خودکاری

سیستم هدایت تنها محدود به طراحی مسیر نمی‌شود و تحقیقات در زمینه هدایت UAS به مرحله جدیدی از پیشرفت و خودکاری سطح بالا رسیده است. طرح‌ریزی مأموریت مقدم بر فرایند طراحی مسیر است. برای نمونه نقشه پرواز مورد نظر توسط طراح مأموریت ایجاد شده و مسیرهای بدون برخورد با موانع توسط طراح مسیر ایجاد می‌شود. توانایی تصمیم‌گیری خودکار را می‌توان با استفاده از روش سیستم‌های ماهر[8] مانند سیستم‌های ماهر قانون پایه و سیستم‌های ماهر فازی ایجاد کرد [12]. معرفی مختصر سیستم‌های ماهر و مقایسه آن‌ها در مرجع [13] ارائه شده است. سیستم قانون پایه رایج‌ترین سیستم ماهر است که دانش در آن به صورت قوانین ثبت شده است و راه‌حل‌های مساله براساس اطلاعات مربوطه ارائه شده‌اند.

6-1- تعقیب هدف

زمانی که هدف مورد نظر در مأموریت متحرک باشد مساله به عنوان تعقیب یا ردگیری مطرح می‌شود. طبیعت پویای هدف متحرک قیود دیگری مانند در نظر گرفتن وضعیت هدف و حفظ رویت‌پذیری هدف را به مساله طراحی مسیر اضافه می‌کند. تعقیب اهداف با تحرک بالا از مأموریت‌های پرکاربرد پهپادهای خودکار است، به ویژه زمانی که عملیات در محیطی با موانع مختلف انجام شود [5].

2- نقشه تهدیدات احتمالی

سطح تهدیدات در منطقه عملیاتی پرخطر باید کمینه شده و از موانع و مناطق محصور اجتناب شود. در این تحقیق از تهدید به عنوان یک واژه گسترده برای توصیف ریسک و یا هزینه برای یک پهپاد به منظور اشغال موقعیت داده شده در زمان مشخص استفاده و شامل موانع و مناطق پرواز ممنوع و سایر تهدیدات می‌شود. تهدیدات در این تحقیق به صورت نقشه تهدیدات احتمالی PTEM[9] تعریف شده است [14] که سطح ریسک قرار گرفتن در معرض منابع تهدید مختلف را به عنوان تابعی از موقعیت و زمان مشخص می‌کند. تمام منابع تهدید در همین چارچوب احتمالی و توسط جمع

[1] Unmanned Autonomous Systems
[2] Guidance, Navigation, Control
[3] Trajectory Generation
[4] Path Planning
[5] Grid-based occupancy map
[6] Probability distribution function
[7] Road Maps
[8] Expert system approach
[9] Probabilistic Threat Exposure Map

توابع چگالی احتمال توصیف شده‌اند. اگر تهدید توسط تابع چگالی احتمالی pdf مشخص شود، برای توصیف کامل آن دو پارامتر مورد نیاز است. مقدار متوسط که نقطه مرکزی منبع تهدید را مشخص می‌کند و واریانس که سطح اثر بخشی تهدید را تعیین می‌کند، همچنین می‌توان از توزیع یکنواخت برای مدل کردن موانع و تهدیدات استفاده کرد. موقعیت در منطقه توسط یک بردار r نسبت به مرکز دستگاه مختصات مشخص می‌شود که نمایش برداری آن به صورت $r = [x\ y]^{\mathrm{T}}$ است. برای یک محیط دو بعدی با چندین منبع تهدید (N تعداد تهدیدات)، PTEM توسط توزیع گاوسین به شکل رابطه (1) توصیف می‌شود.

$$f(r) = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2\pi\sqrt{\det(K_i)}} \exp[-\frac{1}{2}(r-\mu_i)^{\mathrm{T}} K_i^{-1} (r-\mu_i)] \qquad (1)$$

که μ_i و K_i بردار میانگین و ماتریس کواریانس تهدید i است و به این صورت رابطه (2) تعریف شده‌اند.

$$K_i = \begin{bmatrix} \sigma^2{}_{x.i} & 0 \\ 0 & \sigma^2{}_{y.i} \end{bmatrix}, \mu_i = \begin{bmatrix} \mu_{x.i} \\ \mu_{y.i} \end{bmatrix} \qquad (2)$$

اگر منابع تهدید، موانع و مناطق محصور دیگری وجود دارند که باید توسط توابع توزیع دیگری نظیر تابع توزیع احتمالی یکنواخت مدل شوند، جمع موجود در رابطه (1) شامل pdfهایی نظیر تابع (3) خواهد شد.

$$\mathrm{u}(r) = \begin{cases} \dfrac{1}{(b-a)(d-c)}, & a \le x \le b, c \le y \le d \\ 0, & (x < a \ \ or \ \ x > b), (y < c \ or \ y > d) \end{cases} \qquad (3)$$

شکل 1 یک PTEM نمونه تشکیل شده توسط مجموعه‌ای از pdfهای گاوسین و یکنواخت را به صورت سه نشان می‌دهد. اگر پارامترهای pdf ثابت باشند نقشه نیز نسبت به زمان ثابت خواهد ماند. باید دقت داشت که سطح تهدید کمیتی بی‌بعد بوده و در تمام شکل‌ها و کانتورها نیز مقداری بی‌بعد است.

2-1- تقسیم نواحی با توجه به سطح تهدید

می‌توان منطقه عملیات را با توجه به مقدار PTEM به چندین زیرمنطقه تقسیم کرد. طبقه‌بندی موقعیت داده‌شده براساس ناحیه که در آن قرار دارد، طراحی مسیر و استراتژی‌های تعقیب را تسهیل خواهد کرد. منطقه عملیات به سه زیرمنطقه تقسیم می‌شود.

- منطقه A_1: در این منطقه مقدار PTEM همیشه کمتر از مقدار $f_{\max}$ است.

$$A_1(t) = \{r : f(\mathrm{r}) \ge f_{\max}\} \qquad (4)$$

- منطقه A_2: در این منطقه مقدار PTEM بین مقادیر $f_{\max}$ و f_r است.

$$A_2(t) = \{r : f_{\max} < f(r) < f_r\} \qquad (5)$$

- منطقه A_3: در این منطقه مقدار PTEM بیشتر و یا برابر با f_r است.

$$A_3(t) = \{r : f(r) > f_r\} \qquad (6)$$

به مناطق نوع A_3 که پهپاد نباید وارد آن‌ها شود مناطق غیرمجاز A_{r} نیز گفته می‌شود. باید توجه کرد که اگر نقشه احتمالی نسبت به موقعیت و ناحیه تأثیر متغیر با زمان باشد این سه زیرمنطقه در طول زمان ثابت نخواهند بود.

3- تخمین

در تحقیق کنونی فرض شده که پرنده‌ها مجهز به سنسورهایی است که موقعیت هدف را اندازه‌گیری می‌کنند و موانع تأثیری در اندازه‌گیری توسط سنسورها ندارند. الگوریتم‌های هدایت نمی‌توانند از اندازه‌گیری‌های با اغتشاش

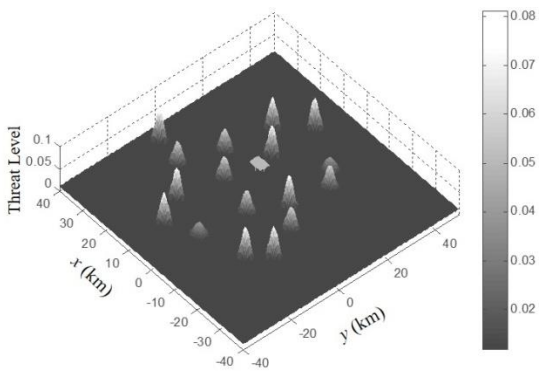

Fig. 1 Probability threat exposure map-3D

شکل 1 نقشه تهدیدات احتمالی سه‌بعدی

استفاده کنند و علاوه‌بر موقعیت به وضعیت حرکتی هدف نیاز دارند؛ بنابراین یک الگوریتم تخمین جهت فیلتر کردن اغتشاشات اندازه‌گیری و نیز تخمین سرعت و جهت هدف مورد نیاز است. الگوریتم تخمین برای پیش‌بینی حرکت هدف، زمانی که امکان اندازه‌گیری نیست به‌کار می‌رود. برای نمونه زمانی که پرنده هدف را هنگام انجام مانور برای اجتناب از تهدیدات گم کند، الگوریتم هدایتی می‌تواند پرنده را به سمت موقعیت تخمینی هدف هدایت کند تا این‌که هدف دوباره در محدوده سنسور قرار گیرد. مدل تخمین حتی زمانی که هدف در برد سنسور قرار دارد برای پیش‌بینی موقعیت هدف در زمان محاسباتی بعدی به‌کار می‌رود. زمان بهنگام‌سازی تخمین برابر با T_{e} است و موقعیت هدف x و y توسط سنسور روی پرنده به صورت عبارات (8,7) اندازه‌گیری می‌شود.

