

نظارت مداوم چندفروندی به وسیله الگوهای پیمایشی پایه با هدف کمینه سازی زمان بازبینی

حقیقی حسن^۱، ساداتی سید حسین^{۲*}، کریمی جلال^۲، دهقان سید محمد مهدی^۳

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع تحقیقات فضایی، تهران

۲- دانشیار مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۳- استادیار مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده هوافضا، تهران

۴- استادیار مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع تحقیقات فضایی، تهران

چکیده

استفاده از پهپادها در بسیاری از مأموریت‌های هوایی نظیر جستجو، نجات، گشت‌زنی‌های مرزی و نظارت متداول شده است که با توجه به پیچیدگی و گستردگی این مأموریت‌ها، معمولاً از دسته‌های چندفروندی استفاده می‌شود. نظارت یا پایش مداوم، یکی از مسئله‌های مطرح گشت‌زنی‌های هوایی می‌باشد که علیرغم پیچیدگی‌های حاکم بر محیط و شیوه‌های گشت‌زنی، می‌توان با روش‌های پیمایشی پایه آن را ساده‌سازی نمود. بحث اصلی مطرح در این موضوع، کمینه‌سازی بیشترین زمان بازبینی حادث‌شده در منطقه پیمایش می‌باشد. در این مقاله ضمن تشریح حالت‌های مختلف پیمایش و گشت‌زنی برای سامانه‌های هوایی تک و چند فروندی، رابطه زمان کمینه بازبینی استخراج و برای یک پهپاد مشخص با قیود بیان شده، ارتباط آن با دیگر پارامترهای پروازی بررسی شده است. همچنین تأثیر تغییر تعداد عامل‌ها و سرعت بر کارایی نظارت مداوم و کمینه‌سازی زمان بازبینی ارزیابی شده و با حالت‌های دیگر پیمایش مقایسه گردید. نتیجه کارکردهای بیان‌شده در این مقاله، بسط و توسعه روابط پایه نظارت مداوم برای تعداد عامل‌های مشخص، به سایر شرایط یا سایر رفتارهای پیمایشی است. نتایج این مقاله بیانگر کارایی بالای روش‌های پیمایشی پایه گفته‌شده برای الگوهای چندفروندی مشخص می‌باشد؛ همچنین برای محیطی با پهله مشخص و با توجه به قابلیت‌ها و پارامترهای پهپاد، می‌توان زمان بازبینی را به‌عنوان یک پارامتر وابسته بر اساس تعداد مشخص پهپاد محاسبه نمود و یا تابع تعداد فروندهای مورد نیاز به‌ازای زمان بازبینی ثابت را با دقت مطلوب تعیین کرد. نتایج نشان می‌دهد که در سرعت‌های بالای پهپاد مورد نظر، افزایش تعداد پهپاد در یک مساحت مشخص، کارایی چندانی در بهبود کمینه زمان بازبینی ندارد و بازه‌ای بر اساس سرعت و تعداد پهپادها می‌توان تعیین نمود که در این بازه زمان بیشینه بازبینی همواره کمینه باشد.

واژه‌های کلیدی: نظارت مداوم، گشت‌زنی هوایی، پیمایش چندفروندی پهپاد، زمان بازبینی، گشت‌زنی مرزی، جستجوی چندفروندی

Multi-UAV persistent surveillance with basic patrolling pattern in minimum revisit time

Hassan Haghghi, Seyyed Hossein Sadati, Jalal Karimi, Seyyed Mohammad Mehdi Dehghan

Abstract

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are well-suited to a wide range of mission scenarios, such as search and rescue, border patrol, and military surveillance. The complex and distributed nature of these missions often requires teams of UAVs to work together. Despite the complexity of the environment and patrol procedures, the persistent surveillance is a one of an important problem in aerial patrol which can be simplified with basic patterns. The main object is minimizing the maximum revisit time in specified path. In this article, the single and multi-agent aerial search and patrol patterns are described and revisit time equation is driven for known UAV with real model and several situations. The impact of changing speed and the number of agents on the efficiency of persistent surveillance has been evaluated and compared with another patrolling pattern. As results of this paper, the basic search methods are distributed to an arbitrary number of the agent in several patterns. The revisit time function as a dependent parameter can be calculated from agent's number as an independent parameter also in fixed value of revisit time, the optimal number of UAVs can be obtained due to specified search area. The results show that in the high-speed situation, increase the number of UAVs in the particular area, little performance improvement occurs in minimizing of maximum revisit time. A velocity and UAV number domain can be determined whereas the maximum revisit time always is minimal.

Keywords: Persistent Surveillance, Aerial patrolling, Muti-UAV patrolling, Revisit Time, Border Patrolling, Multi-agent Search

مقدمه

مسئله جستجو و نظارت مداوم عبارت از ایجاد یک پوشش همیشگی و پایدار برای یک محدوده است. با ایجاد این پوشش، موقعیت و برخی از ویژگی‌های دینامیکی اهداف ناشناخته که می‌توانند ثابت یا متحرک باشند، مشخص می‌شود. از مهمترین کاربردهای آن می‌توان به گشت‌زنی‌های مرزی، مراقبت از سواحل، کنترل ترافیکی بزرگراه‌ها، نجات جنگل‌ها، پایش آتش‌سوزی‌ها، کاربردهای جغرافیایی و نقشه‌برداری، کنترل بیابان‌ها و اقلیم و ... اشاره کرد.

در سال‌های اخیر، پهپادها از لحاظ سخت‌افزاری پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند، به‌گونه‌ای که با استفاده از حسگرهای مناسب، سامانه‌های محاسباتی داخلی، ذخیره‌سازی انرژی و سایر سامانه‌ها می‌توان تعداد زیادی از پهپادهای مختلف با قابلیت انجام مأموریت‌های متنوع تولید کرد [۱]. بسیاری از مأموریت‌ها همانند نظارت مداوم، نیازمند پروازهای طولانی، هماهنگی و همکاری تعداد زیادی از پهپادها برای رسیدن به اهداف مأموریت است. از این‌رو این‌گونه مأموریت‌ها برای کاهش هزینه و محدودیت‌های استفاده از نیروی انسانی برای هر پرنده، نیاز به سطح بالایی از خودکاربودن این سامانه‌ها دارند. در شرایط فعلی حجم بسیاری از فعالیت‌های این حوزه بر روی طراحی مأموریت و کنترل سامانه‌های چندفروندی پهپادها متمرکز شده است [۲-۵].

گرچه این تحقیقات خواسته‌های فراوانی در زمینه استفاده از سامانه‌های چندفروندی و پیچیدگی‌های حاکم بر ساختار مأموریت‌ها و کاربری‌ها را برآورده می‌نماید، ولی همچنان تعدادی پرسش باز باقی می‌ماند که می‌بایست به آنها پرداخت. پژوهش‌های متنوعی در زمینه طراحی مسیر، مسیره‌های پروازی امکان‌پذیر و بهینه‌سازی در جستجو و نظارت‌های محیطی انجام شده است. برای یافتن مسیره‌های بهینه در مأموریت‌های پوشش‌دهی و نظارت چندعاملی، الگوریتم‌های هوش مصنوعی متنوعی پیشنهاد شده است. مرجع [۶] با استفاده از شیوه برنامه‌ریزی پویای قطعی، اقدام به طراحی مسیر بهینه نموده است. در مرجع [۷] کنترل پارامتری سامانه‌های چندفروندی پهپاد و پیاده‌سازی مأموریت جستجو با استفاده از الگوریتم *A مورد بررسی قرار گرفته است. روش‌های مختلفی همچون بهینه‌سازی ازدحام ذرات، مکانیزم فرمان دیجیتال و میدان پتانسیل برای مأموریت دسته‌های پهپاد

استفاده شده است [۸-۹]. در مرجع [۱۰] الگوریتمی برای طراحی مسیر هماهنگ دسته‌ای از پهپادهای بال‌ثابت در راستای مأموریت نظارت مداوم انجام شده است. در این مرجع نیازمندی‌های این مأموریت با قابلیت‌های دوربین زمینی پرنده تلفیق شده و راهکارهایی برای شعاع چرخش پرنده اخذ شده است و برای طراحی مسیر بهینه از ساختار spline و جستجوی گراف استفاده شده است. در مرجع [۱۱] ساختاری برای مدیریت سلامتی در مأموریت‌های نظارت مداوم تدوین شده که این ساختار به پایش لحظه‌ای سوخت و وضعیت پرنده‌ها برای انتقال مأموریت یا جایگزینی آنها در این مأموریت می‌پردازد. در پژوهشی مشابه نیز ساختاری برای مدیریت نیرو و باتری در مأموریت‌های نظارت مداوم معرفی شده است [۱۲].

