

آشکارسازی وقوع تداخل پارازیت در ناوبری پهپاد با استفاده از تعیین مسیر بصری و توصیفگر مسیر HOD

علیرضا آفری^{۱*}، مسعود ورشوساز^۲، محمد سعادت سرشت^۳، برات مجردی^۴

^۱ دانشجوی دکتری فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
arafary@mail.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
varshosazm@kntu.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
msaadat@ut.ac.ir

^۴ استادیار دانشکده عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران
mojaradi@iust.ac.ir

(تاریخ دریافت آبان ۱۳۹۷، تاریخ تصویب دی ۱۳۹۷)

چکیده

آشکارسازی وقوع حملات تداخل پارازیت سامانه رهیاب (سیستم تعیین موقعیت جهانی، GPS)^۱، در ناوبری پهپاد (پرنده هدایت پذیر راه دور) به صورت مستقل از روش‌های پردازش سیگنال رهیاب امکان پذیر است. این کار با استفاده از مقایسه دو مسیر پرواز تعیین شده برای پهپاد از روش تعیین مسیر بصری^۲ و داده‌های رهیاب قابل انجام می‌باشد. برای این منظور از توصیفگر مسیر فاصله بهنجار شده نقاط متوالی مسیر (NDCP)^۳ و توصیفگر مسیر زاویه بین امتدادهای متوالی (CDA)^۴ استفاده می‌شود. این توصیفگرها، مستقل از سیستم مختصات مسیر بوده ولی مستقل از تعداد نقاط مسیر نمی‌باشند. در مقابل توصیفگر مسیر بافت نگاشت^۵ جابجایی‌های جهت‌دار HOD^۵، مستقل از تعداد نقاط مسیر بوده ولی مستقل از سیستم مختصات مسیر نمی‌باشد. در این پژوهش روشی برای ایجاد امکان در استفاده از توصیفگر مسیر HOD در آشکارسازی وقوع حملات تداخل پارازیت ارائه شده است. همچنین عملکرد توصیفگر مسیر HOD در آشکارسازی وقوع حملات تداخل پارازیت در مقابل توصیفگرهای مسیر NDPC و CDA مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که توصیفگر مسیر HOD برتری قابل ملاحظه‌ای در آشکارسازی وقوع تداخل پارازیت در سامانه رهیاب نسبت به دو توصیفگر مسیر NDPC و CDA، به خصوص در خطاهای تعیین موقعیت بزرگتر از ده متر ناشی از تداخل پارازیت دارا بوده و با اطمینان بالاتری می‌توان از این توصیفگر مسیر برای آشکارسازی وقوع حملات تداخل پارازیت سامانه رهیاب استفاده کرد. توانمندی توصیفگر مسیر HOD نسبت به دو توصیفگر دیگر، در آشکارسازی وقوع خطاهای موقعیت بزرگتر از پنج متر نیز، قابل ملاحظه می‌باشد.

واژگان کلیدی: پهپاد، رهیاب، تداخل پارازیت، تعیین مسیر بصری، توصیفگر مسیر، HOD.

* نویسنده رابط

^۱ Global Positioning System

^۲ Visual Odometry

^۳ Normalized Distance of Consecutive Points

^۴ Consecutive Directions Angle

^۵ Histogram

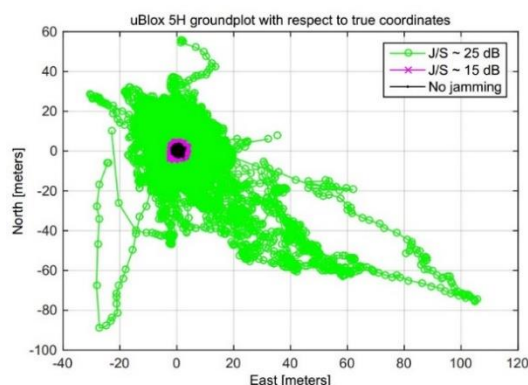
^۶ Histogram of the Oriented Displacements

۱- مقدمه

هدایت، ناوبری و خوداتکائی پهباد^۱ (پرنده هدایت‌پذیر راه دور)، در مسیرهای طولانی و در فضای غیر مسقف متکی به استفاده از سامانه‌های ناوبری جهانی ماهواره‌ای، GNSS^۲، و به طور خاص سامانه رهیاب، GPS^۳، می‌باشند [۱، ۲]. سامانه رهیاب یک سامانه رادیو ناوبری ماهواره‌ای با پوشش جهانی و شبانه‌روزی است. این سامانه دارای مزایایی همچون تعیین موقعیت مطلق و آنی با نرخ حداقل یک هرتز و در هر زمان و با دقتی در حد چند متر می‌باشد [۳]. با وجود مزایای استفاده از گیرنده‌های رهیاب در ناوبری پهبادها، اتکای کامل به این سامانه عاری از اشکال نمی‌باشد [۴]. به علت فاصله زیاد ماهواره‌های رهیاب از سطح زمین، توان دریافتی سیگنال‌های رهیاب در روی سطح زمین بسیار پایین و در حدود 10^{-16} وات می‌باشد و بنابراین، به راحتی و به وسیله تداخل با سایر فرکانسهای رادیویی، تخریب می‌گردند [۵، ۶]. طبق گزارش سال ۲۰۰۱ اداره حمل و نقل آمریکا، سامانه رهیاب مستعد آسیب‌های متعدد غیرعمدی و عمدی تداخل فرکانس رادیویی می‌باشد [۷]. تداخل فرکانس رادیویی به صورت طبیعی توسط عواملی مانند طوفان‌های خورشیدی و میدان‌های مغناطیسی شدید و یا به طور عمدی توسط سیگنال‌های حملات تداخل پرازیت^۴، فریب^۵ و مکینینگ^۶ یا به صورت غیر عمدی توسط امواج رادیو تلویزیونی و سایر سیگنال‌های ناوبری ایجاد می‌شود [۵، ۸]. تداخل فرکانسی یا باعث ایجاد خطا در تعیین موقعیت و زمان توسط گیرنده رهیاب شده و یا از دریافت سیگنال توسط گیرنده و انجام تعیین موقعیت توسط آن جلوگیری می‌کنند [۹].