$$\tilde{x}_t(k) = x_t(k) + v_x(k) \qquad (7)$$

$$\tilde{y}_t(k) = y_t(k) + v_y(k) \qquad (8)$$

که $\tilde{x}_t(k)$ و $\tilde{y}_t(k)$ موقعیت اندازه‌گیری شده هدف، $x_t(k)$ و $y_t(k)$ موقعیت حقیقی هدف و $v_x(k)$ و $v_y(k)$ نمونه‌ای از نویز سفید گوسی بر اندازه‌گیری‌های x و y در لحظه k هستند. تخمین به روش حداقل مربعات همراه با محاسبه دسته‌ای صورت گرفته است. تنها تعداد مشخصی از اندازه‌گیری‌ها ذخیره می‌شوند و آرایه اندازه‌گیری با هر اندازه‌گیری بهنگام می‌شود. مقادیر قدیمی حذف شده و در نتیجه اندازه آرایه ثابت می‌ماند. در حقیقت این امر هنگام انتقال بین حالت‌های مختلف حرکت ضروری است. تخمین‌گر مرتبه دوم برای تخمین هر دو موقعیت x و y هدف توسط مدل اندازه‌گیری روابط (10,9) به کار رفته است.

$$\tilde{x}(k) = H(k)X_x(k) + v_x(k) \qquad (9)$$

$$\tilde{y}(k) = H(k)Y_y(k) + v_y(k) \qquad (10)$$

ماتریس اندازه‌گیری، پارامترهای تخمین و تابع پایه به صورت روابط (14-11) تعریف شده‌اند.

$$\tilde{x}(k) = [\tilde{x}_{\mathrm{t}}(k_m - n + 1)\ \ \tilde{x}_{\mathrm{t}}(k_m - n + 2)\ \ \dots\ \ \tilde{x}_{\mathrm{t}}(k_m)]^{\mathrm{T}} \qquad (11)$$

$$\tilde{y}(k) = [\tilde{y}_{\mathrm{t}}(k_m - n + 1)\ \ \tilde{y}_{\mathrm{t}}(k_m - n + 2)\ \ \dots\ \ \tilde{y}_{\mathrm{t}}(k_m)]^{\mathrm{T}} \qquad (12)$$

$$X_x(k) = [a_\psi(k)\ b_\psi(k)\ c_\psi(k)]^{\mathrm{T}} \qquad (13)$$

$$Y_y(k) = [d_V(k)\ e_V(k)\ f_V(k)]^{\mathrm{T}} \qquad (14)$$

k_m متناسب با لحظه اندازه‌گیری است و $n = \min\{n_{\mathrm{sw}}, k_m\}$، یعنی اندازه

ماتریس اندازه‌گیری در هر لحظه یکی افزایش می‌یابد تا زمانی که به بیشترین اندازه خود (n_{sw}) برسد. برای شروع تخمین خطی حداقل مربعات با تخمین‌گر درجه دوم، حداقل 3 اندازه‌گیری موقعیت مورد نیاز است. معادلات مورد نیاز برای تخمین به صورت روابط (16,15) است.

$$\hat{X}_x(k) = [H(k)^{\mathrm{T}}H(k)]^{-1}H(k)^{\mathrm{T}}\tilde{x}(k) \tag{15}$$

$$\hat{Y}_y(k) = [H(k)^{\mathrm{T}}H(k)]^{-1}H(k)^{\mathrm{T}}\tilde{y}(k) \tag{16}$$

$\hat{X}(k)$ و $\hat{Y}(k)$ شامل ضرایب تخمین برای تخمین‌گر مرتبه دوم هستند؛ بنابراین موقعیت‌های تخمین زده شده در بهنگام‌سازی k برابر با روابط (18,17) است.

$$\hat{x}_{\mathrm{t}}(k) = \hat{c}_x(k)(kT_{\mathrm{e}})^2 + \hat{b}_x(k)kT_{\mathrm{e}} + \hat{a}_x(k) \tag{17}$$

$$\hat{y}_{\mathrm{t}}(k) = \hat{f}_y(k)(kT_{\mathrm{e}})^2 + \hat{e}_y(k)kT_{\mathrm{e}} + \hat{d}_y(k) \tag{18}$$

از آن‌جایی که موقعیت به عنوان تابعی از زمان تخمین زده می‌شود می‌توان برای تخمین سرعت و جهت نیز از آن به صورت روابط (20,19) استفاده کرد.

$$\dot{\hat{x}}_{\mathrm{t}}(k) = 2\hat{c}_x(k)kT_{\mathrm{e}} + \hat{b}_x(k) \tag{19}$$

$$\dot{\hat{y}}_{\mathrm{t}}(k) = 2\hat{f}_y(k)kT_{\mathrm{e}} + \hat{e}_y(k) \tag{20}$$

سرعت و جهت تخمینی با استفاده از معادلات سینماتیکی در لحظه بهنگام‌سازی به صورت روابط (22,21) به‌دست می‌آید.

$$\hat{V}_{\mathrm{t}}(k) = \sqrt{\dot{\hat{x}}_{\mathrm{t}}(k)^2 + \dot{\hat{y}}_{\mathrm{t}}(k)^2} \tag{21}$$

$$\hat{\psi}_{\mathrm{t}}(k) = \tan^{-1}\left[\frac{\dot{\hat{y}}_{\mathrm{t}}(k)}{\dot{\hat{x}}_{\mathrm{t}}(k)}\right] \tag{22}$$

همچنین می‌توان از توابع تخمین موقعیت برای پیش‌بینی موقعیت هدف در لحظه بهنگام‌سازی $(k+1)$ استفاده کرد.

4- الگوریتم هدایت جستجوی نقطه‌ای

طراحی مسیر برای تعقیب هدف زمانی که هدف مورد نظر در عملیات متحرک باشد با توجه به نقشه و نیز وضعیت تخمینی و پیش‌بینی شده هدف صورت می‌گیرد. علاوه‌بر این قیود دینامیکی پرنده نیز باید مورد نظر قرار گیرد و از موانع و مناطق پرواز ممنوع اجتناب شود. در این تحقیق الگوریتم هدایت جستجوی نقطه‌ای [15] برای هدایت پرنده‌های تعقیب‌گر به نقاط راه ایجاد شده توسط الگوریتم همکاری به‌کار گرفته شده است.

4-1- قیود دینامیکی پرنده

استراتژی هنگام محاسبه دستورات هدایتی باید قیود دینامیکی پرنده را نیز در نظر داشته باشد. قیود دینامیکی پرنده به شرح زیر است.

الف) قید تغییر جهت HC[1]: پرنده نمی‌تواند جهت خود را به یک‌باره تغییر دهد. سرعت تغییر جهت با توجه به دینامیک پرنده محدود می‌شود. این قید با تعریف زاویه $\psi_{\max}$ مدل شده که برابر با بیشترین تغییر زاویه ممکن برای جهت پرنده در هر بازه شبیه‌سازی است. $\psi_{\max}$ بدون توجه به سرعت پرنده ثابت فرض شده است. مخروط قید جهت براساس این زاویه به صورت محدوده زاویه‌های تغییر جهت مجاز تعریف شده است که با پرنده جابه‌جا می‌شود (شکل 2). این مخروط توسط ψ_{L} و ψ_{R} مرزبندی شده که به ترتیب عبارت از بیشترین زاویه مجاز چرخش به چپ و راست است.

ب) قیود سرعت بیشینه و کمینه: پرنده دارای کمترین سرعت $V_{\min}$ و بیشترین سرعت $V_{\max}$ قابل پرواز است. سرعت کمینه به مقدار 30% بیشتر از سرعت واماندگی پرنده است. قیود سرعت نیز ثابت فرض شده‌اند، اما در واقعیت آن‌ها نیز تابعی از وضعیت پرنده است.

ج) قیود شتاب بیشینه و کمینه: توانایی محدود پرنده در گرفتن شتاب توسط قیود بیشترین $a_{\max}$ و کمترین شتاب $a_{\min}$ کمی شده است.

4-2- استراتژی تعقیب هدف

تعقیب هدف متحرک در منطقه‌ای با تهدیدات مختلف نیاز به مصالحه میان دو خواسته به احتمال متضاد مأموریت یعنی ماندن در مجاورت هدف و کمینه‌سازی سطح تهدیدات دارد. الزام اول توسط دایره مجاورت کمی شده، دایره‌ای که مرکز آن منطبق بر هدف است و همراه با آن حرکت می‌کند (شکل 3). در طول مأموریت طبق رابطه (23) استراتژی تعقیب سعی در حفظ پرنده در داخل دایره مجاورت دارد.

$$|r_{\mathrm{UAV}} - r_{\mathrm{t}}| \le r_{\mathrm{p}} \tag{23}$$

r_{p} شعاع دایره مجاورت و $\mathrm{r_{UAV}}$ و $\mathrm{r_t}$ به ترتیب بردار موقعیت پرنده و هدف است. شعاع دایره مجاورت، r_{p} پارامتر طراحی است و میزان نزدیکی پرنده به هدف را مشخص می‌کند. فرض شده موقعیت هدف تا زمانی که در محدوده برد سنسور باشد قابل اندازه‌گیری است. این قید به صورت رابطه (24) بیان شده و r_{s} شعاع و یا برد سنسور که در شکل 3 نیز نشان داده شده است.

$$|r_{\mathrm{UAV}} - r_{\mathrm{t}}| \le r_{\mathrm{s}} \tag{24}$$

شعاع دایره مجاورت، r_{p} مشخص‌کننده میزان مصالحه میان نزدیکی به هدف و سطح تهدیدات است. با تعیین شعاع مجاورت بزرگ‌تر، استراتژی منطقه وسیع‌تری را برای یافتن مسیر با سطح پایین تهدیدات جستجو می‌کند، اما هدف را با فاصله بیشتری دنبال می‌کند و نیز ریسک خارج شدن هدف از برد سنسور افزایش می‌یابد.