در مسائل پوشش‌دهی، هدف پوشش کامل یک منطقه است به‌گونه‌ای که حوادثی که در محدوده انجام می‌شود، کشف یا پیگیری شده و یا منطقه به‌طور کامل با اجزا مرتبط شناسایی گردد [۱۳-۱۴]. ولی در مسائل نظارت مداوم، بخش با اهمیت و متمایز آن با دیگر مأموریت‌ها، زمان بازبینی یک نقطه یا محدوده بعد از آخرین دیدار آن نقطه است. هر چه این زمان که به‌عنوان زمان عمر آن محدوده تلقی می‌شود کمتر گردد، نظارت با پایداری و دقت بیشتری همراه است [۱۵].

با توجه به مطالب ذکر شده، گشت‌زنی مبتنی بر زمان بازبینی چندعاملی و تعریف مسائل پیمایشی از دیدگاه زمان بازبینی و تعداد عامل‌ها به‌عنوان پارامترهای تاثیرگذار در پیمایش، هدف اصلی این مقاله است. از این‌رو در این مقاله، از دیدگاه این پارامترها مسئله نظارت چندعاملی بازتعریف می‌شود. بنابراین رویکرد این مقاله، ورود پارامتر زمان بازبینی به بحث بهینه‌سازی و پیاده‌سازی نظارت مداوم است که توزیع زمان بازبینی در نظارت مداوم چندعاملی بین پهپادهای مختلف خواهد بود.

بیان مسئله

در بحث ساختارهای پایه به‌طور کلی سه شیوه عمده حرکتی در مباحث جستجو و نظارت مداوم هوایی مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- حرکت جاروبی (ماشین چمن‌زنی)
- حرکت حلزونی (مارپیچی)
- سایر حرکت‌های ترکیبی خطی یا منحنی

در این حالت و با این فرضیات، نرخ تغییر زاویه سر^۳ پرنده ($\dot{\chi}$) نیز از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد [۱۷].

$$\dot{\chi} = \frac{g \tan \phi}{V_a} \quad (2)$$

در این روابط g شتاب جاذبه است. در ادامه با این مدل پروازی و معرفی هندسه پهنه مورد جستجو، با شیوه‌های مختلف پیمایشی عملیات نظارت مداوم بر روی این هندسه در حالت‌های مختلف ابعادی و تعداد پرنده‌ها انجام می‌شود. در شیوه فرمول‌بندی مسئله نظارت در این مقاله، از شیوه فرمول‌بندی پیوسته استفاده می‌شود؛ به گونه‌ای که هر نقطه محدوده و هر فریم ثبت شده توسط دوربین به عنوان یک ناحیه مهم تلقی می‌شود و در واقع پهنه مورد جستجو، مجموعه‌ای پیوسته از نواحی با ارزش بازبینی یکسان در نظر گرفته می‌شود. زمان سپری شده از آخرین بازبینی یک منطقه یا پهنه ثبت شده به عنوان عمر آن محدوده با پارامتر (T_{age}) ثبت می‌شود؛ بنابراین در نظارت و کنترل یک محدوده، بیشینه مقدار T_{age} در واقع بحرانی ترین حالت مسئله است که می‌بایست این مقدار بیشینه، کمینه گردد. با شبیه‌سازی حالت‌های مختلف می‌بایست رابطه‌ای برای کمترین مقدار T_{age} بیشینه محاسبه گردد. پارامترهای مهم در هر بخش زمان بازبینی و تعداد عامل‌ها است که وابستگی این دو پارامتر در هر مسئله بررسی می‌شود.

ساختار پیمایشی ماشین چمن‌زنی

در پیمایش چمن‌زنی^۴، حرکت از یک نقطه آغاز شده و محدوده به صورت رفت و برگشت پیمایش می‌شود. برای ربات‌های زمینی و همچنین سامانه‌های هوایی حرکتی دارای بیشترین کارایی است که علاوه بر کاهش زمان جستجو، کمترین تلاش کنترلی (کمترین دور زدن‌ها یا تغییر مسیرهای ممکن) را انجام دهد. در حالت چندعاملی، محدوده جستجو بین تعداد مشخصی از عامل‌ها تقسیم شده و زمان بازبینی محاسبه می‌شود. برای دور زدن و تغییر مسیر، از حالت بیرون از محدوده استفاده می‌شود؛ در واقع فرض می‌شود که پرنده مسیر مورد نظر را تا انتها ادامه داده و در خارج از مسیر اقدام به دور زدن و برگشت می‌نماید. فرض کلی تمامی مباحث در این بخش، اعمال کنترلر ثابت بودن سرعت و حفظ ارتفاع پروازی در نتیجه دورزدن‌های پیمایشی است. در ادامه روابط

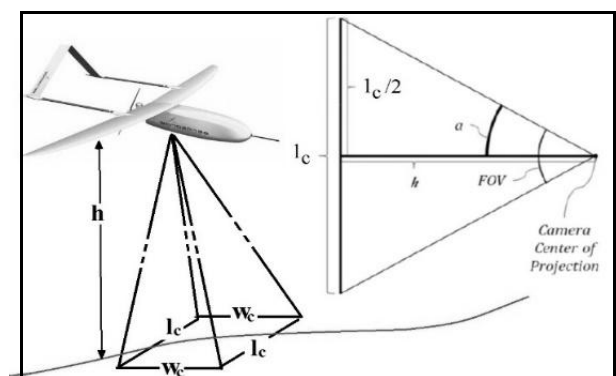
با توجه به اینکه ساختار سوم یک حرکت ترکیبی بوده که مستلزم شناخت حرکت‌های پایه دو نوع نخست است؛ تمرکز اصلی این مقاله بر روی دو نوع حرکت پایه می‌باشد و ضمن بیان روابط حاکم بر هر روش، مزایا و معایب آنها از دیدگاه کاربرد در گشت‌زنی هوایی و امکان استفاده برای سامانه‌های پرنده بال ثابت بررسی می‌شود.

مسئله نظارت مداوم از دیدگاه‌های مختلفی فرمول‌بندی می‌گردد. یک شیوه فرمول‌بندی که در این مقاله نیز به کار برده شده است، بر اساس پارامترهای سنسور و شیوه حرکت در محیط است. سنسور مورد استفاده در این مقاله دوربین پایین‌نگر ثابت در زیر بدنه پهپاد است. پارامترهای دوربین در شکل ۱ نشان داده شده و میدان دید (FOV)^۱ زمینی دوربین به صورت مستطیلی با طول l_c و عرض w_c در نظر گرفته می‌شود.