خطای تعیین موقعیت ایجاد شده در اثر حملات تداخل پرازیت رهیاب دارای توزیعی تقریباً نرمال با انحراف معیار و میانگین یکسان می‌باشد [۹]. شکل (۱) عملکرد یک گیرنده رهیاب تک فرکانسه از نوع "u-blox 5H" را در مقابل سیگنال تداخل پرازیت با توان ۲۵dB نشان می‌دهد. در این تحقیق، میانگین و انحراف معیار

خطای تعیین موقعیت مسطحاتی برای یک گیرنده ثابت در ازاء ماگزیمم توان ۲۵dB برای سیگنال تداخل پرازیت به ترتیب برابر با ۹.۲m و ۸.۷m و نیز ماگزیمم خطا در حدود ۱۲۹m گزارش شده است [۹]. مقدار خطای تعیین موقعیت با رهیاب در اثر حملات تداخل پرازیت در حدود چندین ۱۰km نیز گزارش شده است که با استفاده از روش تلفیق گیرنده رهیاب با حسگر واحد اندازه‌گیری لختی (IMU^۷) و با استفاده از روش فیلتر کالمن [۱۰]، مقدار این خطا به حدود ۳۰۰m کاهش یافته است [۱۱].



شکل ۱- توزیع خطای تعیین موقعیت گیرنده رهیاب ثابت از نوع u-blox 5H در اثر تداخل پرازیت با منبع غیر متحرک [۱۲]

روش‌هایی که در حال حاضر برای تشخیص وقوع تداخل فرکانس رادیویی و اختلال تداخل پرازیت و فریب در عملکرد رهیاب و نیز مقابله با آن مورد استفاده قرار می‌گیرد متکی به پردازش سیگنال‌های دریافتی توسط گیرنده رهیاب می‌باشند [۵، ۱۳-۱۵]. در [۱۱] از روش تلفیق حسگرهای رهیاب، حسگر واحد اندازه‌گیری لختی و حسگر دوربین به وسیله فیلتر کالمن برای مقابله با حملات تداخل پرازیت در حالت غیرمتحرک استفاده شده و نشان داده- شده که این روش به طور موثری می‌تواند میزان خطای تعیین موقعیت با رهیاب در زمان وقوع حملات تداخل پرازیت را کاهش دهد. در این مقاله مقدار خطای تعیین موقعیت با رهیاب در صورت تلفیق با حسگر دوربین در حدود ۱۰۰m گزارش شده است [۱۱].

به طور کلی در حالتی که سیستم برای تشخیص و مقابله با تداخل فرکانسی عمدی تداخل پرازیت یا فریب تنها متکی به سیگنال‌های ورودی به گیرنده رهیاب باشد امکان پنهان‌کاری در اعمال این تداخل‌های فرکانسی

^۱ UAV (Unmanned Aerial Vehicle)

^۲ Global Navigation Satellite Systems

^۳ Global Positioning System

^۴ Jamming

^۵ Spoofing

^۶ Meaconing

^۷ Inertial Measurement Unit

عمدی با استفاده از روش‌های تکامل یافته‌تر پردازش سیگنال وجود دارد [۱۳، ۱۶، ۱۷]. همچنین سامانه‌های اعمال تداخل پارازیت روز به روز قوی‌تر و پنهان‌تر شده و مقابله با آنها نیز سخت‌تر می‌گردد. بنابراین، برای ارزیابی عملکرد سامانه تعیین موقعیت رهیاب پهباد، وجود روشی مستقل از ارتباطات بیرونی و مستقل از سیگنال‌های ورودی به گیرنده رهیاب ضروری می‌باشد [۵].

در روش ارائه شده توسط نویسندگان همین مقاله از یک روش تصویر مبنا مبتنی بر تعیین مسیر بصری (VO)^۱ و استفاده از توصیفگرهای مسیر (TD)^۲ جهت آشکارسازی وقوع تداخل پارازیت در ناوبری پهباد استفاده شده است [۱۸]. در این روش دو توصیفگر مسیر فاصله بهنجار شده نقاط متوالی مسیر (NDCP)^۳ و زاویه بین امتدادهای متوالی (CDA)^۴ برای استفاده در تشخیص وقوع تداخل پارازیت معرفی و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش ارائه شده مبتنی بر استخراج مسیر پرواز از روی تصاویر پهباد (اخذ شده از مسیر پرواز) به روش VO (مسیر دوربین) و مسیر پرواز از روی داده‌های رهیاب (مسیر رهیاب) و مقایسه این دو مسیر با استفاده از توصیفگرهای مسیر معرفی شده می‌باشد. در [۱۸] نشان داده شده که با استفاده از روش VO و استفاده از توصیفگرهای مسیر می‌توان وجود حملات تداخل پارازیت رهیاب در محیط را آشکارسازی کرد. این توصیفگرها مستقل از سیستم مختصات مسیر بوده ولی مستقل از تعداد نقاط مسیر نیستند. بنابراین، هر دو مسیری که توسط این توصیفگرها با هم مقایسه می‌شوند بایستی دارای تعداد نقاط یکسانی باشند. در عمل تعداد نقاط مسیر پرواز پهباد بدست آمده از رهیاب با تعداد نقاط مسیر بدست آمده از روش VO ممکن است به علت عدم تعیین موقعیت توسط رهیاب در اثر تداخل پارازیت با هم برابر نباشند. در این صورت یا بایستی تنها از نقاط مشترک در دو مسیر برای تولید توصیفگر مسیر و نیز مقایسه مسیرها استفاده کرد و یا باید از توصیفگر مسیری مانند بافت نگاشت^۵ جایجائی‌های جهت‌دار (HOD)^۶، که مستقل از تعداد نقاط مسیر

می‌باشد برای مقایسه مسیرها استفاده شود. البته استفاده از توصیفگر مسیر HOD به صورت ابتدایی در مقایسه مسیر دوربین و مسیر رهیاب امکان‌پذیر نیست. این توصیفگر مسیر وابسته به سیستم مختصات مسیر می‌باشد و مسیرهای مورد مقایسه با این توصیفگر باید دارای سیستم مختصات‌های یکسان باشند. با توجه به این که دو مسیر دوربین و رهیاب، تعیین شده برای پهباد، دارای سیستم مختصات‌های متفاوتی می‌باشند استفاده از توصیفگر HOD برای مقایسه این دو مسیر امکان‌پذیر نبوده و نیازمند پایداری آن نسبت به سیستم مختصات مسیر می‌باشد. در این مقاله با استفاده از یک راه کار سعی شده تا امکان استفاده از توصیفگر HOD در مقایسه دو مسیر رهیاب و مسیر دوربین را به منظور آشکارسازی وقوع تداخل پارازیت رهیاب در ناوبری پهباد فراهم کرد.