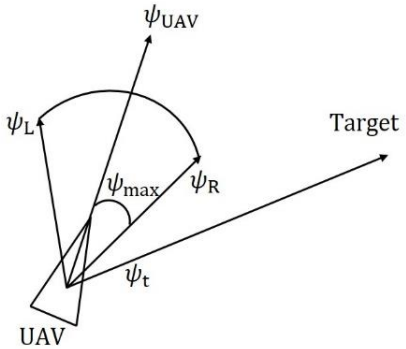

Fig. 2 Heading search cone and target direction [12]

شکل 2 مخروط جستجوی جهت و سمت هدف [12]

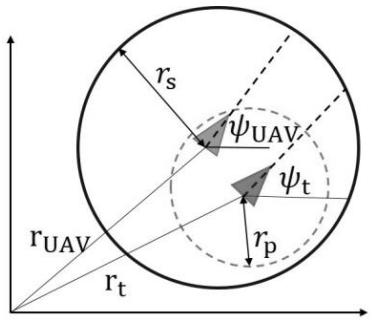

Fig. 3 Proximity and Sensor Circles]12[

شکل 3 دایره‌های مجاورت و سنسور [12]

[1] Heading Constraint

در صورت تغییر ناگهانی در سرعت و جهت هدف نیز امکان قرار گرفتن هدف در ناحیه خارج برد سنسور وجود دارد. زمانی که هدف در خارج از محدوده برد سنسور قرار گرفته باشد، موقعیت هدف، سرعت و جهت آن توسط مدل تخمینی به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری پیش‌بینی می‌شود. پیش‌بینی برای هدایت پرنده به سمت هدف به‌کار می‌رود تا پرنده دوباره در مجاورت هدف قرار گیرد و اندازه‌گیری ادامه پیدا کند. از آن‌جایی که استراتژی پرنده را براساس موقعیت هدف در زمان محاسباتی بعدی هدایت می‌کند و نه موقعیت کنونی آن حتی زمانی که هدف در برد سنسور قرار دارد، مدل تخمین برای پیش‌بینی موقعیت هدف در زمان محاسباتی بعدی به‌کار می‌رود.

استراتژی دارای سه هدف اصلی است که به ترتیب اولویت عبارتند از:

- خارج کردن پرنده از منطقه پرواز ممنوع A_r
- حفظ یا قرار دادن پرنده در دایره مجاورت
- کمینه‌سازی سطح تهدیدات

برای دستیابی به این اهداف استراتژی دستورات هدایتی جهت ψ_{cmd} و سرعت V_{cmd} را برای پرنده ایجاد می‌کند. برای رسیدن به اهداف بدون نقض قیود دینامیکی از چندین قانون برای اختلاف سرعت و جهت پرنده و هدف استفاده شده است. استراتژی چندین نقطه توزیع شده به صورت یکسان روی کمان محدود شده توسط ψ_L و ψ_R را بررسی می‌کند تا دستورات هدایتی جهت و سرعت را در هر مرحله شبیه‌سازی ایجاد کند. شعاع کمان توسط سرعت کنونی پرنده و زمان هر مرحله شبیه‌سازی مشخص می‌شود. با افزایش سرعت پرنده فاصله جستجو افزایش پیدا می‌کند.

4-3- جستجوی ناحیه پرواز ممنوع

برای اطلاع از وضعیت پرنده در ارتباط با قرار گرفتن در معرض ریسک ورود به ناحیه A_r، علاوه‌بر بررسی نقاط پروازی ممکن، استراتژی از نقاط جستجوی دیگری نیز استفاده می‌کند که روی کمانی به شعاع دو برابر کمان اول و در راستای نقاط ممکن پروازی قرار گرفته‌اند. شکل 4 نحوه تعیین کمیت ریسک قرار گرفتن در منطقه پرواز ممنوع را نشان می‌دهد. اگر تعدادی از نقاط جستجو در کمان دوم خارج از منطقه پرواز ممنوع باشند امکان اجتناب از آن منطقه با استفاده از یکی از نقاط جستجوی متناظر در کمان اول وجود دارد. اگر تمامی نقاط جستجوی کمان دوم در منطقه پرواز ممنوع باشند پرنده در معرض ریسک بالای ورود به این منطقه قرار دارد. نقاط جستجوی نهایی از میان نقاط پیشنهادی براساس قیود دینامیکی پرنده و پارامترهای استراتژی انتخاب می‌شوند.

4-4- قیود استراتژی

علاوه‌بر قیود دینامیکی، مکانیزم‌های دیگری نیز برای حفظ پرنده در مجاورت هدف تعریف شده است.

- حفظ اختلاف جهت به اندازه کوچک
- حفظ اختلاف سرعت به مقدار کم

مکانیزم اول توسط ψ_{HDC}، قید اختلاف جهت و مکانیزم دوم توسط قید اختلاف سرعت تعریف است.

4-4-1- قید اختلاف جهت HD[1]

برای حفظ اختلاف جهت پرنده و هدف به مقداری کم باید این اختلاف را محدود کرد. موضوع از این جهت ضروری است که شعاع چرخش پرنده با افزایش سرعت آن افزایش پیدا می‌کند. اگر اختلاف جهت محدود نشود، امکان دارد استراتژی جهت پرنده را برای کاهش سطح تهدیدات، زمانی که پرنده در دایره مجاورت قرار دارد به صورت ناگهانی تغییر دهد. این مساله ریسک خروج پرنده از دایره مجاورت و خروج هدف از برد سنسور را افزایش می‌دهد. برای محدود کردن حرکت پرنده در داخل و اطراف دایره مجاورت زاویه ψ_{HDC} تعریف شده است. از آن‌جایی که امکان دارد تناسب میان جهت پرنده و جهت هدف محدودکننده باشد، مخصوصاً زمانی که سرعت هدف کم باشد و یا هدف متوقف شده باشد، طبق فرمول (25) یک رابطه خطی میان ψ_{HDC} و سرعت تخمینی هدف تعریف شده است. اختلاف جهت ثابت ψ^*_{HDC} برای زمانی که سرعت تخمینی هدف، V_{es}، بزرگتر از مقدار سرعت از پیش تعیین شده، V_{thres}، باشد تعریف شده است. با کاهش V_{es} به سمت صفر، ψ_{HDC} باید به مقدار π نزدیک شود. به این معنی که با کاهش سرعت تخمینی به صفر، قید اختلاف جهت میان پرنده و هدف وجود ندارد.

$$\psi_{HDC} = \begin{cases} \psi^*_{HDC}, & V_{est} \geq V_{thres} \\ \left(\dfrac{\psi^*_{HDC} - \pi}{V_{thres}}\right) V_{est} + \pi, & V_{est} < V_{thres} \end{cases} \tag{25}$$

مشابه مخروط قید جهت، مخروط اختلاف جهت HD نیز طبق رابطه (26) تعریف شده است و همراه با هدف حرکت می‌کند.

$$|\psi_{UAV} - \psi_{target}| \leq \psi_{HDC} \tag{26}$$

مخروط قید جهت، مقادیر مجاز تغییر جهت را تعیین می‌کند و مخروط اختلاف زاویه، مقادیر دلخواه جهت برای پرنده مشخص می‌کند. اگر هیچ سطح مشترکی میان دو مخروط وجود نداشته باشد، نزدیکترین جهت به جهت هدف که حد چپ و یا راست مخروط قید جهت باشد انتخاب خواهد شد. محدوده قابل جستجو SHR[2]، به صورت مخروط مشترک میان مخروط‌های قید جهت و اختلاف جهت تعریف شده است. ناحیه‌ی مشترک میان مخروط SHR و دایره مجاورت مشخص کننده نقاط جستجو برای کمینه‌سازی تهدیدات است. اگر ناحیه مشترکی وجود نداشته باشد، به این معنی است که اگر جهت انتخابی از مخروط SHR باشد، پرنده در خارج از دایره مجاورت قرار خواهد گرفت. برای اجتناب از این اتفاق، مخروط مجاورت همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است به صورت مجموعه‌ای از جهات که پرنده را از موقعیت کنونی به دایره مجاورت هدف می‌رساند تعریف شده است. از آن‌جایی که قرار گرفتن پرنده در مجاورت هدف اولویت بیشتری از کاهش سطح تهدیدات دارد، زمانی که پرنده در خارج از دایره مجاورت قرار دارد، تنها ناحیه مشترک میان مخروط مجاورت و مخروط قید جهت بررسی خواهد شد.