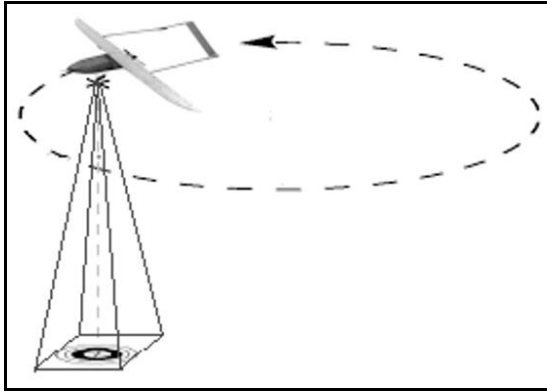
برای ساده‌سازی حرکت فرض می‌گردد که سرعت زمینی وسیله و ارتفاع پروازی بر روی یک مقدار ثابت کنترل گردد و دور زدن با تکنیک چرخش با غلتش (BTT)^۲، با یک زاویه غلت ثابت (\square) و با شعاع ثابت R_{turn} انجام می‌شود. شعاع چرخش نیز در مقایسه با ابعاد تصویر زمینی دوربین و ابعاد پهنه جستجو مقداری غیرقابل صرف نظر کردن فرض می‌شود. بنابراین حداقل شعاع چرخش با رابطه (۱) به سایر پارامترها مرتبط می‌گردد [۱۶]:

$$R_{turn} = \frac{m V_a^2}{L_a \sin \phi} \quad (1)$$

در این روابط L_a نیروی برای پهپاد، m جرم پرنده و V_a سرعت برآیند است.



شکل ۱ - پارامترهای دوربین دوربین پرنده



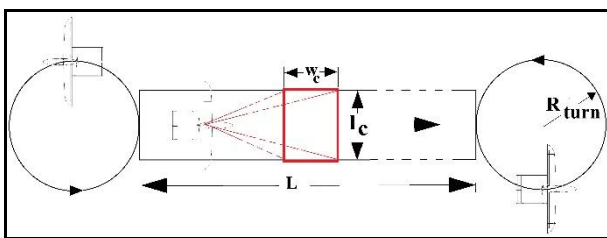
شکل ۲ - پیمایش صفربعدی بر روی یک نقطه با دوربین ثابت

$$N_{agent\ min} = \left\lceil \frac{2\pi mV_a}{t_0 L_a \sin\phi} \right\rceil \quad (6)$$

در مورد محدودیت تعداد، با توجه به لزوم استفاده از عدد صحیح برای تعداد فروندهای پروازی، شرط عدم هم پوشانی الزاماً یک فروند کمتر یا مساوی شرط پوشش کامل محدوده است. با توجه به این، در رابطه (۵) از شرط پوشش کامل و در رابطه (۶) از شرط جلوگیری از هم پوشانی استفاده شده است. گفتنی است تعداد کمینه و بیشینه محاسبه شده، مربوط به حالت های بهینه بوده و مرتبط با عموم شیوه های پیمایشی نیست.

نظارت مداوم محدوده یک بعدی

این نوع نظارت برای پیمایش های مرزی یا ساحلی کاربرد دارد. در این حالت عامل های پرنده در محدوده جستجو به صورت خطی و رفت و برگشتی اقدام به گشت زنی و جستجو می نمایند. شکل ۳ این ساختار را با طول مسیر (L)، طول میدان دید زمینی دوربین I_c و عرض w_c نشان داده است. با فرض قابل توجه بودن شعاع چرخش در بیرون از مسیر نسبت به سایر ابعاد مؤثر، کمینه بیشترین مقدار زمان بازبینی



شکل ۳ - نظارت یک بعدی بر روی خط

این نوع جستجو برای پهپادهای بال ثابت با افزایش بعد منطقه مأموریت بیان می گردد.

نظارت مداوم محدوده صفر بعدی

در محدوده صفر بعدی تنها یک نقطه یا ناحیه برای جستجو وجود دارد که اندازه این ناحیه کوچکتر از ابعاد تصویر زمینی دوربین می باشد؛ بنابراین در پیمایش تک عاملی، پهپاد با دور زدن های مکرر با کمینه ترین شعاع چرخش $R_{turn\ min}$ به مانند شکل ۲ اقدام به پایش این ناحیه می نماید.

زمان کمینه بازبینی بیشینه برای تمام فریم های i تصاویر ثبت شده در حالت تک عاملی با توجه به شعاع چرخش کمینه و سرعت پروازی فرض شده، مقداری ثابت بوده و در حالت کمینه ارتباط آن با سایر پارامترهای پروازی تأثیرگذار با رابطه (۳) بیان می گردد:

$$\min(\max(T_{visit_i})) = \frac{2\pi R_{turn\ min}}{V_a} = \frac{2\pi mV_a}{L_a \sin\phi} \quad (3)$$

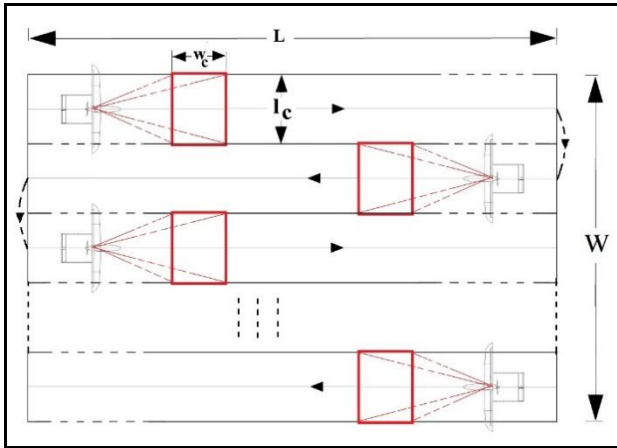
در واقع با هر شیوه ای که پیمایش انجام شود، این زمان کمترین زمان ممکن قابل دستیابی است. در حالت چند عاملی، مقدار کمینه زمان بازبینی برای حالتی تعیین می گردد که کلیه پهپادها در همان مسیر مشخص شده با فواصل مساوی به دنبال هم اقدام به انجام پیمایش نمایند. در این حالت زمان بازبینی از رابطه (۴) محاسبه می گردد:

$$\min(\max(T_{visit_i})) = \frac{2\pi mV_a}{N_{agent} L_a \sin\phi} \quad (4)$$

با توجه به مشخصات ابعاد زمینی دوربین، حداکثر تعداد پهپادها (N_{agent}) برای پوشش کامل نواحی، محدود بوده و این محدودیت با رابطه (۵) قابل بیان است:

$$N_{agent\ max} = \left\lceil \frac{2\pi R_{turn}}{w_c} \right\rceil + 1 \quad (5)$$

در این رابطه عبارت [] بیانگر جزء صحیح می باشد. برای پیمایش در زمان بازبینی مشخص t_0 ($T_{visit} = t_0$)، حداقل تعداد پهپاد مورد نیاز برای بازبینی محدوده و با محدودیت جلوگیری از هم پوشانی پهپادها بصورت رابطه (۶) می باشد:



شکل ۴ - نظارت دوبعدی رفت و برگشتی به شیوه چمن زنی یک عامله

برابر باشد ($l_c \approx 2R_{turn}$)، زمان بازبینی یک نقطه در پیمایش به موازات طول با رابطه (۱۱) ساده سازی می گردد:

$$\min(\max(T_{revisit_i})) = \frac{2kL + W}{V_a} + \frac{(2k-1)\frac{\pi l_c}{2}}{V_a} \quad (11)$$

برای حالتی که طول میدان دید بسیار بزرگتر از قطر کمینه دورزنی پهباد باشد ($l_c \gg 2R_{turn}$)، رابطه (۱۱) به رابطه (۱۲) تبدیل می شود:

$$\min(\max(T_{revisit_i})) = \frac{2kL + 2W}{V_a} \quad (12)$$

همان گونه که از روابط (۱۱) و (۱۲) مشخص است، علاوه بر هندسه محدوده مورد جستجو، پارامتر مهمی که بر روی زمان بازبینی نقاط تأثیرگذار است، سرعت حرکت پهباد است به گونه ای که با افزایش سرعت وسیله، زمان بازبینی نقاط محدوده کاهش می یابد.