در ادامه ابتدا مروری مختصر بر روش ارائه شده در [۱۸] برای آشکارسازی وقوع تداخل پارازیت خواهیم داشت. سپس توصیفگرهای NDPC و CDA و HOD معرفی شده و راهکاری برای پایداری توصیفگر HOD نسبت به سیستم مختصات مسیر ارائه خواهد شد. در ادامه نیز ارزیابی‌ها و نتایج بدست آمده در استفاده از HOD و مقایسه آن با دو توصیفگر NDPC و CDA ارائه خواهند شد و در نهایت بخش نتیجه‌گیری و منابع آورده می‌شوند.

۲- روش‌های تصویر مبنا در تعیین موقعیت و ناوبری پهباد

تعیین موقعیت پهباد با استفاده از روش‌های تصویر-مبنا هم به صورت مطلق و هم به صورت نسبی قابل انجام می‌باشد. وجود هر دو روش تعیین موقعیت مطلق و نسبی در ایجاد یک سامانه ناوبری کامل برای کنترل پرواز پهباد یا هواپیما لازم می‌باشد [۱۹]. البته با توجه به شرایط پرواز پهباد استفاده از این روش‌ها در اجرا با چالش‌های متعددی مواجه می‌باشند که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

۲-۱- تعیین موقعیت مطلق پهباد با روش‌های تصویرمبنا

برای تعیین موقعیت مطلق پهباد با استفاده از روش‌های تصویرمبنا، علاوه بر تصاویر پهباد بسته به روش مورد استفاده برای تعیین موقعیت، نیاز به اطلاعات جانبی

^۱ Visual Odometry

^۲ Trajectory Descriptor

^۳ Normalized Distance of Consecutive Points

^۴ Consecutive Directions Angle

^۵ Histogram

^۶ Histogram of the Oriented Displacements

از قبیل مدل ارتفاعی زمین [۲۰-۲۴]، تصاویر هوایی یا ماهواره‌ای آرشیو و زمین مرجع شده [۲۰، ۲۵-۳۲]، اطلاعات مکانی برداری در سیستم‌های اطلاعات مکانی از منطقه پرواز [۲۸، ۳۳، ۳۴]، و یا لیست ستارگان قابل رویت در منطقه پرواز می‌باشد [۲۰، ۲۸]. بسته به نوع اطلاعات جانبی مورد استفاده روش‌های تصویرمبنا تعیین موقعیت مطلق به چهار دسته قابل تقسیم هستند [۳۵]:

۱- روش استفاده از اطلاعات ارتفاعی

۲- روش تناظریابی بین تصاویر پهپاد و تصاویر زمین مرجع موجود

۳- روش تناظریابی بین اطلاعات برداری استخراج شده از تصاویر با اطلاعات نقشه‌ای موجود در سیستم‌های اطلاعات مکانی

۴- روش تعیین موقعیت سماوی و استفاده از موقعیت‌یاب ستاره‌ای^۱

در هر کدام از این روش‌ها وجود اطلاعات مکانی آرشیو شده به صورت یک پایگاه داده اطلاعاتی در روی رایانه مستقر بر روی پهپاد ضروری می‌باشد. همچنین، این روش‌ها تا حدودی مستقل از رهیاب می‌باشند و برای انجام سریع محاسبات تناظریابی و محدود نمودن فضای جستجو در اطلاعات و تصاویر آرشیو، معلوم بودن موقعیت تقریبی پهپاد در هنگام تصویربرداری و یا اندازه‌گیری‌های ارتفاعی ضروری می‌باشد که این اطلاعات از آخرین داده‌های رهیاب و یا داده‌های سامانه ناوبری لختی استخراج می‌گردد [۳۰]. در صورتی که این موقعیت تقریبی معلوم نباشد به دلیل وسیع بودن بازه جستجو در اطلاعات آرشیو و زمان‌بر بودن آن، روش‌های فوق اغلب به نتیجه نخواهند رسید. با توجه به حرکت مداوم و سرعت پرواز پهپاد، موقعیت آن در هر لحظه تغییر می‌کند و این موضوع باعث تغییر در موقعیت و وضعیت دوربین و نیز تغییر در شرایط تصویربرداری خواهد شد. بنابراین، روش‌های تصویرمبنا در تعیین موقعیت مطلق پهپاد بایستی به صورت کاملاً اتوماتیک و بدون دخالت انسانی (در هم‌مرجع نمودن تصاویر پهپاد به اطلاعات آرشیو) پیاده‌سازی شوند. همچنین این محاسبات بایستی تا حد ممکن به محاسبات برخط^۲ نزدیک بوده و تغییرات ایجاد

شده در شرایط تصویربرداری و مقیاس تصاویر در آنها تاثیر نداشته باشد و یا تاثیرات آنها خنثی شوند. این نیازها استفاده از روش‌های تعیین موقعیت مطلق با استفاده از تصاویر پهپاد در ارزیابی صحت عملکرد رهیاب پهپاد را تا حد زیادی محدود خواهند کرد.