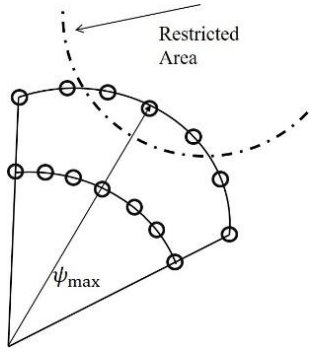

Fig. 4 Search for the Restricted Area

شکل 4 جستجو برای اجتناب از نواحی با سطح تهدید بالا

[1] Heading Difference Constraint

[2] Searchable heading range

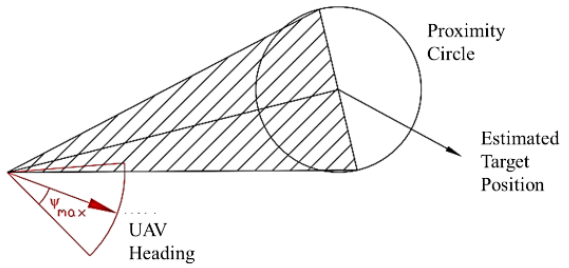

Fig. 5 Steering UAV into the proximity circle]15[

شکل 5 هدایت پرنده به سمت دایره مجاورت [15]

4-4-2- قید اختلاف سرعت

برای این‌که بتوان هدف را تعقیب کرد، اختلاف سرعت میان پرنده، V_{UAV} و سرعت هدف، V_{t}، باید محدود شود که این موضوع به صورت رابطه (27) بیان شده است.

$$|V_{\mathrm{UAV}} - V_{\mathrm{t}}| \le V_{\mathrm{DC}} \tag{27}$$

مقدار مطلوب اختلاف سرعت V_{DC} صفر تعریف شده است، یعنی استراتژی می‌خواهد تا زمانی که سرعت هدف در محدوده سرعت مجاز پرنده قرار دارد، سرعت پرنده برابر با سرعت هدف باشد. البته اگر پرنده در خارج از دایره مجاورت قرار گیرد، به پرنده دستور داده خواهد شد تا به مجاورت هدف برسد.

4-3- موارد استراتژی

برای رسیدن به اهداف تحت قیود گفته شده استراتژی از چندین قانون برای اختلاف جهت و سرعت پرنده و هدف استفاده می‌کند. این قوانین با توجه به موارد زیر تغییر می‌کنند.

- پرنده در معرض ریسک وارد شدن به منطقه A_{r} باشد.
- سطح مشترکی میان مخروط‌های HC و HD وجود داشته باشد.
- پرنده در دایره مجاورت قرار داشته باشد.
- سطح مشترک میان مخروط‌های مجاورت و HC وجود داشته باشد.

با توجه به این که هر کدام از موارد بالا برقرار باشد یا نه، هفت مورد مختلف به صورت زیر تعریف می‌شوند که نمودار تصمیم‌گیری حاصل شده در شکل 6 قابل مشاهده است.

مورد 1: پرنده در معرض ریسک بالای ورود به منطقه A_{r} قرار دارد. برای هدایت پرنده به خارج از منطقه ریسک بالا در سریع‌ترین زمان ممکن، تیزترین چرخش ممکن انجام می‌شود. برای افزایش نرخ پیچش پرنده، سرعت پرنده برابر با $V_{\min}$ تعیین شده است. $(X_{\mathrm{L}}, Y_{\mathrm{L}})$ و $(X_{\mathrm{R}}, Y_{\mathrm{R}})$ در روابط (29,28) موقعیت‌های متناسب با حد چپ و راست جهت پرنده هستند.

$$\psi_{\mathrm{cmd}} = \begin{cases} \psi_{\mathrm{R}}, & f_{XY}(X_{\mathrm{L}}, Y_{\mathrm{L}}) \ge f_{XY}(X_{\mathrm{R}}, Y_{\mathrm{R}}) \\ \psi_{\mathrm{L}}, & f_{XY}(X_{\mathrm{L}}, Y_{\mathrm{L}}) < f_{XY}(X_{\mathrm{R}}, Y_{\mathrm{R}}) \end{cases} \tag{28}$$

$$V_{\mathrm{cmd}} = V_{\min} \tag{29}$$

مورد 2: پرنده در معرض ریسک پایین قرار گرفتن در منطقه A_{r} است. برای خروج پرنده از منطقه پرواز ممنوع، نقاط جستجوی کمان دوم که در منطقه پرواز ممنوع قرار دارند تعیین می‌شوند. نقاط متناظر در کمان اول حذف شده و سپس PTEM در نقاط دیگر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اگر تعدادی از این نقاط در دایره مجاورت قرار داشته باشند، جهت متناسب با نقطه جستجو که کمترین سطح تهدید را داشته باشد $(\psi_{\min-\mathrm{pr}})$ انتخاب خواهد شد و سرعت پرنده تا زمانی که در محدوده قید سرعت باشد برابر با سرعت تخمینی هدف V_{est} به صورت روابط (31,30) خواهد بود.

$$\psi_{\mathrm{cmd}} = \psi_{\min-\mathrm{pr}} \tag{30}$$

$$V_{\mathrm{cmd}} = \begin{cases} V_{\min}, & V_{\mathrm{est}} \le V_{\min} \\ V_{\mathrm{est}}, & V_{\min} < V_{\mathrm{est}} < V_{\max} \\ V_{\max}, & V_{\mathrm{est}} \ge V_{\max} \end{cases} \tag{31}$$

مورد 3: پرنده در معرض ریسک پایین بوده و هیچ کدام از نقاط در دایره مجاورت قرار ندارند؛ بنابراین برای رساندن پرنده به موقعیت پیش‌بینی شده هدف، جهت متناسبی (ψ_{cl}) برساند انتخاب می‌شود. علاوه‌بر این سرعت مشخص شده برای پرنده برابر با V_{est} است که در محدوده مجاز قید سرعت به صورت روابط (33,32) باشد.

$$\psi_{\mathrm{cmd}} = \psi_{\mathrm{cl}} \tag{32}$$

$$V_{\mathrm{cmd}} = \begin{cases} V_{\min}, & V_{\mathrm{est}} \le V_{\min} \\ V_{\mathrm{est}}, & V_{\min} < V_{\mathrm{est}} < V_{\max} \\ V_{\max}, & V_{\mathrm{est}} \ge V_{\max} \end{cases} \tag{33}$$

مورد 4: ریسک ورود به منطقه پرواز ممنوع وجود ندارد و ناحیه مشترکی میان مخروط‌های HC و HD وجود دارد؛ بنابراین نقاط موجود در ناحیه قابل جستجو مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. میان نقاط جستجوی قرار گرفته در دایره مجاورت، جهت که کمترین احتمال ناتوانی را نتیجه دهد $(\psi_{\min-\mathrm{pr}})$ انتخاب خواهد شد. تا زمانی که سرعت تخمینی در محدوده سرعت مجاز پرنده باشد به عنوان سرعت دستوری به صورت روابط (35,34) تعیین می‌شود.

$$\psi_{\mathrm{cmd}} = \psi_{\min-\mathrm{pr}} \tag{34}$$

$$V_{\mathrm{cmd}} = \begin{cases} V_{\min}, & V_{\mathrm{est}} \le V_{\min} \\ V_{\mathrm{est}}, & V_{\min} < V_{\mathrm{est}} < V_{\max} \\ V_{\max}, & V_{\mathrm{est}} \ge V_{\max} \end{cases} \tag{35}$$

مورد 5: هیچ کدام از نقاط SHR در دایره مجاورت قرار ندارند، اما از آن‌جا که سطح مشترکی میان مخروط‌های مجاورت و SHR وجود دارد، پرنده جهتش به سمت دایره مجاورت خواهد بود؛ بنابراین برای نزدیک شدن به هدف جهتی که در مخروط HC باشد و پرنده را به موقعیت پیش‌بینی‌شده نزدیک‌تر کند، ψ_{cl}، انتخاب خواهد شد. در این راستا استراتژی PTEM را در پنج نقطه دیگر ارزیابی می‌کند. این نقاط به صورت $V\Delta t$ در فواصل زمانی مختلف تعریف شده‌اند. اگر مقدار PTEM در تمامی این نقاط کمتر از f_{r} باشد استراتژی دستور به افزایش سرعت می‌دهد تا پرنده در سریع‌ترین زمان در مجاورت هدف قرار گیرد. سرعت مورد نیاز (V_{req}) تا پرنده در دایره مجاورت قرار گیرد در محاسبه بعدی به صورت روابط (37,36) به‌دست‌آمده است.

$$\psi_{\mathrm{cmd}} = \psi_{\mathrm{cl}} \tag{36}$$

$$V_{\mathrm{cmd}} = \begin{cases} V_{\min}, & V_{\mathrm{req}} \le V_{\min} \\ V_{\mathrm{req}}, & V_{\min} < V_{\mathrm{req}} < V_{\max} \\ V_{\max}, & V_{\mathrm{req}} \ge V_{\max} \end{cases} \tag{37}$$

مورد 6: سطح مشترکی میان مخروط‌های مجاورت و SHR وجود ندارد. برای بازگرداندن پرنده به سمت دایره مجاورت به پرنده دستور داده می‌شود تا به سمت نزدیک‌ترین جهت به هدف در مخروط قید جهت (ψ_{cl}) بپیچد و سرعتی برابر با سرعت هدف به صورت روابط (39,38) داشته باشد.