برای حالت چندعاملی همگن که مشخصات سرعت، ارتفاع پروازی، سوخت مصرفی، الگوی عوارض سطحی محدوده مورد نظارت، شعاع دورزنی و ابعاد تصویر دوربین وسایل مشابه باشد، بهترین حالت تقسیم مساوی طول جستجو به تعداد عامل های پروازی است. با تغییر هر یک از پارامترهای بالا، محدوده منطبق شده برای هر عامل و کمینه بیشترین زمان بازبینی دچار تغییراتی خواهد شد. در این شرایط کمینه بیشترین زمان بازبینی با فرض قابل ملاحظه بودن قطر کمینه

در حالت تک عاملی و چندعاملی نسبت به تعداد N_{agent} عامل با روابط (۷) و (۸) بیان می گردند:

$$\min(\max(T_{revisit_i})) = \frac{2L + 2\pi R_{turn}}{V_a} \quad (7)$$

$$\min(\max(T_{revisit_i})) = \frac{2L + 2\pi R_{turn}}{N_{agent} V_a} \quad (8)$$

محدودیت تعداد عامل ها در این شیوه، برای پوشش کامل و عدم هم پوشانی هم زمان نواحی، با رابطه (۹) و حداقل تعداد عامل های مورد نیاز در زمان بازبینی مشخص t_1 با رابطه (۱۰) بیان می شود:

$$N_{agent_{max}} = \left\lceil \frac{2L + 2\pi R_{turn}}{w_c} \right\rceil + 1 \quad (9)$$

$$N_{agent_{min}} = \left\lceil \frac{2L + 2\pi R_{turn}}{t_1 V_a} \right\rceil \quad (10)$$

نظارت مداوم سطح دوبعدی

در صورت مهم بودن تمام نقاط محدوده و پیوسته بودن نواحی مورد جستجو، این شیوه می تواند به سه صورت: موازی با طول، موازی با عرض و اریب انجام پذیرد. با فرض منظم بودن، پیوسته و هموار بودن مرزها، برای استخراج روابط پایه اگر محدوده جستجو مستطیل شکل با طول (L) و عرض (W) باشد ($L \geq W$)، آن گاه جستجوهای موازی با طول دارای تلاش کنترلی کمتر هستند و از این رو دارای کارایی بهتری در سامانه های هوایی هستند. برای انجام این جستجو، پس از اتمام پیمایش یک محدوده، پرند می تواند به صورت محیطی یا قطری به مکان اولیه جستجو برگشته و گشت زنی را برای مرحله بعد از سر گیرد. شکل ۴ شیوه جستجوی تک عاملی را برای یک محدوده مشخص در حالت موازی با طول نشان می دهد که بر اساس پارامترهای دوربین و با شرایط قابل ملاحظه بودن شعاع چرخش در مقابل عرض میدان دید زمینی، اقدام به پیمایش می نماید. برای کاهش این فاصله یعنی برگشت به نقطه اول فرض می شود که عرض محدوده جستجو مضرب زوجی از طول میدان دید دوربین باشد؛ به عبارتی $W = 2k l_c$ است که k می تواند هر عدد صحیح مثبتی باشد. برای حالتی که طول میدان دید تقریباً با قطر کمینه دورزنی

$$\min(\max(T_{\text{revisit}_i})) = \frac{\frac{L^2 - l_c^2}{l_c} + \frac{\sqrt{2}L}{2}}{V_a} \quad (18)$$

زمان بازبینی شیوه چمن زنی نیز با رابطه (۱۸) برابر است و تنها تفاوت در بازگشت به نقطه اولیه است. درحالتی که محدوده مستطیل شکل باشد و طول و عرض مضرب زوجی از طول میدان دید دوربین باشند $(L = (2k)l_c)$ ، $W = (2k')l_c$ و $k \geq k'$ ؛ طول جستجو به روش حلزونی شکل با رابطه (۱۹) بدست می آید:

$$\begin{aligned} \text{Length of path} &= (2k-1)l_c \\ &+ 2(k+k-1)l_c + 2(k+k-2)l_c \\ &+ \dots + 2(k+k-(2k-1))l_c \\ &= (L-l_c) + \frac{(W-l_c)(L+2W)}{l_c} \end{aligned} \quad (19)$$

و در نتیجه کمینه زمان بازبینی یک نقطه با رابطه (۲۰) بدست می آید:

$$\min(\max(T_{\text{revisit}_i})) = \frac{\left((L-l_c) + \frac{(W-l_c)(L+2W)}{l_c} \right) + \frac{L^2+W^2}{2}}{V_a} \quad (20)$$

برای حالت چندعاملی باتوجه به مشخص شدن طول پیمایش می توان شیوه های مأموریت متفاوتی انتخاب کرد. کمینه بیشترین زمان بازبینی این شیوه پیمایش در حالت چندعاملی در حالت حدی به مقدار رابطه (۲۱) میل می نماید:

$$\min(\max(T_{\text{revisit}_i})) = \frac{\left((L-l_c) + \frac{(W-l_c)(L+2W)}{l_c} \right) + \frac{L^2+W^2}{2}}{N_{\text{agent}} V_a} \quad (21)$$

محدودیت تعداد عامل ها هم برای عدم هم پوشانی تصاویر دوربین نیز با رابطه جزء صحیح (۲۲) بیان می گردد:

دورزنی با رابطه (۱۳) و قابل ملاحظه نبودن آن با رابطه (۱۴) به دست خواهد آمد:

$$\min(\max(T_{\text{revisit}_i})) = \frac{2kL+W}{N_{\text{agent}} V_a} + \frac{(2k-1)\frac{\pi l_c}{2}}{N_{\text{agent}} V_a} \quad (13)$$

$$\min(\max(T_{\text{revisit}_i})) = \frac{2kL+2W}{N_{\text{agent}} V_a} \quad (14)$$

حداکثر تعداد عامل ها و تعداد پهپادها برای زمان بازبینی مشخص t_2 نیز در حالت پوشش کامل و عدم هم پوشانی نواحی با فرض مهم نبودن شعاع چرخش در مقایسه با طول زمینی میدان دید با روابط (۱۵) و (۱۶) بیان می گردد:

$$N_{\text{agent}_{\max}} = \left\lceil \frac{2kL+2W}{w_c} \right\rceil + 1 \quad (15)$$

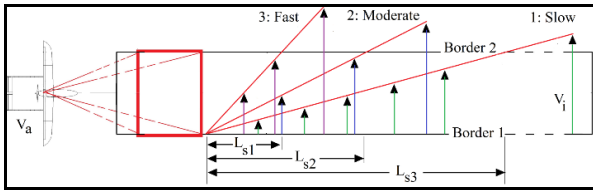
$$N_{\text{agent}_{\min}} = \left\lceil \frac{2kL+2W}{t_2 V_a} \right\rceil \quad (16)$$

ساختار پیمایشی نظارت مداوم به شیوه حلزونی

پیمایش حلزونی^۵ از مرکز یک محدوده که می تواند یک باند پروازی باشد، آغاز می شود و به صورت مارپیچ کل محدوده را پوشش می دهد و سپس به نقطه اولیه برخواهد گشت. برای بررسی حالت بحرانی و مقایسه عملکردی با حالت چمن زنی، از محدوده ای مربع شکل که اضلاع محدوده مضرب فردی از طول زمینی میدان دید دوربین است، استفاده می شود $(L=W=(2k+1)l_c)$. طول مسیر طی شده از یکی از رئوس مربع تا رسیدن به مرکز آن در روش حلزونی از رابطه (۱۷) محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} \text{Length of path} &= 2kl_c + 2(2k)l_c \\ &+ 2(2k-1)l_c + 2(2k-2)l_c \\ &+ \dots + 2(2l_c) + 2l_c = \frac{L^2 - l_c^2}{l_c} \end{aligned} \quad (17)$$