۲-۲- تعیین موقعیت نسبی پهپاد با روش‌های تصویرمبنا

ناوبری با استفاده از تصاویر در حالت نسبی به دو روش VO و روش VSLAM^۳ قابل اجرا می‌باشد [۳۶]. اجرای این روش‌ها در اکثر محیط‌ها و به طور تقریباً مستقل از اطلاعات جانبی امکان‌پذیر می‌باشد. در روش VSLAM علاوه بر تعیین بردار جابجایی بین تصاویر متوالی، نقشه مسیر طی شده نیز تهیه می‌شود و بنابراین، برای اجرا نیاز به سخت‌افزار و امکانات محاسباتی بیشتری دارد و معمولاً به صورت برخط اجرا نمی‌شود [۳۶]. در روش VO، تنها بردار جابجایی نسبی بین تصاویر متوالی محاسبه می‌شود و نقشه مسیر تهیه و ذخیره‌سازی نمی‌گردد و برای اجرا نیاز به امکانات محاسباتی کمتری داشته و به صورت برخط قابل اجرا می‌باشد [۳۶]. با این حال، افزایش تدریجی خطای تعیین موقعیت و ایجاد انحراف^۴ و نیاز به مقداره‌ی اولیه سیستم مختصات و نیز مقیاس‌گذاری بردار جابجایی نسبی از مشکلات عمده این روش می‌باشد که برای رفع این مشکل استفاده از اطلاعات حسگر رهیاب و واحد اندازه‌گیری لختی پیشنهاد شده است [۳۶]. روش VSLAM برای کنترل خطای تدریجی از ایجاد یک یا چندین مسیر حلقوی بسته، استفاده می‌کند که در ناوبری پهپاد ایجاد مسیر حلقوی بسته در اکثر مواقع امکان‌پذیر نخواهد بود [۳۶]. در هر دو روش VO و VSLAM از سرشکنی دسته پرتو در پنجره‌های^۵ چندتایی از تصاویر اخذ شده برای کنترل خطای انحراف استفاده می‌شود [۳۶]. با توجه به ماهیت تدریجی و افزایشی بودن خطای تعیین موقعیت در روش VO، این روش با گذشت زمان و دور شدن از مبدا به سرعت کارآیی خود را از دست داده و برای ادامه نیاز به مقدار دهی اولیه مجدد موقعیت مطلق دارد [۳۶].

^۳ Visual Simultaneous Localization and Mapping

^۴ Drift

^۵ Windowed Bundle Adjustment

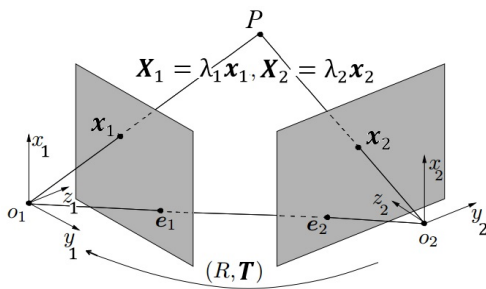
^۱ Star Tracker

^۲ Online

نسبی بر مشکلات آن نیز فائق آمده است. در این روش نیازی به موقعیت مطلق برای ارزیابی صحت عملکرد رهیاب نبوده و در نتیجه نیازی هم به مقدار دهی اولیه سیستم مختصات در روش تعیین موقعیت نسبی ندارد.

۲-۱- تعیین مسیر دوربین به روش VO

با استفاده از دنباله تصاویر تک فریم یا تصاویر ویدئویی، تعیین مسیر نسبی حرکت دوربین نسبت به عوارض محیط امکان پذیر می باشد که به این روش در حوزه ماشین بینایی تعیین مسیر بصری، VO، گفته می شود [۳۹، ۴۰]. روش VO یک فرآیند تدریجی است که در آن مسیر نسبی حرکت دوربین با استفاده از برآورد پارامترهای جابجایی نسبی متحرک، $(R, \vec{T})$ ، ماتریس دوران نسبی و $\vec{T}$ بردار جابجایی نسبی بین دو فریم از یک فریم به فریم دیگر تقریب زده می شود (شکل ۲) [۴۱، ۴۲].



شکل ۲- محاسبه پارامترهای توجیه نسبی $(R, \vec{T})$ بین دو تصویر استریوی متوالی از روی نقاط متناظر

در VO، موقعیت های مراکز دوربین در تصاویر متوالی همگی باید در یک سیستم مختصات بیان شوند. این کار مستلزم مقداردهی اولیه سیستم می باشد. در عمل، سیستم مختصات دوربین در اولین تصویر به عنوان سیستم مختصات نهایی فرض می شود و پس از مقداردهی اولیه مقیاس طولی در اولین مدل سه بعدی از تصاویر متوالی اخذ شده، پارامترهای توجیه نسبی $(R_{ij}, \vec{T}_{ij})$ محاسبه شده بین سایر زوج تصاویر متوالی با استفاده از معادلات (۱) به سیستم مختصات دوربین در اولین تصویر انتقال می یابند.

$$\begin{aligned} \vec{P}_1 &= \vec{0} \\ \vec{P}_r &= \vec{T}_{r1} \\ \vec{P}_r &= \vec{P}_r + s_{r1} R_{r1} \vec{T}_{r1} \\ \vec{P}_r &= \vec{P}_r + s_{r2} R_{r2} \vec{T}_{r2} \\ &\vdots \\ \vec{P}_k &= \vec{P}_{k-1} + s_{(k-1)(k-2)} R_{(k-1)(k-2)} \vec{T}_{(k-1)(k-2)} \end{aligned} \quad (1)$$