$$\psi_{\mathrm{cmd}} = \psi_{\mathrm{cl}} \tag{38}$$

$$V_{\mathrm{cmd}} = \begin{cases} V_{\min}, & V_{\mathrm{est}} \le V_{\min} \\ V_{\mathrm{est}}, & V_{\min} < V_{\mathrm{est}} < V_{\max} \\ V_{\max}, & V_{\mathrm{est}} \ge V_{\max} \end{cases} \tag{39}$$

مورد 7: ریسک ورود به منطقه A_{r} وجود ندارد، همچنین سطح مشترکی میان مخروط‌های HD و HC وجود ندارد؛ بنابراین برای کم کردن اختلاف جهت میان هدف و پرنده، جهت متناسب چپ و یا راست مخروط قید جهت انتخاب

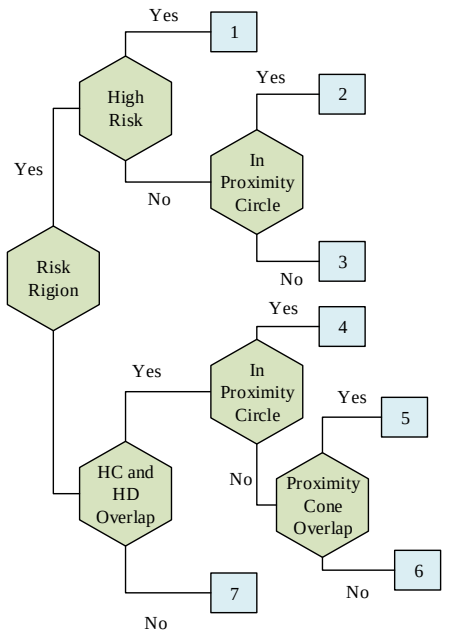

Fig. 6 Decision Tree

شکل 6 درخت تصمیم‌گیری

شده و سرعت با در نظر گرفتن قید سرعت پرنده برابر با سرعت تخمینی هدف به صورت روابط (41,40) تعیین می‌شود.

$$\psi_{\mathrm{cmd}} = \begin{cases} \psi_{\mathrm{R}}\,, & f_{XY}(X_{\mathrm{L}}.Y_{\mathrm{L}}) \geq f_{XY}(X_{\mathrm{R}}.Y_{\mathrm{R}}) \\ \psi_{\mathrm{L}}\,, & f_{XY}(X_{\mathrm{L}}.Y_{\mathrm{L}}) < f_{XY}(X_{\mathrm{R}}.Y_{\mathrm{R}}) \end{cases} \tag{40}$$

$$V_{\mathrm{cmd}} = \begin{cases} V_{\min}\,, & V_{\mathrm{est}} \leq V_{\min} \\ V_{\mathrm{est}}\,, & V_{\min} < V_{\mathrm{est}} < V_{\max} \\ V_{\max}\,, & V_{\mathrm{est}} \geq V_{\max} \end{cases} \tag{41}$$

5- الگوریتم همکاری

همکاری چندین پهپاد کارایی سیستم را از سه منظر افزایش می‌دهد:

- افزایش منطقه کلی تحت پوشش سنسورهای پهپادها
- افزایش انعطاف پهپادها برای یافتن مسیر پروازی بهتر با توجه به موانع، مناطق پرواز ممنوع، اجتناب از برخورد و کمینه‌سازی سطح تهدیدات
- بهبود تخمین با فراهم ساختن منابع اندازه‌گیری بیشتر

برای هر پرنده یک دیسک مجاورت تعریف شده و آرایش آن‌ها به صورت یک چند ضلعی است که براساس یک تابع هزینه تنظیم می‌شود. تابع هزینه بیان‌کننده چگونگی تغییر مکان دیسک‌ها برای رسیدن به مجاورت هدف در فواصل زمانی گسسته است. از الگوریتم هدایتی ارائه شده در بخش 4 برای تعقیب مراکز دیسک‌های مجاورت و اجتناب از موانع و مناطق پرواز ممنوع برای هر پهپاد استفاده شده است. همکاری میان پهپادها در تخمین مسیر هدف براساس اندازه‌گیری‌های با اغتشاش نیز صورت گرفته است. اگر امکان اندازه‌گیری برای یک پرنده فراهم نباشد، در صورت قرار گرفتن پرنده دیگر در برد ارتباطی می‌توان از اندازه‌گیری‌های آن استفاده کرد. در صورت در دسترس نبودن مقادیر اندازه‌گیری از الگوریتم تخمین برای پیش‌بینی حرکت هدف استفاده شده است.

همچنین در نقشه تهدیدات احتمالی هر پرنده یک منبع تهدید متغیر با شعاع تهدید مشخص منطبق با موقعیت پرنده دیگر تعریف شده است تا از برخود پرنده‌های تعقیب‌گر با یکدیگر اجتناب شود.

5-1- آرایش چند ضلعی متغیر

یک آرایش چند ضلعی مشابه شکل 7 پیرامون هدف شکل می‌گیرد. در هر رأس این چند ضلعی یک دایره مجاورت تعریف شده که هر یک از تعقیب‌گرها به سمت یکی از این دایره هدایت شده و سعی در رسیدن درون آن می‌کنند؛ بنابراین با تنظیم زوایا و اندازه‌های چند ضلعی، آرایش پرنده‌های تعقیب‌گر حول هدف متحرک شکل می‌گیرد که استراتژی همکاری با تغییر این آرایش سعی در هدایت پرنده هدف به سمت موقعیت دلخواه دارد. استراتژی هدایت توسط شش پارامتر توصیف می‌شود که دو مورد اول پارامترهای اصلی هستند:

- زاویه θ: بیان‌کننده زاویه است که دیسک‌های مجاورت اطراف آن توزیع می‌شوند و آرایش زاویه‌ای این دیسک‌ها حول θ متقارن خواهد بود.
- زاویه α: بیان‌کننده میزان پراکنده‌شدن تعقیب‌گرها حول زاویه θ است. هر چه مقدار این زاویه کمتر، تعقیب‌گرها به سمت زاویه θ حرکت کرده و هر چه مقدار آن بیشتر، پرنده‌ها حول هدف پراکنده خواهند شد.
- زاویه $\Delta\alpha$: مقدار مجاز تغییر زاویه α در هر بازه زمانی شبیه‌سازی است.
- طول A_i: فاصله رئوس چند ضلعی از هدف که می‌تواند برای تمام رئوس برابر و یا متفاوت باشد، همچنین این مقدار می‌تواند در هر مرحله شبیه‌سازی تغییر کرده و یا در طول مأموریت ثابت باشد.
- اندازه ΔA: مقدار مجاز تغییر اندازه A در هر بازه زمانی شبیه‌سازی است.
- شعاع دایره‌های مجاورت R_{p}: اندازه شعاع دایره‌هایی است که هر کدام از تعقیب‌گرها به سمت آن هدایت می‌شوند. اگر شعاع این دایره‌ها بزرگ انتخاب شود آرایش چند ضلعی به طور مداوم به هم می‌ریزد، زیرا که با ورود پرنده‌های تعقیب‌گر به داخل آن‌ها، شروع به تغییر مسیر برای یافتن نقاط تهدید کمینه کرده و جهت‌گیری آن‌ها تغییرات ناگهانی پیدا می‌کند؛ بنابراین شعاع این دایره‌ها مقادیر کوچکی انتخاب می‌شود.
- مقادیر $\alpha_{\min}$ و $\alpha_{\max}$: کمترین و بیشترین مقدار مجاز زاویه α .
- مقادیر $A_{\min}$ و $A_{\max}$: کمترین و بیشترین مقدار مجاز اندازه A.

شکل 7 آرایش دیسک‌های مجاورت حول هدف متحرک برای تیمی از تعقیب‌گرها با سه پرنده را نشان می‌دهد.

5-2- تابع هزینه و تنظیم آرایش

در این بخش فرض شده است که مقادیر R_{p} ثابت بوده و مقدار تابع هزینه تنظیم‌کننده مقادیر زاویه α و اندازه A و در نتیجه نحوه آرایش دیسک‌های مجاورت حول هدف است. زاویه θ برابر با جهت تخمینی هدف در هر زمان شبیه‌سازی است. نحوه آرایش دیسک‌ها به گونه‌ای است که در صورت زیاد شدن فاصله و یا اختلاف سرعت میان تعقیب‌گرها و هدف، الگوریتم پهپادهای تعقیب‌گر را به موقعیت‌های جلوتر از هدف هدایت می‌کند تا پرنده‌ها خود را به مجاورت هدف برسانند. در صورت کم شدن فاصله و اختلاف سرعت‌ها، دیسک‌ها حول هدف پراکنده شده و فاصله آن‌ها نیز تا هدف کم می‌شود. با توجه به این توضیحات تابع هزینه به صورت رابطه (42) تعریف شده است.

$$\mathrm{cost}(k) = w_{\mathrm{d}} \frac{\sum_{i=1}^{n} d_{u_i,t}(k)}{n} + \alpha w_{\mathrm{v}} \frac{\sum_{i=1}^{n} dv_{u_i,t}(k)}{n} \tag{42}$$

n تعداد پهپادهای تعقیب‌گر، w_{d} ضریب وزنی مربوط به میانگین فاصله‌ها، w_{v} ضریب وزنی مربوط به میانگین اختلاف سرعت‌ها و α ضریب نرمال‌سازی است. $d_{u_i,t}(k)$ فاصله پهپاد i از هدف و $dv_{u_i,t}(k)$ اختلاف سرعت پهپاد i و سرعت هدف در زمان شبیه‌سازی k است.