باتوجه به طول مسیر طی شده، زمان بازبینی مجدد نقاط برای جستجوی حلزونی شکل عبارت است از:



شکل ۵ - سرعت و پیمایش عامل متجاوز در نظارت مرزی

خارج شدن از دید پهنه دوربین) به سوی مرز ۲ حرکت می کند. در واقع در این شیوه فرض شده است که با شروع حرکت عامل پروازی با سرعت V_a ، عامل متجاوز می تواند از هر جای طول مرز زمینی (L) شروع به حرکت کند؛ بنابراین هر چه از پرنده دورتر باشد با رسیدن پرنده به آن نقطه طول بیشتری را پیمایش می کند. همچنین پارامتر نسبی V_i/V_a بیانگر شیب نمودار گذر و درصد پیمایش است که می تواند یکی از حالت های گذر تند، متوسط و یا آهسته را نشان دهد. طول مشخصه ای وجود دارد که در هر کجای آن و در هر زمان گذشته از پرواز، عامل متجاوز اقدام به ورود به مرز کند، توسط پهباد قابل رویت خواهد بود. این طول مشخصه (L_s) بر مبنای سرعت های عامل پروازی و متجاوز قابل تعریف خواهد بود.

برای تعیین این طول از یکسان بودن زمان پیمایش و زمان گذر (t_i) میان وسیله پرنده و عامل متجاوز استفاده می شود که در رابطه (۲۳) محاسبه شده است:

$$t_i = \frac{L_s}{V_a} = \frac{L_c}{V_i} \rightarrow L_s = \frac{L_c}{V_i/V_a} \quad (23)$$

باتوجه به رابطه (۲۳) شیب تند حرکت و خطوط پوش پیمایش عامل متجاوز در شکل ۵، برابر V_i/V_a خواهد بود که هر چه این مقدار بزرگتر باشد، نمودار به سوی حرکت سریع عامل مهاجم متمایل شده و درصد پوشش کمتری در پی دارد. درصد پوشش از میزان مساحت جستجو شده به کل مساحت مرزی محاسبه می شود که تابعی از پارامتر نسبت سرعت ها (V_i/V_a) خواهد بود. این ارتباط در رابطه (۲۴) نشان داده شده است:

$$POC = \frac{L_s}{L} \times 100 = \frac{L_c}{(V_i/V_a)L} \quad (24)$$

$$N_{agent\ min} = \left[\frac{\frac{L^2 + W^2}{2}}{w_c} + \frac{\left((L - l_c) + \frac{(W - l_c)(L + 2W)}{l_c} \right)}{w_c} \right] \quad (22)$$

جستجوی حلزونی دارای عملکردی مشابه جستجوی چمن زنی در زمان پوشش کل محدوده در یک مرحله است، ولی در هنگام بازگشت به نقطه اولیه به ویژه برای نواحی خطی و دارای نسبت طول به عرض بالا ($L/W \gg 1$)، معمولاً مسیر بیشتر و زمان بیشتری مورد نیاز است. ضمن اینکه این نوع جستجو در سامانه های هوایی نیازمند تأثیرگذاری زیاد و دائم سطوح کنترل و ایجاد گردش پایدار در کل مسیر است. در نتیجه این نوع حرکت به ویژه در نواحی مرکز شکل موجب اشباع سطوح کنترلی، از دست رفتن ارتفاع در حالت گردش با غلتش و کنترل دشوار در این نواحی است.

نظارت مداوم مرزی و درصد پوشش

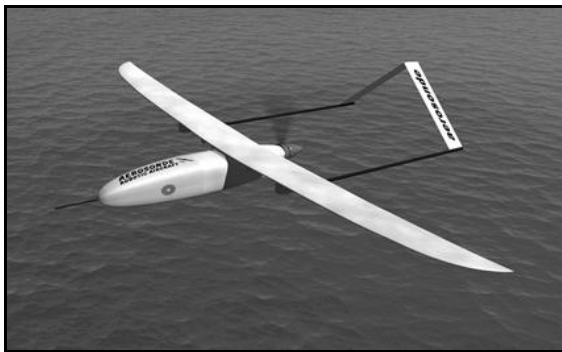
یکی از کاربردهای پراهمیت فرآیند جستجو و پایش مداوم یک بعدی و دوبعدی، گشت زنی مرزی می باشد. در این کاربرد عوامل متجاوز به مرز شناسایی و مورد تعقیب یا عملیات بازدارندگی قرار خواهند گرفت. فرمول بندی مسئله پوشش و نظارت مداوم مرزی و چگونگی کارکرد پوشش در لحاظ عامل متجاوز در مرجع [۱۸] و با روش صفحه مجازی مکانی-زمانی بیان شده است. با توجه به برداشت های لازم از این مرجع سعی شده، شیوه ای کاربردی تر برای محاسبه پارامتر کلیدی درصد پوشش (POC) لحاظ گردد. در این محاسبه از فرض های ثابت بودن سرعت ها، مساوی بودن مرز یکنواخت مستطیلی با ناحیه تکه تکه هموار غیرمستطیلی برای محاسبات و الگوی نظارت یک بعدی استفاده شده است.

ارتباط عامل متجاوز

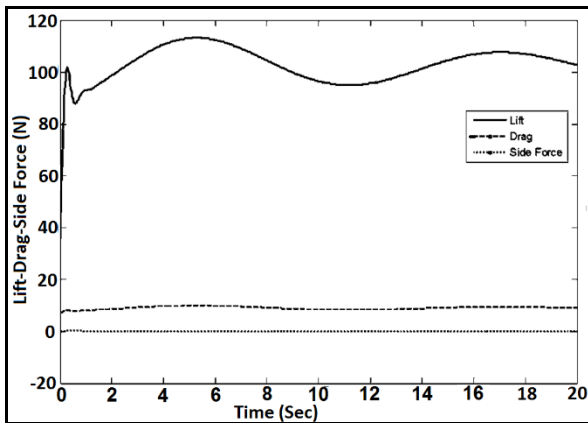
همان گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، فرض می شود که با حرکت پرنده، عامل متخاصم از طول مرز ۱ وارد و با سرعت (V_i) در کوتاهترین مسیر (برای کمتر دیده شدن و

اتمسفر و زمین و لحاظ کلیه عدم قطعیت‌های محیطی و باد ارائه نموده است.

برای محاسبه نیروی برآ و سایر پارامترهای موردنیاز در شبیه‌سازی، پرواز این پرنده در ارتفاع ۱۰۰۰ متری با سرعت ۲۵ متربرثانیه، در حضور اثرات اتمسفر، نویز، عدم قطعیت‌ها و سایر شرایطی که در این مدل ارائه شده، کنترل می‌گردد. نیروی برآ در این شرایط پروازی و طبق شکل ۷ در حدود ۱۰۰ نیوتن به‌دست آمده است.



شکل ۶ - پهپاد Aerosond [۱۹].