در [۳۷] از تلفیق حسگر دوربین با حسگرهای رهیاب و واحد اندازه گیری لختی و Lidar بوسیله فیلتر کالمن برای ایجاد یک سامانه نقشه بردار سیار پهبادی (UAV-MMS)^۱ استفاده شده است. در این مقاله از مسیر بصری استخراج شده از تصاویر به روش VO برای بهبود تعیین موقعیت سامانه تلفیقی رهیاب با واحد اندازه گیری لختی و نیز هدایت سیستم در مواقع بلوکه شدن سیگنال رهیاب استفاده شده است. در [۳۸] نیز از روش VO با دوربین سه بعدی برای ناوبری وسایل نقلیه زمینی در مواقع قطع سیگنال رهیاب در یک چارچوب تلفیق حسگرها با استفاده از فیلتر کالمن استفاده شده که خطای انحراف حاصله در این پروژه در یک مسیر ۴۱۰۳ متری در حدود ۴۶.۵ متر برآورد شده است. در مقابل روش های تعیین موقعیت نسبی بصری به خصوص روش VO با استفاده از تصاویر پهباد با توجه به همزمانی تصاویر اخذ شده و دارا بودن شرایط یکسان در تصویربرداری، قابل پیاده سازی به صورت محاسبات برخط می باشند. ایراد وارده بر روش های تعیین موقعیت نسبی در این است که برای امکان استفاده از موقعیت های بدست آمده از این روش در ارزیابی صحت عملکرد رهیاب نیاز به مقداردهی اولیه پارامترهای سیستم مختصات می باشد. در صورت مقداردهی اولیه سیستم مختصات از لحاظ مختصات مبداء، توجیه محورها و مقیاس طولی می توان از این روش ها در ارزیابی تعیین موقعیت مطلق پهباد توسط رهیاب استفاده کرد. ولی با توجه به این که پهباد به طور مداوم در حال حرکت می باشد مقداردهی اولیه قابل انجام نخواهد بود و حتی در صورت مقداردهی اولیه در ابتدای پرواز در صورتی نیاز به مقداردهی اولیه مجدد (به هر دلیلی) این کار در حین پرواز پهباد به راحتی ممکن نخواهد بود. از طرفی در روش تعیین موقعیت نسبی، خطای تجمعی تعیین موقعیت و انحراف مختصاتی ایجاد شده در مسیرهای طولانی، دقت این روش را به سرعت پایین می آورد. بنابراین، با توجه به این مطالب و مشکلات موجود در استفاده از هر دو شیوه تعیین موقعیت مطلق و نسبی با استفاده از تصاویر پهباد، در [۱۸] روش اصلاح شده ای مبتنی بر روش VO برای ارزیابی عملکرد رهیاب پهباد ارائه شده است که قابل پیاده سازی به صورت محاسبات برخط بوده و در عین استفاده از تعیین موقعیت

^۱ UAV Mobile Mapping System

در این معادلات: $\vec{P}_k$ بردار مکان مرکز دوربین k ام در سیستم مختصات سه بعدی دوربین اول و $\vec{T}_{(k)(k-1)}$ بردار مکان مرکز همین دوربین در سیستم مختصات دوربین $(k-1)$ ام و $S_{(k-1)(k-2)}$ ضریب مقیاس تبدیل فاصله از مدل استریوی $(k-1)$ به مدل استریوی $(k-2)$ می باشد.

مجموعه موقعیت های $\{\vec{P}_1, \dots, \vec{P}_N\}$ مسیر نسبی طی شده توسط دوربین در سیستم مختصات سه بعدی دوربین اول را بیان می کند.

۳- روش تصویر-مبنا در تشخیص وقوع تداخل پارازیت

در [۲۰] برای آشکارسازی وقوع حملات تداخل پارازیت روشی تصویرمبنا مبتنی بر تعیین مسیر بصری VO و استفاده از توصیفگر مسیر ارائه شد. روش ارائه شده روشی مستقل از پردازش سیگنال های رهیاب بوده و متکی به تصاویر اخذ شده توسط دوربین می باشد و می تواند به صورت یک روش مکمل در کنار سایر روش های آشکارسازی وقوع حملات تداخل پارازیت در ناوبری پهپادها مورد استفاده قرار گیرد.

با استفاده از تصاویر اخذ شده توسط دوربین پهپاد و به روش VO و از طریق انجام توجیه نسبی بین تصاویر متوالی می توان مسیر نسبی طی شده توسط پهپاد را تعیین کرد [۴۳]. با توجه به غیرفعال بودن حسگر دوربین، عملکرد آن و نیز تصاویر اخذ شده از مسیر پرواز تحت تاثیر سیگنال های خارجی نخواهند بود. همچنین زمین و عوارض ثابت موجود در مسیر پرواز پهپاد نیز قابل دستکاری نمی باشند. بنابراین، شکل و ویژگی های مسیر نسبی بدست آمده از روش VO با شکل و ویژگی های مسیر واقعی پرواز بدست آمده از رهیاب، در صورت عملکرد صحیح آن، انطباق بسیار نزدیکی خواهد داشت. همچنین در صورتی که عملکرد گیرنده رهیاب به علت تداخل فرکانسی ناشی از حملات تداخل پارازیت و یا دستکاری عمدی در مشخصات سیگنال های ارسالی توسط ماهواره های رهیاب و یا هر دلیل دیگر دچار اختلال شود مسیر رهیاب با مسیر واقعی طی شده انطباق نخواهد داشت. در این صورت با استفاده از مقایسه بین مسیر

برآورد شده از روی داده های تصویری برای پرواز پهپاد به روش VO (مسیر دوربین) و مسیر پهپاد از روی داده های رهیاب (مسیر رهیاب) می توان وجود اختلال در عملکرد رهیاب را آشکارسازی کرد.

۳-۱- توصیفگرهای مسیر و مقایسه آنها

مسیر مربوط به یک متحرک، T ، معادله (۲)، به وسیله دنباله ای از زوج مرتبه های $(t_i, \vec{P}_i)$ و $i = 1:N$ نشان داده می شود که در آن $\vec{P}_i$ موقعیت متحرک در زمان t_i بوده و طول مسیر برابر با N می باشد [۴۴].

$$T = \{(t_1, \vec{P}_1), \dots, (t_i, \vec{P}_i), \dots, (t_N, \vec{P}_N)\} \quad , \quad i = 1:N \quad (2)$$

توصیفگر مسیر، برداری است که به صورت تابعی از موقعیت نقاط مسیر بیان می شود (معادله ۳) و برای مقایسه دو مسیر مختلف مورد استفاده قرار می گیرد.

$$\vec{TD} = f(T) \quad (3)$$

مقایسه بردارهای توصیفگر مسیر دوربین (TDc) و توصیفگر مسیر رهیاب (TDg) با استفاده از زاویه α بین آنها (معادله ۴) و برحسب شاخص تشابه کسینوسی (CSI)^۱ (معادله ۵) انجام می شود [۴۵].