Fig. 7 Formation of the proximity disks

شکل 7 آرایش دیسک‌های مجاورت

دو مقدار آستانه $cost_{\mathrm{L}}$ و $cost_{\mathrm{U}}$ برای هزینه تعریف شده است که به ازای مقادیر هزینه بین آن‌ها، زاویه α میان دو مقدار $\alpha_{\min}$ و $\alpha_{\max}$ به صورت خطی طبق رابطه (43) تغییر می‌کند.

$$\alpha(k) = \begin{cases} \alpha_{\max}, & cost < cost_{\mathrm{L}} \\ \alpha_{\min}, & cost > cost_{\mathrm{U}} \\ \dfrac{(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})}{(cost_{\mathrm{L}} - cost_{\mathrm{U}})}(\mathrm{cost}(k) - cost_{\mathrm{L}}) + \alpha_{\max}, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{43}$$

همان‌طور که گفته شد تغییرات زاویه α توسط مقدار $\Delta\alpha$ نیز محدود شده است که روابط (45,44) این محدودیت را بیان می‌کنند.

$$\alpha(k) = \min(\alpha(k), \alpha(k-1) + \Delta\alpha) \tag{44}$$

$$\alpha(k) = \max(\alpha(k), \alpha(k-1) - \Delta\alpha) \tag{45}$$

تعیین مقدار A نیز مانند α و به صورت روابط (46-48) صورت می‌گیرد. با این تفاوت که با کم شدن مقدار تابع هزینه، مقدار A نیز کم خواهد شد و برعکس.

$$A(k) = \begin{cases} A_{\min}, & cost < cost_{\mathrm{L}} \\ A_{\max}, & cost > cost_{\mathrm{U}} \\ \dfrac{(A_{\min} - A_{\max})}{(cost_{\mathrm{L}} - cost_{\mathrm{U}})}(\mathrm{cost}(k) - cost_{\mathrm{L}}) + A_{\min}, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{46}$$

$$A(k) = \min(A(k), \alpha(k-1) + \Delta A) \tag{47}$$

$$\alpha(k) = \max(A(k), \alpha(k-1) - \Delta A) \tag{48}$$

6- شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش ابتدا محیط شبیه‌سازی تشریح شده و سپس نتایج برای شبیه‌سازی الگوریتم‌های هدایت جستجوی نقطه‌ای و الگوریتم همکاری ارائه شده است. در تمام شبیه‌سازی‌ها حرکت هدف براساس توابع سرعت و جهت تعریف شده است. هدف هوشمند نیست و موقعیت تعقیب‌گرها تأثیری در حرکت پرنده هدف نخواهد داشت.

6-1- محیط شبیه‌سازی

الگوریتم‌های هدایت و تخمین در یک محیط شبیه‌سازی ماژولار اجرا شده‌اند. مدل شبیه‌سازی از 5 سیستم اصلی تشکیل شده که عبارت از دینامیک هدف، دینامیک پرنده، سنسور، مخابرات، الگوریتم تخمین و الگوریتم هدایت است. زیرسیستم دینامیک هدف شامل مدل حرکت هدف در محیط عملیات می‌شود. زیرسیستم هر پرنده سه مجموعه از ورودی‌ها را دریافت می‌کند: 1- موقعیت هدف، 2- موقعیت دیگر پرنده‌ها و 3- اندازه‌گیری‌های ارسال شده از دیگر پرنده‌ها. ماژول سنسور موقعیت واقعی هدف را دریافت کرده و برای مدل‌سازی نویز اندازه‌گیری، اندازه‌گیری‌ها را با نویز سفید گوسی جمع می‌کند، همچنین این ماژول موقعیت پرنده را از زیرسیستم‌های دینامیک دریافت می‌کند. الگوریتم تخمین، اندازه‌گیری‌های ماژول سنسور و دیگر اندازه‌گیری‌های ارسال شده از پرنده‌ها را دریافت می‌کند. از اندازه‌گیری‌ها برای تخمین موقعیت، جهت و سرعت هدف استفاده می‌شود. ماژول ارتباطی، موقعیت پرنده و اندازه‌گیری‌های هدف را در صورت بودن در محدوده برد مخابراتی به دیگر پرنده‌ها ارسال می‌کند. موقعیت دیگر پرنده ورودی این ماژول است و در محاسبه فاصله شعاعی میان دو پرنده برای تعیین بودن در محدوده برد مخابراتی به‌کار می‌رود. الگوریتم هدایت منفرد و همکار نیز در لحظات زمانی گسسته و نه الزاماً یکسان با نرخ زمانی تخمین اجرا می‌شود.

6-2- نتایج شبیه‌سازی الگوریتم هدایت

ابتدا الگوریتم هدایت جستجوی نقطه‌ای برای دو حالت مختلف شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی عملیات تعقیب یک منطقه عملیاتی با 14 منبع تهدید و 3 منطقه پرواز ممنوع در محیطی به وسعت 45km□45km شبیه‌سازی شده است. دو حالت شبیه‌سازی شامل موارد زیر می‌شوند:

- شروع تعقیب در حالی که پرنده در پشت هدف قرار دارد و هدف به طور پیوسته شتاب می‌گیرد.
- هدف به طور پیوسته شتاب منفی می‌گیرد و در نهایت سرعت ثابتی کمتر از سرعت کمینه پرنده خواهد داشت.

در تمام موارد پرنده تعقیب‌گر سرعت بیشینه 650km/h و سرعت کمینه 180km/h دارد. حداکثر زاویه تغییر جهت آن برابر با 30 درجه و بازه‌های زمانی شبیه‌سازی برابر با 3 ثانیه است. مقادیر f_{r} و ψ^{*}_{HDC} مربوط به استراتژی برابر با 0.0028 و 45 درجه انتخاب شده‌اند. مسیر مربوط به تعقیب‌گر، مسیر واقعی هدف و مسیر تخمینی هدف به صورت خطوط مختلف در نقشه محیط نمایش داده شده‌اند. شکل‌های 8 و 9 مربوط به مورد اول که هدف در یک مسیر درجه سوم و با سرعت افزاینده حرکت می‌کند. سرعت و جهت‌گیری هدف طبق توابع (50,49) برحسب متر بر ثانیه و رادیان تعیین شده‌اند.

$$V_{\mathrm{t}}(t) = 1000[\sin(0.00002\,t) + 0.109] \tag{49}$$

$$\psi_{\mathrm{t}}(t) = 1.7 - \frac{t}{215} + \left(\frac{t}{580}\right)^{3} + 3\sin(0.002t) \tag{50}$$

موقعیت، سرعت و جهت اولیه هدف به ترتیب برابر با (13, -38)km، 392.4km/h و 97.4 درجه است، همچنین موقعیت، سرعت و جهت اولیه پرنده برابر با (14, -31)km، 288km و 30 درجه است. برد سنسور پرنده برابر با 9 کیلومتر و شعاع دایره مجاورت برابر با 6 کیلومتر در نظر گرفته شده است. براساس شکل 8 استراتژی موفق به ایجاد مسیر امکان‌پذیری شده است که هدف را تعقیب کرده، هم‌زمان سطح تهدید را کمینه ساخته و از مناطق پرواز ممنوع اجتناب کرده است. در ابتدای تعقیب، هدف در پشت پرنده قرار دارد و پرنده برای رسیدن به هدف دور زده است. با توجه به شکل 9 می‌توان دید که سرعت پرنده همیشه در محدوده سرعت مجاز آن قرار دارد و تا زمانی که پرنده در داخل دایره مجاورت قرار دارد، سرعت پرنده و سرعت تخمینی هدف با یکدیگر برابرند.