شکل ۷ - نیروی برآ، پسا و جانبی در حالت پایدار پهپاد Aerosond

باتوجه به مقدار نیروی برآ، کمینه شعاع دوزدن طبق رابطه (۱)، حدود ۵۰۰ متر و ابعاد زمینی تصویر حدود ۳۰۰ در ۴۰۰ متر با نسبت ۳/۴ بدست آمد. در حالت صفربعدی و دوزنی محض با شعاع کمینه، ارتباط بین زمان بازبینی، سرعت و تعداد پهپاد در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، تأثیر افزایش تعداد عامل‌ها و یا سرعت پرنده بر زمان بازبینی کم است. به‌گونه‌ای که با یک تعداد پهپاد مشخص، تأثیر افزایش سرعت بر کاهش زمان بازبینی کم است. همچنین با افزایش تعداد پهپادها، فشرده‌گی

با نگرش به رابطه (۲۴) مشخص است که علی‌رغم تأثیر مشخصات دوربین در اندازه پوشش منطقه، هر چه V_i/V_a بیشتر باشد، درصد پوشش کمتر می‌شود.

پوشش مرزی چندعامله

باتوجه به رابطه درصد پوشش، پرنده در هر لحظه از حرکت تنها این میزان از سطح محدوده را به‌اصطلاح جارو خواهد کرد. بنابراین برای افزایش درصد پوشش، بدون تغییر در پارامترهای کلیدی سرعت عامل متخاصم یا سرعت پرنده، می‌توان از حالت چندعامله استفاده نمود. بنابراین در حالت ایده‌آل حداقل تعداد عامل‌های پروازی، برای رسیدن به درصد پوشش ۱۰۰ درصد، از رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود:

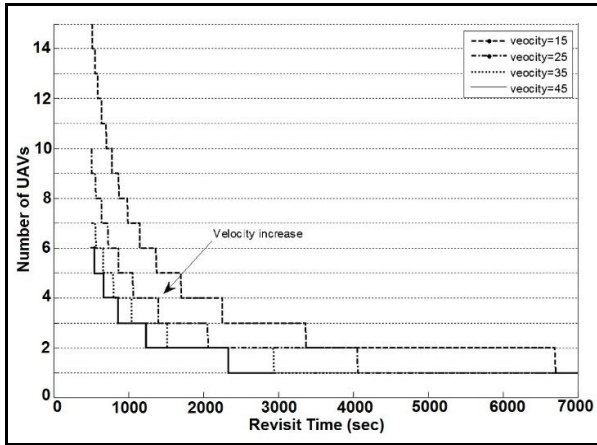
$$N_{agent\ min} = \left[\frac{100}{POC} \right] + 1 = \left[\frac{(V_i/V_a)L}{l_c} \right] + 1 \quad (25)$$

به‌عبارت دیگر، درحالت ایده‌آل هر عامل تنها طول مشخصه را پوشش خواهد داد و پس از آن یا همین محدوده را برمی‌گردد و یا در ادامه حرکت محدوده حاضر را به سایر پرنده‌ها واگذار نموده و خود طول مشخصه مجاور را کنکاش خواهد نمود. یعنی به‌عبارتی محدوده‌های گشت‌زنی میان چند پرنده مختلف تبادل می‌گردد. این حالت موجب دوزدن‌ها، اتلاف زمانی و تلاش کنترلی کمتر میان عامل‌های پرنده می‌شود. در بهترین ساختار، کمترین تعداد عامل برای پوشش کامل محدوده از رابطه (۲۵) قابل محاسبه است.

نتایج شبیه‌سازی و بحث

پیمایش، محدوده وابسته به پارامترهای عملکردی پهپاد انتخابی است و استخراج زمان‌های کمینه باتوجه به شیوه حرکتی پهپاد و مانورپذیری آن تعیین می‌شود. در این مقاله، برای شبیه‌سازی از مدل شش‌درجه آزادی پهپاد Aerosonde استفاده می‌شود. مطابق شکل ۶، این هواپیما دارای موتور پیستونی، دم V وارون^۷ و بال نصب‌شده در بالای بدنه^۸ می‌باشد و از پایداری مناسب استاتیکی برخوردار است.

برای شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف، از مدل شش‌درجه آزادی غیرخطی این پرنده در یک ساختار کنترلی پرواز هم‌سطح حالت پایدار^۹ استفاده شد. مرجع [۱۹] مدل کامل غیرخطی از این پرنده را با درنظر گرفتن مدل کامل موتور،



شکل ۱۰ - نظارت محدوده یک بعدی:
تعداد پهپادها با زمان بازبینی و اثر سرعت

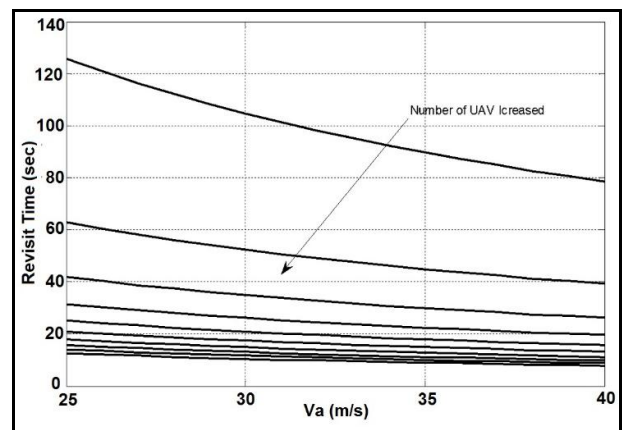
نتایج شبیه سازی برای این پهپاد در جستجوی صفحه ای به طول ۱۰۰ کیلومتر و عرض ۶۰ کیلومتر با مشخصات یادشده، در شکل های ۱۱ و ۱۲ آمده است. مطابق شکل های ۱۱ و ۱۲ رفتار جستجوی دوبعدی و یا به عبارتی جستجوی صفحه ای همانند جستجوی خطی یا تک بعدی بوده با این تفاوت که با گسترده گی ناحیه، زمان بازبینی به نسبت جستجوی خطی افزایش خواهد یافت. عملکرد جستجو نیز با افزایش تعداد تا حدی افزایش می یابد، ولی برای این ناحیه استفاده بیش از چهار عامل پروازی اثر افزایش سرعت را تقریباً خنثی کرده و شیب زمان بازبینی نسبت به تغییرات سرعت تقریباً نزدیک به صفر بدست می آید.

شکل ۱۳ درصد پوشش یک پهپاد در مرز ۱۰۰ کیلومتری را نشان می دهد. نتایج حاصل بیانگر مقدار کم درصد پوشش در نسبت های سرعت بزرگ است. شکل ۱۴ حداقل تعداد پهپاد مورد نیاز برای پوشش کامل محدوده در نسبت سرعت های مشخص شده را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که با نسبت سرعت های واقعی (نزدیک ۰/۱) در یک مرز ۱۰۰ کیلومتری، به حدود ۲۰ پهپاد برای پوشش کامل و مداوم مرز نیاز است.

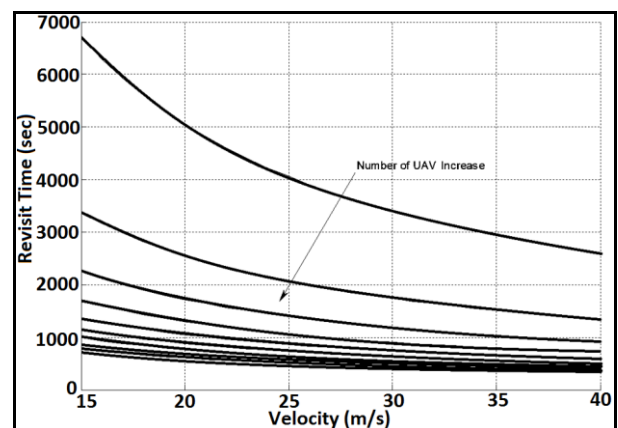
برای بررسی حساسیت و عملکرد پایش مرزی، خروجی سه پارامتر درصد پوشش، زمان گذر و تعداد پهپادهای مورد نیاز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، نویز سفید به پارامترهای سرعت مهاجم و سرعت پهپاد اعمال گردید. شکل ۱۵ حساسیت درصد پوشش نسبت به سرعت مهاجم را نشان می دهد. همانطور که شکل ۱۵ نشان می دهد، درصد

خطوط بیشتر شده که حاکی از تاثیر اندک افزایش تعداد پهپاد بر کاهش زمان بازبینی است. شکل ۹ زمان بازبینی در جستجوی یک بعدی با تغییرات سرعت توسط ۱ تا ۱۰ پهپاد را نشان می دهد. این جستجو برای پهنه ای به طول ۱۰۰ کیلومتر و شعاع دورزدن با زاویه غلت 15° درجه است.