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\langle \vec{TD}_c, \vec{TD}_g \rangle}{\|\vec{TD}_c\| \|\vec{TD}_g\|} \right) \quad (4)$$

$$CSI = (1 - \frac{\alpha}{\pi}) \times 100 \quad (5)$$

مقدار شاخص CSI تعیین شده بین دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب بر اساس توصیفگرهای آنها، شاخصی از وقوع یا عدم وقوع خطای نظاممند^۲ در مسیر رهیاب محسوب می گردد. در صورتی که حملات تداخل پارازیت رخ نداده باشد مقدار شاخص CSI بین دو مسیر رهیاب و مسیر دوربین نزدیک به ۱۰۰٪ خواهد بود. در صورت وقوع حملات تداخل پارازیت مقدار شاخص CSI افت زیادتری نسبت به مقدار ایده آل آن یعنی ۱۰۰٪ خواهد داشت. مقدار کاهش شاخص CSI از ۱۰۰٪، به صورت معادله (۶) و با شاخص DCSI نشان داده می شود. این شاخص رابطه

^۱ Cosine Similarity Index

^۲ Systematic Error

ناوبری پهپاد فراهم کرد. در ادامه سه توصیفگر مسیر فوق معرفی و نحوه ایجاد آنها بیان می‌گردد.

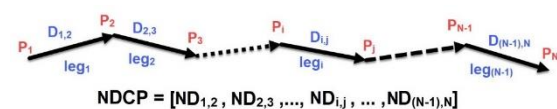
۳-۱-۱- توصیفگر مسیر فاصله بهنجار شده بین نقاط متوالی، NDCP

فاصله D_{ij} بین نقاط متوالی i و j از یک مسیر (معادله ۷) از جمله کمیت‌هایی است که اطلاعات مفیدی درباره حرکت یک متحرک ارائه می‌کند و کمیتی است که مقدار آن مستقل از جهت حرکت متحرک می‌باشد. همچنین فاصله بین نقاط متوالی در یک مسیر مستقل از موقعیت مبدأ و توجیه محورهای سیستم مختصات مسیر بوده ولی وابسته به مقیاس طولی در سیستم مختصات می‌باشد. در صورت تقسیم فاصله بین نقاط متوالی به طول کل مسیر، مقدار بهنجار شده این کمیت نیز مستقل از مقیاس طولی خواهد شد. بردار توصیفگر فاصله بهنجار شده بین نقاط متوالی، NDCP، برداری است که از فواصل بهنجار شده ND_{ij} (معادله ۸) بین نقاط متوالی مسیر تشکیل می‌گردد (معادله ۹) [۱۸]. تاثیر هر عاملی مانند خطاهای نظاممند که باعث ایجاد تغییر در فاصله بین نقاط متوالی در یک مسیر شود، در بردار توصیفگر NDCP دیده خواهد شد. برای هر مسیر N نقطه‌ای، بردار توصیفگر NDCP، یک بردار توصیفگر $(N-1)$ نقطه‌ای خواهد بود. شکل (۳)، مفهوم بردار توصیفگر مسیر NDCP را نشان می‌دهد.

$$D_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (7)$$

$$ND_{ij} = \frac{D_{ij}}{\sum_{i=1}^{N-1} D_{ij}} \quad (8)$$

$$NDCP = \{ND_{1,2}, ND_{2,3}, \dots, ND_{(N-1),N}\} \quad (9)$$



شکل ۳- بردار توصیفگر مسیر NDCP برای یک مسیر N نقطه‌ای

۳-۱-۲- توصیفگر زاویه بین امتدادهای متوالی، CDA

زاویه θ_j بین دو امتداد متوالی در هر نقطه j - ام از مسیر (شکل ۳) قابل محاسبه از مختصات نقاط تشکیل دهنده آن زاویه می‌باشد. این کمیت مستقل از سیستم

مستقیمی با وقوع خطای نظاممند در تعیین موقعیت پهپاد توسط رهیاب در اثر وقوع حملات تداخل پارازیت دارد.

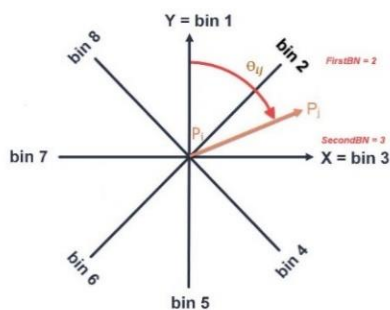
$$DCSI = 100 - CSI \quad (6)$$

در صورت وقوع حملات تداخل پارازیت مقدار شاخص DCSI افزایش یافته و در صورتی که تداخل پارازیت رخ نداده باشد و تعیین موقعیت رهیاب به درستی انجام شود مقدار شاخص DCSI نزدیک به صفر خواهد بود.

توصیفگرهای مسیر مورد استفاده برای مقایسه مسیر دوربین و مسیر رهیاب با توجه به متفاوت بودن سیستم مختصات مورد استفاده برای بیان موقعیت نقاط آنها، بایستی مستقل از سیستم مختصات باشند. در [۱۸] با فرض یکسان بودن تعداد نقاط دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب، برای مقایسه مسیر دوربین با مسیر رهیاب، دو توصیفگر مسیر فاصله بهنجار شده بین نقاط متوالی، NDCP، و زاویه بین امتدادهای متوالی، CDA، تعریف و از مقایسه آنها برای ارزیابی صحت عملکرد رهیاب پهپاد و آشکارسازی وجود حملات تداخل پارازیت استفاده شده است. هر دوی این توصیفگرهای مسیر، مستقل از سیستم مختصات مسیر می‌باشند ولی مستقل از تعداد نقاط مسیر نیستند. در عمل تعداد نقاط مسیر پرواز پهپاد بدست آمده از رهیاب با تعداد نقاط مسیر پهپاد بدست آمده از روش VO، ممکن است به علت عدم تعیین موقعیت توسط رهیاب و در اثر تداخل پارازیت با هم برابر نباشند. در این صورت یا بایستی تنها از نقاط مشترک در دو مسیر برای تولید توصیفگر مسیر و مقایسه مسیرها استفاده کرد و یا باید از توصیفگر مسیر دیگری مانند بافت نگاشت جابجاییهای جهت دار، HOD، [۴۶] که مستقل از تعداد نقاط مسیر می‌باشد برای مقایسه مسیرها استفاده شود. البته استفاده از توصیفگر مسیر HOD در مقایسه دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب به صورت ابتدایی امکان پذیر نیست. توصیفگر مسیر HOD وابسته به سیستم مختصات مسیر بوده و با توجه به این که دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب دارای سیستم مختصات‌های متفاوتی می‌باشند استفاده از این توصیفگر برای مقایسه این دو مسیر ممکن نبوده و نیازمند پایداری آن نسبت به سیستم مختصات می‌باشد. در این مقاله با استفاده از یک راه کار سعی شده تا امکان استفاده از توصیفگر HOD در مقایسه دو مسیر رهیاب و مسیر دوربین را به منظور آشکارسازی وقوع تداخل پارازیت رهیاب در