مورد دوم در شکل‌های 10 و 11 نشان داده شده است. موقعیت، سرعت و زاویه ابتدایی هدف به ترتیب برابر با (-1, -32)km، 356.4km/h و 57.29 درجه

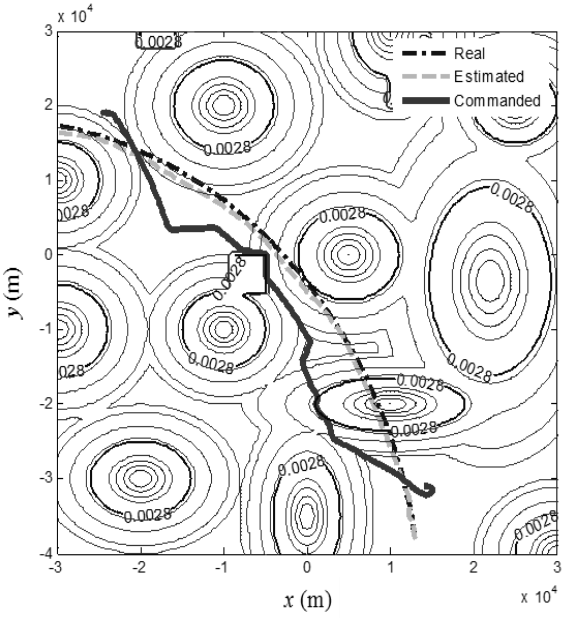

Fig. 8 UAV trajectory in target tracking, Case 1

شکل 8 مسیر پهپاد در تعقیب هدف، مورد اول

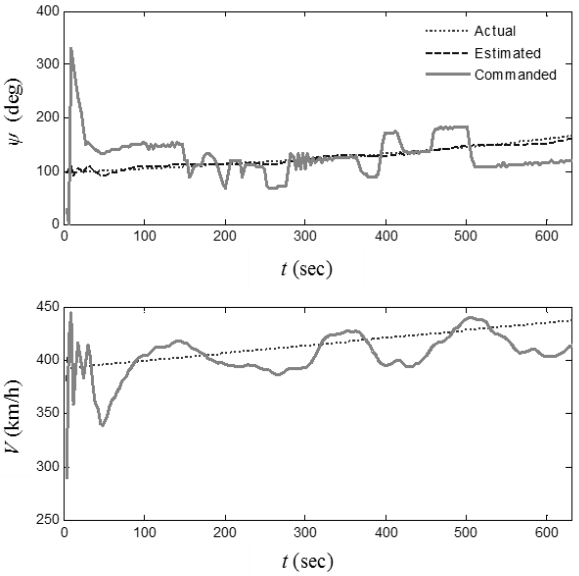

Fig. 9 Actual and estimated target speed and heading and UAV commanded speed and heading, Case 1

شکل 9 سرعت و جهت واقعی و تخمینی هدف و سرعت و جهت دستوری پرنده، مورد اول

است و هدف طبق توابع (52,51) حرکت می‌کند. موقعیت، سرعت و زاویه ابتدایی پرنده برابرند با (5, -32)km، 288km/h و 30 درجه و شعاع دایره‌های مجاورت و سنسور به ترتیب برابر با 5 و 7.5 کیلومتر است.

$$V_t(t) = 1000[0.099 - \sin(0.00015t)] \tag{51}$$

$$\psi_t(t) = 1 - \frac{t}{122} + \left(\frac{t}{615}\right)^3 + 5\sin(0.002\,t) \tag{52}$$

هدف پیوسته سرعت خود را کاهش داده و در ثانیه 600 در داخل منطقه پرواز ممنوع (سطح تهدید غیرمجاز) متوقف می‌شود. در این حالت که فاصله تا هدف بیشتر از شعاع دیسک مجاورت است، پرنده به دور منطقه پرواز ممنوع گردش می‌کند. در نواحی کوچکی که پرنده داخل دایره مجاورت شده،

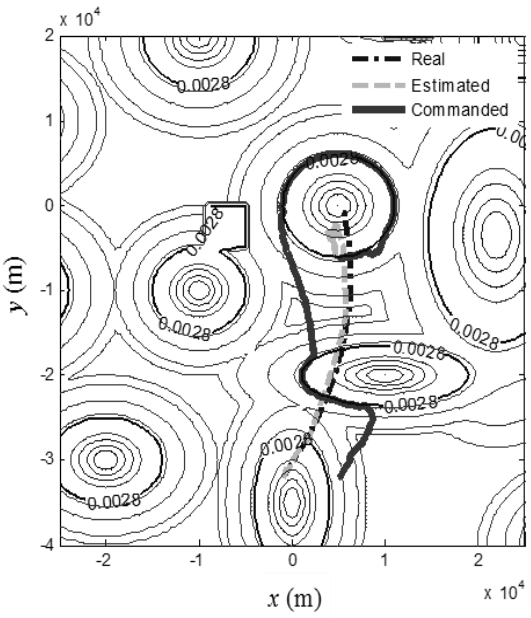

Fig. 10 UAV trajectory in target tracking, Case 2

شکل 10 مسیر پهپاد در تعقیب هدف، مورد دوم

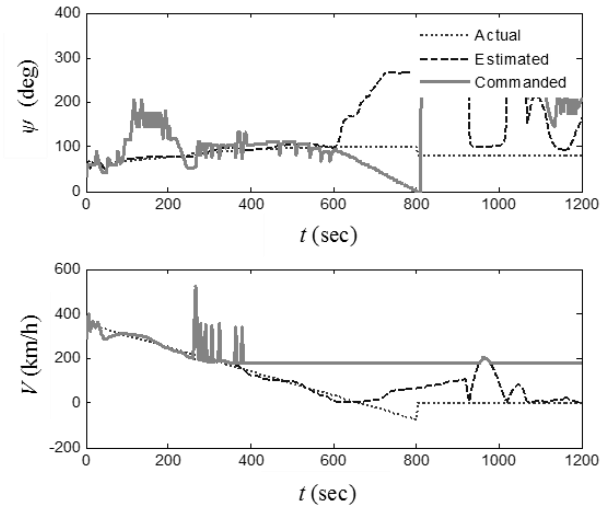

Fig. 11 Actual and estimated target speed and heading and UAV commanded speed and heading, Case 2

شکل 11 سرعت و جهت واقعی و تخمینی هدف و سرعت و جهت دستوری پرنده، مورد دوم

سعی در کمینه‌کردن سطح تهدید داشته است. از ثانیه حدود 400 سرعت پرنده به مقدار کمینه خود کاهش یافته و این سرعت در ادامه گردش حول منطقه غیرمجاز حفظ شده است. باید توجه کرد که به منظور رسیدن به دایره مجاورت، سرعت پرنده چندین بار به مقدار بیشینه خود افزایش یافته است. به نظر می‌رسد که در ثانیه 800 یک تغییر زاویه ناگهانی رخ داده است که در واقع به دلیل حفظ مقادیر زاویه بین بازه 0 و 180 درجه به این صورت دیده می‌شود.

در تمام موارد بالا از مناطق پرواز ممنوع و سطح بالای تهدید اجتناب شده است. هر چند در زمان‌های بسیار کمی و برای دورزدن این مناطق پرنده وارد این محدوده‌ها شده است، اما این به معنی شکست در عملیات نیست، زیرا که مقدار f_r یک پارامتر مأموریت بوده و معرف یک حاشیه اطمینان است تا پرنده وارد مناطق غیرمجاز اصلی نشود. دلیل پرواز در مرز منطقه پرواز

ممنوع، ماندن در داخل دایره مجاورت و برقراری مصالحه میان مسیر امن‌تر و مسیر نزدیک‌تر به هدف است؛ بنابراین با بزرگ‌تر شدن دایره مجاورت، سطح تهدیدات کاهش خواهد یافت. اما اگر شعاع دایره مجاورت بزرگ‌تر از دایره برد سنسور باشد، احتمال گم‌کردن هدف زیاد خواهد بود.

6-3- نتایج شبیه‌سازی الگوریتم همکاری

برای بررسی کارایی الگوریتم هدایت، عملیات تعقیب هدف متحرک توسط دو پرنده شبیه‌سازی شده است. مورد غیرهمکار نیز جهت مقایسه عملکرد الگوریتم همکاری شبیه‌سازی شده‌اند. در تمام موارد تعقیب هدف در یک منطقه پرخطر به مساحت 15km□15km اتفاق می‌افتد. منطقه عملیات توسط یک PTEM شامل 19 pdf فرمول‌بندی شده است. حرکت هدف از موقعیت اولیه (7.5, -13)km آغاز شده و طبق روابط (54,53) ادامه داده می‌شود.

$$V_t(t) = 1000[\sin(0.00002\,t + 0.022) \quad \text{m/s} \tag{53}$$

$$\psi_t(t) = 1.7 - \frac{t}{200} + \left(\frac{t}{650}\right)^3 + 3\sin(0.002\,t) \ \text{rad} \tag{54}$$

هر دو پرنده تعقیب‌گر دارای سرعت کمینه 72km/h و سرعت بیشینه 180km/h هستند. بیشینه تغییر جهت مجاز پرنده‌ها برابر با 10deg/sec است. سرعت و جهت ابتدایی پرنده‌ها به ترتیب برابر 144km/h و 60 درجه است. پرنده 1 و 2 ابتدا در موقعیت (8, -14)km و (6, -12)km قرار گرفتهو شعاع دایره سنسور آن‌ها به ترتیب 5 و 3 کیلومتر و برد مخابراتی هر دو پرنده 4km است.

نتیجه شبیه‌سازی برای یک تیم دو عضوی از پهپادهای خودکار در تعقیب هدف متحرک به صورت همکار در شکل 12 نشان داده شده است. پهپادها موفق به تعقیب هدف در تمام طول مأموریت شده و هیچ‌گاه وارد مناطق با سطح تهدید غیرمجاز نشده‌اند. مسیر تعقیب‌گرها در دو سمت هدف امتداد دارد و این موضوع دو مزیت درپی دارد. نخست این‌که در صورت تغییر مسیر هدف به یکی از دو سمت، یک تعقیب‌گر در نزدیکی هدف خواهد بود و اطلاعات اندازه‌گیری را به دیگر پرنده ارسال می‌کند، در نتیجه احتمال گم‌کردن هدف کاهش می‌یابد. دیگر این‌که احتمال برخورد پهپادها با یکدیگر بسیار کم است.