تعداد پهپادهای مورد نیاز برای چنین محدوده ای با زاویه غلت ۱۵ درجه برای دورزدن با شعاع های متغیر با سرعت، در زمان های مختلف بازبینی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. باتوجه به شکل ۱۰، در سرعت های بالا اثر افزایش تعداد پهپادها بر کاهش زمان بازبینی ناچیز است و همچنین در تعداد عامل های بالا نیز تاثیر افزایش سرعت بر کاهش زمان بازبینی، مناسب نبوده و می توان با استفاده از این نتایج به حالت بهینه سرعت و تعداد برای یک پهنه مشخص رسید.

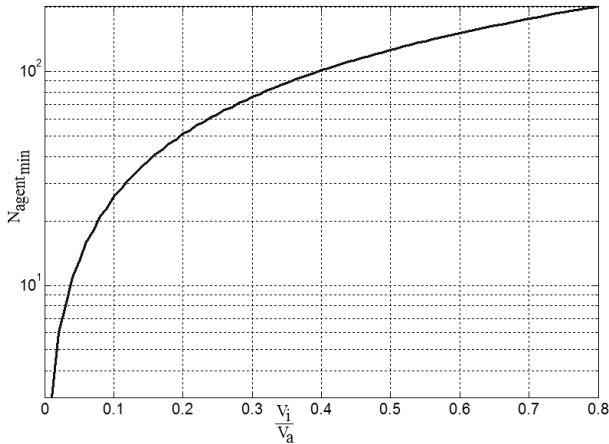


شکل ۸ - زمان بازبینی نظارت صفر بعدی بر اساس سرعت، از ۱ تا ۱۰ فروند



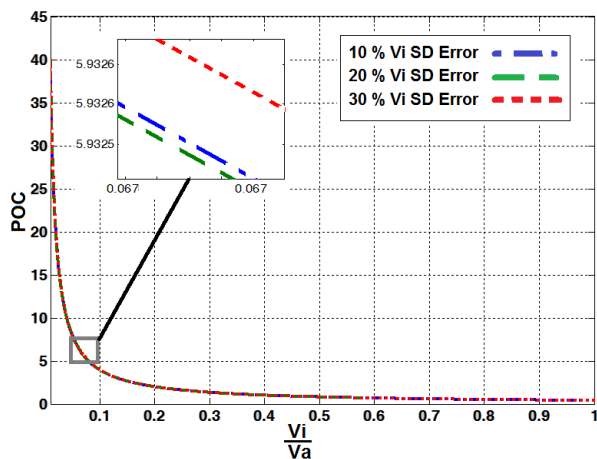
شکل ۹ - زمان بازبینی نظارت محدوده یک بعدی بر اساس سرعت، از ۱ تا ۱۰ فروند

پوشش نسبت به نویز با انحراف معیارهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد سرعت مهاجم مقاوم و دارای حساسیت کم است.



شکل ۱۴ - تعداد پهپاد مورد نیاز بر حسب نسبت سرعت برای یک مرز ۱۰۰ کیلومتری

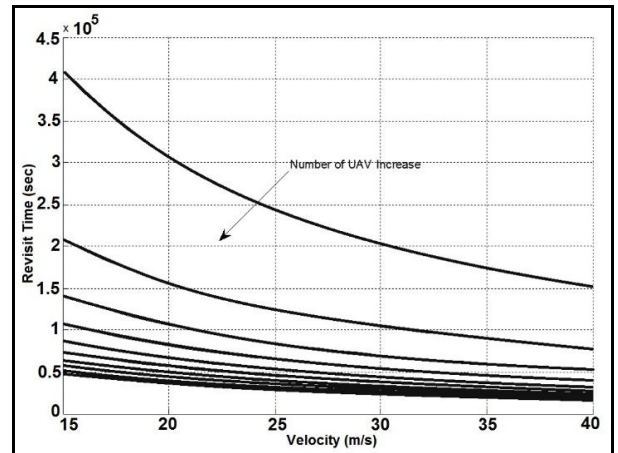
جدول ۱ حساسیت درصد پوشش، زمان گذر و تعداد مورد نیاز پهپاد در حضور انحراف معیارهای ۱۰ و ۲۰ درصد سرعت مهاجم و سرعت پهپاد را نشان می‌دهد. اطلاعات جدول ۱ نشان از حساسیت ناچیز درصد پوشش و تعداد پهپادهای مورد نیاز نسبت به نویز سرعت‌ها و حساسیت بیشتر زمان گذر است.



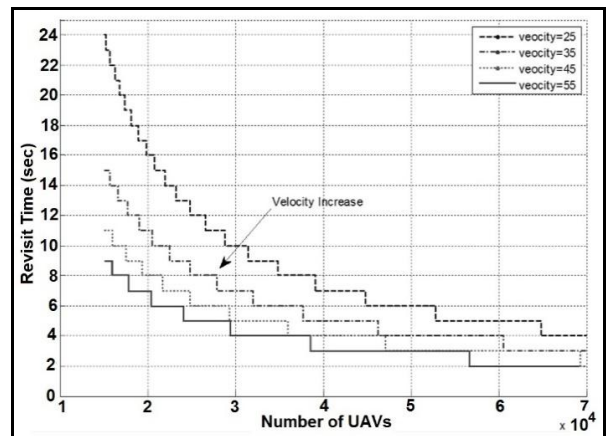
شکل ۱۵ - حساسیت به خطای سرعت مهاجم و تاثیر آن بر درصد پوشش

نتیجه‌گیری و جهت‌دهی آینده کار

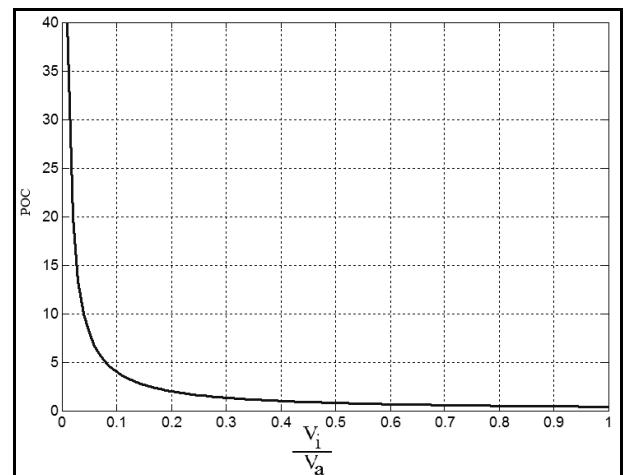
قید زمان بازبینی یک محدوده، وجه تمایز مسائل نظارت مداوم با دیگر مسائل نظیر جستجو و یا پوشش‌دهی می‌باشد. تاثیر افزایش سرعت و یا افزایش تعداد عامل‌ها در کاهش زمان بازبینی در یک محدوده مشخص مقرون به صرفه بوده و افزایش بی‌رویه این پارامتر ضمن پیچیده‌تر کردن مسئله کمکی به کاهش پایدار زمان بازبینی نخواهند کرد.