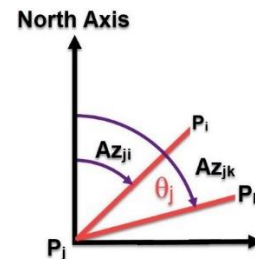
می‌باشد و در صورت نرمال کردن آن به طول واحد، نسبت به تغییرات مقیاس نیز پایدار خواهد بود. ولی این توصیفگر مسیر وابسته به توجیه محورهای سیستم مختصات مسیر بوده و بنابراین، در حالت کلی امکان مقایسه دو مسیر با سیستم مختصات‌های متفاوت با استفاده از توصیفگر مسیر HOD وجود ندارد. در اینجا نیز با توجه به اینکه دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب دارای سیستم مختصات‌های متفاوتی می‌باشند به صورت ابتدایی امکان مقایسه آنها با استفاده از توصیفگر مسیر HOD وجود ندارد. در اینجا برای حل این مشکل، راه‌کاری ارائه شده که جزئیات آن در بخش ۲-۳ آورده شده است. حملات تداخل پارازیت باعث ایجاد خطا در تعیین موقعیت شده و در نتیجه فاصله بین نقاط و زوایای بین امتدادهای نقاط که از این موقعیت‌های خطا دار محاسبه شده‌اند با متناظرشان که از موقعیت‌های مطلق یا نسبی بدون خطا بدست آمده‌اند متفاوت خواهند بود و این تفاوت‌ها که ناشی از خطا می‌باشند در توصیفگر HOD مسیر رهیاب منعکس خواهند شد.

برای ایجاد توصیفگر HOD ابتدا فاصله زوایای بین گام‌های بافت نگاشت، BI ، انتخاب می‌شود. مقدار BI نشان دهنده قدرت تفکیک زوایای بافت نگاشت HOD است. در صورتی که تعداد گام‌های بافت نگاشت HOD برابر با BN باشد آنگاه مقدار BI از معادله (۱۳) محاسبه خواهد شد. به عنوان مثال اگر مقدار BN در بافت نگاشت برابر با هشت باشد آنگاه مقدار $BI = 45^\circ$ خواهد بود و گام‌های بافت نگاشت از ابتدا تا انتها به ترتیب بیانگر زوایای $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ و $0^\circ \equiv 360^\circ$ خواهند بود (شکل ۵).



شکل ۵- امتدادهای معادل برای گام‌های بافت نگاشت HOD با مقدار $BI = 45^\circ$ و $BN = 8$

مختصات مسیر، جهت حرکت و مسافت طی شده توسط متحرک و نیز مقیاس طول می‌باشد. مقدار زاویه θ_j بین دو امتداد متوالی ij و jk در هر نقطه j -ام از مسیر، از تفاضل زاویه سمت^۱ امتدادهای تشکیل دهنده آن زاویه (معادله ۱۰) و بر حسب مختصات سه نقطه تشکیل دهنده آن زاویه قابل محاسبه می‌باشد (معادله ۱۱). بردار متشکل از زوایای نقاط یک مسیر می‌تواند به عنوان توصیفگر آن مسیر مورد استفاده قرار گیرد (معادله ۱۲).



شکل ۴- رابطه زاویه θ_j با زاویه سمت امتدادهای زاویه j

توصیفگر CDA (معادله ۱۲)، برای یک مسیر N نقطه‌ای، برداری $(N - 2)$ بعدی متشکل از مقادیر زاویه θ_j در هر نقطه j از مسیر می‌باشد [۱۸].

$$Az_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{(x_j - x_i)}{(y_j - y_i)} \right) \quad (10)$$

$$\theta_j = Az_{jk} - Az_{ji} \quad (11)$$

$$CDA = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N-1}\} \quad (12)$$

۳-۱-۳- توصیفگر مسیر HOD

توصیفگر مسیر HOD میزان حرکت متحرک در راستاهای مختلف را به صورت بافت نگاشتی از مقادیر جابجایی در امتدادهای بین صفر تا 360° نشان می‌دهد. مقدار متناظر با هر گام از این بافت نگاشت، میزان حرکت متحرک در آن جهت را نشان می‌دهد. در [۴۶] از توصیفگر مسیر HOD برای اندازه‌گیری شباهت بین مسیرهای طی شده توسط نقاط اتصال استخوان‌بندی بدن انسان در ابر نقطه بدست آمده از حسگر Kinect، جهت تشخیص افعال^۳ افراد استفاده شده است. این توصیفگر مسیر مستقل از سرعت متحرک و تعداد نقاط مسیر

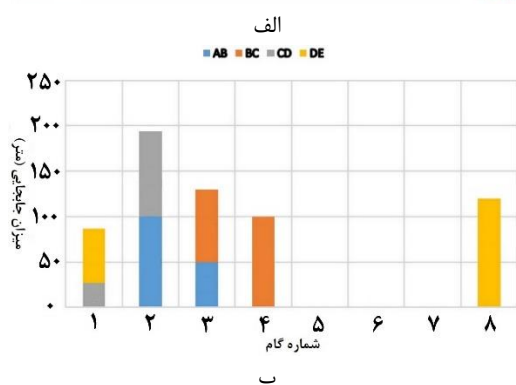
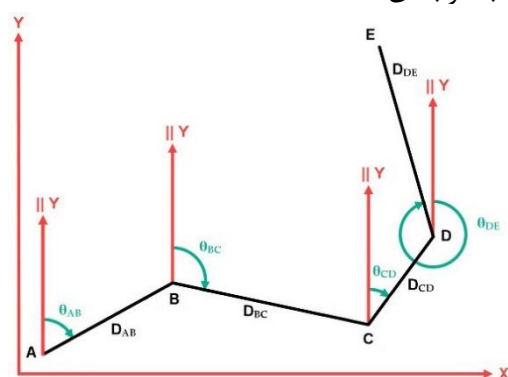
^۱ Azimuth

^۲ Bin

^۳ Action Recognition

۴ Bin Interval

مسیر دوربین و مسیر رهیاب دارای سیستم مختصات‌های متفاوتی می‌باشند. بنابراین، امکان مقایسه آنها با استفاده از توصیفگر HOD وجود نخواهد داشت. در مساله ما مسیر رهیاب پهباد در سیستم مختصات جهانی WGS84^۲ و مسیر دوربین در سیستم مختصات مدل سه بعدی مربوط به اولین زوج پوشش‌دار از تصاویر پهباد قرار دارند. این دو سیستم مختصات دارای مقیاس، مبدا و توجیه‌های متفاوت برای محورهای مختصات می‌باشند. در این مقاله برای فراهم نمودن امکان مقایسه توصیفگرهای تولید شده برای این دو مسیر از انتقال سیستم مختصات مسیر رهیاب به سیستم مختصات دوربین با استفاده از یک تبدیل متشابه دو بعدی استفاده شد (معادله ۱۷).