برای مقایسه حالت همکار و غیرهمکار، شبیه‌سازی دیگری انجام شده که نتیجه آن در شکل 13 قابل مشاهده است. در این حالت آرایش دیسک‌های مجاورت ثابت بوده و منطبق بر موقعیت هدف است. ارتباط مخابراتی میان پرنده‌ها برقرار نیست و موقعیت پرنده‌ها و اندازه‌گیری‌ها به اشتراک گذاشته نمی‌شود. مسیر پرنده‌ها هر دو در پست سر هدف ادامه یافته و قسمت زیادی از مسیر پهپادها منطبق برهم است. در نتیجه احتمال برخورد میان پهپادهای تیم زیاد است. در جدول 1 اطلاعات کمی جهت مقایسه عملکرد پهپادها در دو حالت همکار و غیرهمکار با توجه به فاصله از هدف، سطح تهدیدات و طول مسیر طی‌شده ارائه شده است. باید توجه داشت که اطلاعات ارائه شده برابر با مجموع اطلاعات کمی اعضای تیم است.

جدول 1 مقایسه عملکرد پهپادها در دو حالت همکار و غیرهمکار

Table 1 comparison of the performance of the UAVs in a cooperative case and a noncooperative case

	حالت غیرهمکار	حالت همکار
سطح کلی تهدیدات	7.782	7.453
طول کلی مسیر	63.3 km	61.9 km
مجموع فاصله تا هدف	2110 km	1144 km

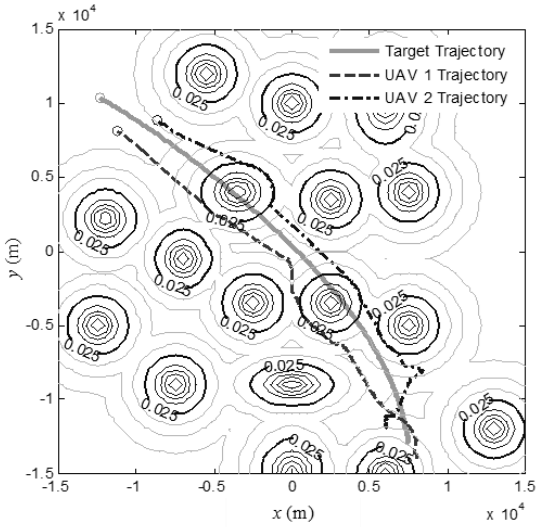

Fig. 12 Trajectories of a two-member cooperative team of UAVs in target tracking

شکل 12 مسیر پهپادهای تیم دو عضوی در تعقیب هدف در حالت همکار

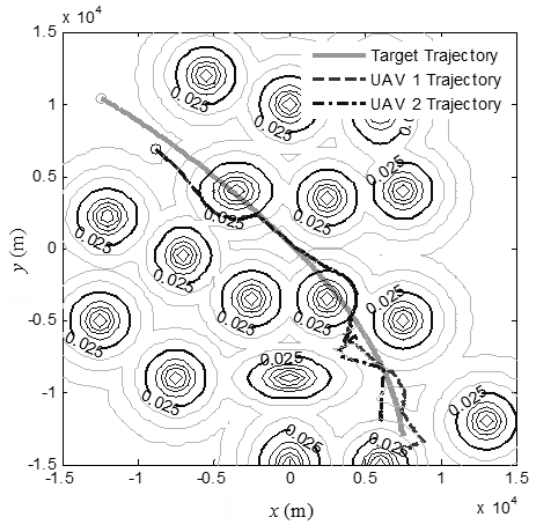

Fig. 13 Trajectories of a two-member noncooperative team of UAVs in target tracking

شکل 13 مسیر پهپادهای تیم دو عضوی در تعقیب هدف در حالت غیرهمکار

نتایج بهبود عملکرد حالت همکار را اثبات می‌کنند. مجموع فاصله تا هدف در حالت همکار بسیار کمتر از حالت غیرهمکار است و این یعنی احتمال گم کردن هدف در حالت همکار کمتر است.

7- جمع‌بندی

در این پژوهش یک استراتژی هدایت همکار برای پرنده‌های بدون سرنشین خودکار به منظور تعقیب یک هدف متحرک طراحی و با موفقیت شبیه‌سازی شد. عملیات تعقیب در یک محیط با منابع مختلف تهدید صورت گرفته است. برای تعریف تمام این منابع در یک چهارچوب واحد و آسانی به‌روزرسانی آن، نقشه تهدیدات احتمالی توسط توابع گاوسین و توابع توزیع یکنواخت برای تعریف منطقه عملیات ایجاد شده است. استراتژی هدایت از موقعیت، سرعت و جهت کنونی و موقعیت آینده هدف و نیز از نقشه تهدیدات احمالی محلی برای تعقیب هدف استفاده کرده است. برای پیش‌بینی موقعیت آینده هدف و

نیز برای تخمین موقعیت آن در صورت خارج شدن از دایره برد سنسور از تخمین‌گر مرتبه دوم به روش محاسبه دسته‌ای و حالت ترتیبی استفاده شده است. برای به‌کار بردن استراتژی در مناطق و مأموریت‌های مختلف، الگوریتم هدایت پارامتری‌سازی شده که مهم‌ترین این پارامترها عبارت از شعاع دیسک مجاورت و سطح تهدید ممنوعه است. الگوریتم هدایت در دو حالت مختلف پوشش‌دهنده حالت‌های مهم به صورت موفقیت‌آمیز شبیه‌سازی شد.

استراتژی همکاری براساس یک تابع هزینه برای ارتقاء توان تیم پهپادها طراحی و پیاده‌سازی شد. به واسطه همکاری امکان به اشتراک گذاشتن اطلاعات میان پرنده‌ها و گرفتن آرایش هوشمند فراهم شد و در نتیجه آن انعطاف پهپادها برای یافتن مسیر حرکت افزایش یافته و احتمال گم‌کردن هدف و شکست در عملیات کاهش پیدا کرده است.

برای افزایش قدرت الگوریم در تعقیب اهداف مختلف می‌توان از تخمین‌گرهای دیگر مانند فیلتر کالمن استفاده کرد، همچنین برای نزدیک‌تر شدن به حالت واقعی باید الگوریتم‌های تعقیب و همکاری برای یک منطقه عملیات سه بعدی طراحی و پیاده‌سازی شوند.

8- مراجع

[1] U.S. Army, *Unmanned aircraft systems roadmap 2010–2035*, pp. 305-320, New York: UAS Center of Excellence, 2010.

[2] F. Kendoul, Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems, *Field Robotics*, Vol. 29, No. 2, pp. 315-378, 2012.

[3] R. O. Saber, W. B. Dunbar, R. M. Murray, Cooperative control of multi-vehicle systems using cost graphs and optimization, *Proceedings of The American Control Conference*, Denver: IEEE, Vol. 3, pp. 2217-2222, 2003.

[4] S. Tom, H. Jonathan, F. Eric, Decentralized cooperative trajectory planning of multiple aircraft with hard safety guarantees, *Proceedings of The Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Rhode Island: AIAA, p. 5141 , 2004.

[5] F. Eric, L. Dale, Cooperative stand-off tracking of moving targets by a team of autonomous aircraft, *Proceedings of The Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, San Francisco: AIAA, pp. 6363, 2005.

[6] R. W. Beard, T. W. McLain, Multiple UAV cooperative search under collision avoidance and limited range communication constraints, *Proceedings of The 42nd Conference on Decision and Control* , Maui: IEEE, Vol. 1, pp. 25-30, 2003.

[7] L. F. Bertuccelli, J. P. How, Search for dynamic targets with uncertain probability maps, *Proceedings of The American Control Conference*, Minneapolis: IEEE, p. 6, 2006.

[8] J. Myungsoo, A. I. Chaudhry, R. D'Andrea, The navigation of autonomous vehicles in uncertain dynamic environments: a case study, *Proceedings of The 41st Conference on Decision and Control*, Las Vegas: IEEE, Vol. 4, pp. 3770-3775, 2002.

[9] A. Dogan, Probabilistic approach in path planning for UAVs, *Proceedings of The International Symposium on Intelligent Control*, Houston: IEEE, pp. 608-613, 2003.

[10] T. Shannon, C. Anthony, J. Eric, On-line trajectory optimization including threats and targets, *Proceedings of The Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Rhode Island: AIAA, p. 5139, 2004.

[11] C. Goerzen, Z. Kong, B. Mettler, A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance, *Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 57, No. 1-4, pp. 65-100, 2010.

[12] A. Dogan, U. Zengin, Unmanned aerial vehicle dynamic-target pursuit by using probabilistic threat exposure map, *Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 29, No. 4, pp. 944-954, 2006.

[13] M. Negnevitsky, *Artificial intelligence: a guide to intelligent systems*, Second Edition, pp. 25-54, England:Addison-Wesley, 2005.

[14] M. Jun, R. D. Andrea, Probability map building of uncertain dynamic environments with indistinguishable obstacles, *Proceedings of The American Control Conference*, Denver: IEEE, Vol. 4, pp. 3417-3422, 2003.

[15] U. Zengin, A. Dogan, Dynamic target pursuit by UAVs in probabilistic threat exposure map, *Proceedings of The 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference*, Chicago: AIAA, p. 6580, 2004.