شکل ۱۱ - زمان بازبینی نظارت دوبعدی بر اساس سرعت، از ۱ تا ۱۰ فروند



شکل ۱۲ - نظارت دوبعدی: تعداد پهپادها با زمان بازبینی و اثر سرعت



شکل ۱۳ - درصد پوشش برای یک مرز ۱۰۰ کیلومتری توسط یک پهپاد

جدول ۱ - حساسیت‌سنجی نسبت به پارامترهای کلیدی سرعت‌ها

تاثیر تعداد پهپاد مورد نیاز	زمان دیدن متخاصم (t)	درصد پوشش (POC)	حساسیت خروجی درصد خطای ورودی به پارامتر
0.112 درصد	2.145 درصد	0.156 درصد	۲۰ درصد خطای ورودی به سرعت مهاجم (Vi)
0.231 درصد	6.182 درصد	0.167 درصد	۳۰ درصد خطای ورودی به سرعت مهاجم (Vi)
0.152 درصد	5.153 درصد	0.161 درصد	۲۰ درصد خطای ورودی به سرعت پهپاد (Va)
0.281 درصد	5.189 درصد	0.175 درصد	۳۰ درصد خطای ورودی به سرعت پهپاد (Va)

پی‌نوشت‌ها

- ۱ Field Of View
- ۲ Bank To Turn
- ۳ Heading Angle
- ۴ Lawn Mower Patrolling
- ۵ Spiral Patrolling
- ۶ Percent of Coverage
- ۷ Inverted V
- ۸ Up Wing
- ۹ Steady State Level Flight
- ۱۰ Roll Angle

منابع و مراجع

- [1] American Institute of Aeronautics and Astronautics, "Worldwide UAV Roundup", Available at <http://www.aiaa.org/images/PDF/WilsonChart.pdf>, 2007.
- [2] Parunak H.V., Brueckner S., and Odell J.J., "Swarming coordination of multiple UAV's for collaborative sensing", In Proceedings of Second AIAA Unmanned Unlimited Systems, Technologies, and Operations Conference, 2003.
- [3] Gaudiano P., Shargel B., Bonabeau E., and Clough B., "Control of UAV swarms: What the bugs can teach us", In Proceedings of the 2nd AIAA Unmanned Unlimited Systems, Technologies, and Operations Aerospace Conference, San Diego, CA pp. 6624-6624, 2003.
- [4] Murray R.M., "Recent research in cooperative control of multivehicle systems", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 129(5), pp. 571-583, 2007.
- [5] Hirsch M.J., Pardalos P.M., Murphey R., and Grundel D., "Advances in Cooperative Control and Optimization", In Proceedings of the 7th International Conference on Cooperative Control and Optimization, Vol. 369, 2008.
- [6] Flint M., Polycarpou M., and Fernandez-Gaucherand E., "Cooperative path-planning for autonomous vehicles using dynamic programming", In Proceedings of the IFAC 15th Triennial World Congress, pp. 1694-1699, 2002.
- [7] Krishna K.M., Hexmoor H., Pasupuleti S., and Llinas J., "Parametric control of multiple unmanned air vehicles over an unknown hostile territory", In Proceedings of the International Conference on

از سوی دیگر با افزایش زمان بازبینی یک نقطه به‌عنوان یک پارامتر پیش‌فرض و یا افزایش سرعت وسیله، تعداد عامل‌های مورد نیاز برای جستجوی یک محدوده مشخص کاهش می‌یابد. الگوهای پیمایشی مبتنی بر کمترین تلاش کنترلی برای مأموریت‌های هوایی مناسب‌تر از سایر الگوها می‌باشد که این مهم وجه تمایز الگوهای رفت‌وبرگشتی با سایر شیوه‌های حرکتی است. در جستجوهای چندعاملی با پهپادهای یکسان و شرایط پروازی برابر، بهترین حالت پوشش‌دهی چندعامله تقسیم طول مؤثر پیمایش به تعداد عامل‌ها است. حالت بحرانی زمان بازبینی، در نقاطی با بیشترین طول عمر ایجاد می‌شود که مهم‌ترین هدف الگوریتم‌های نظارت مداوم کمینه‌سازی زمان بازبینی بیشینه در یک طول مؤثر پیمایش است.

شیوه‌های بیان‌شده در این مقاله برای یک وسیله مشخص و در یک پهنه معین، کمینه بیشترین زمان بازبینی را با به‌کار بردن تعدادی پهپاد ارائه می‌دهد، که از آنها می‌توان در مسائل گشت‌زنی مرزی، نظارت جاده‌ای، نجات ساحلی و ... استفاده کرد. گرچه راهکار ارائه‌شده در این مقاله، سطوح پیوسته را که تمامی نقاط آن از درجه اهمیت یکسانی برخوردار هستند را به‌خوبی با کمترین زمان بازبینی کمینه می‌نماید، لیکن برای سطوح با درجه‌بندی اهمیت (نواحی با ارزش‌های متفاوت) می‌بایست تغییرات در آن لحاظ شود. برای ادامه کار می‌توان سطوحی با تعداد نقاط محدود، ولی با ارزش متفاوت از سایر نقاط پیوسته را با الگوریتم‌های تکاملی در کمترین زمان بازبینی پیمایش نمود. در حالت چندعاملی می‌بایست راهکاری برای تابع هیوریستیک انتخاب بین عوامل و انتخاب بین محدوده‌ها اندیشیده شود تا بیشترین کارایی از کمترین زمان‌های بازبینی اخذ شود.

- Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems, Waltham, MA, USA, pp. 18-21, 2005.
- [8] Parunak HV., "Making swarming happen", In Proceedings of Swarming and Network-Enabled C4ISR, 2003.
- [9] Lawrence D.A., Donahue R.E., Mohseni K., and Han R. "Information energy for sensor-reactive UAV flock control", In AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit, pp. 1-14, 2004.
- [10] Keller J., Thakur D., Likhachev M., Gallier J., and Kumar V., "Coordinated path planning for fixed-wing UAS conducting persistent surveillance missions", IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), pp. 1-6, 2015.
- [11] Bethke B., How J.P., and Vian J., "Group health management of UAV teams with applications to persistent surveillance", In 2008 American Control Conference, pp. 3145-3150, 2008.
- [12] Ure N.K., Chowdhary G., Toksoz T., How J.P., Vavrina M.A., and Vian J., "An automated battery management system to enable persistent missions with multiple aerial vehicles", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 20(1), pp. 275-286, 2015.
- [13] Choset H., "Coverage for robotics—A survey of recent results", Annals of mathematics and artificial intelligence. vol. 31(1-4), pp. 113-126, 2001.
- [14] Nigam N., Bieniawski S., Kroo I., and Vian J., "Control of multiple UAVs for persistent surveillance: algorithm and flight test results", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 20(5), pp. 1236-1251, 2012.
- [15] Nigam N., and Kroo I., "Persistent surveillance using multiple unmanned air vehicles", In Aerospace Conference, IEEE, pp. 1-14, 2008.
- [16] Anderson J.D., "Aircraft performance and design", Boston: WCB/McGraw-Hill; 1999.
- [17] McLean D., "Automatic flight control systems", Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1990.
- [18] Khesali M.A., Dehghan S.M., and Cheheltani S.H., "A new spatiotemporal virtual plane to evaluate the performance of the border coverage scenarios", In Robotics and Mechatronics (ICRoM), Second RSI/ISM International Conference, pp. 191-196, 2014.
- [19] Unmanned Dynamics Aerosim Blockset Official Website: <http://www.udynamics.com/aerosim/>. N.d. Accessed on 27.01.2009. URL: <http://www.udynamics.com/aerosim/>.