شکل ۶-الف) یک مسیر چهار نقطه‌ای ABCD.

ب) بافت نگاشت HOD متناظر با مسیر ABCD. میزان حرکت متحرک در جهت‌های مختلف و در هر ضلع با رنگ‌ها نشان داده شده است.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{Camera}} = S_G \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{GPS}} \quad (17)$$

$$S_G = \begin{bmatrix} a & b & c \\ -b & a & d \end{bmatrix}$$

در معادله (۱۷)، S_G ماتریس ضرایب تبدیل متشابه دو بعدی است که مولفه‌های آن بر اساس مختصات‌های یک سری نقاط متناظر در هر دو مسیر رهیاب و مسیر دوربین

پس از تعیین BI ، فاصله D_{ij} بین نقاط متوالی i و j از مسیر با استفاده از معادله (۷) و زاویه سمت بین امتداد ij با امتداد محور Y سیستم مختصات، AZ_{ij} ، با استفاده از معادله (۱۰) محاسبه شده و با استفاده از معادلات (۱۴) و (۱۵) نزدیکترین گام‌های بافت نگاشت متناظر با زاویه سمت AZ_{ij} تعیین می‌گردند. سپس مقدار هر فاصله D_{ij} با استفاده از معادله (۱۶)، بین دو گام از بافت نگاشت و متناظر با زاویه سمت AZ_{ij} (که در مرحله قبل تعیین شدند) و به نسبت فاصله زاویه سمت AZ_{ij} با زوایای متناظر با این گام‌ها در بافت نگاشت تقسیم می‌گردد. این کار برای تمام فواصل بین نقاط متوالی مسیر انجام شده و با جمع‌بندی سهم هر گام از تمام امتدادهای مسیر در نهایت بافت نگاشت HOD برای مسیر مورد نظر تشکیل می‌گردد. شکل (۶-الف) و (۶-ب) مثالی از یک مسیر پنج نقطه‌ای و بافت نگاشت HOD متناظر با آن را نشان می‌دهد.

$$BI = \frac{360^\circ}{BN} \quad (13)$$

$$FirstBN = \left\lfloor \frac{AZ_{ij}}{BI} \right\rfloor + 1 \quad (14)$$

$$SecondBN = \left\lceil \frac{AZ_{ij}}{BI} \right\rceil + 1, \quad (15)$$

$$\text{if } \left\lfloor \frac{AZ_{ij}}{BI} \right\rfloor + 1 = 9 \rightarrow SecondBN = 1$$

$$bin_{portion} = D_{ij} \times \left(1 - \frac{|AZ_{ij} - (BN - 1) \times (BI)|}{(BI)} \right) \quad (16)$$

۳-۲- تبدیل سیستم مختصات مسیر رهیاب

مقایسه بین دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب با استفاده از توصیفگرهای مسیر در صورتی درست خواهد بود که توصیفگرهای مسیر مورد استفاده نسبت به تفاوت‌های موجود در سیستم مختصات موقعیت نقاط هر دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب، یعنی مبدا، مقیاس و توجیه محورهای سیستم مختصات، پایدار^۱ باشند و یا اینکه موقعیت‌های نقاط هر دو مسیر مورد در یک سیستم مختصات بیان شده باشند. با توجه به اینکه توصیفگر HOD مستقل از توجیه محورهای سیستم مختصات مسیر نبوده و به مقیاس طول و توجیه محورهای سیستم مختصات حساس می‌باشد و همچنین نظر به اینکه دو

^۲ World Geodetic System 1984

^۱ Invariant

تعیین می‌گردند. در اینجا برای افزایش دقت محاسبات، مختصات نقاط متعلق به دو سر طولانی‌ترین امتداد در مسیر دوربین و متناظرهای آنها در مسیر رهیاب برای محاسبه ماتریس ضرایب مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه ماتریس ضرایب H تنها دارای چهار مولفه مستقل می‌باشد با استفاده از دو نقطه می‌توان این ضرایب را به صورت منحصر به فردی تعیین کرد. انتخاب تبدیل مشابه برای جلوگیری از ایجاد هر نوع تاثیر اضافی بر موقعیت‌های نقاط مسیر رهیاب بعد از انتقال آن به سیستم مختصات مسیر دوربین می‌باشد. انتخاب این انتقال باعث خواهد شد که بتوان توصیفگرهای HOD تولید شده برای این دو مسیر را با هم مقایسه کرد بدون آنکه تاثیر خطاهای موقعیت ناشی از حملات تداخل پیرازیت در مسیر رهیاب، تضعیف یا تشدید گردد. با این روش توصیفگرهای محاسبه شده برای دو مسیر دوربین و رهیاب نسبت به سیستم مختصات، تغییرات مقیاس و دوران، پایدار خواهند بود و می‌توان آنها را با هم مقایسه نمود.

۳-۳- پنجره لغزنده

یکی از مشکلات تعیین مسیر بصری به روش VO، خطای تجمعی در تعیین موقعیت می‌باشد که در صورت کنترل نشدن می‌تواند باعث ایجاد انحراف نسبت به مسیر اصلی گردد. یکی از عوامل مهم در مقدار خطای انحراف در تعیین مسیر بصری به روش VO، طول مسیر یا به عبارت دیگر تعداد تصاویر می‌باشد. در این مقاله برای مقابله با این خطا علاوه بر استفاده از روش سرشکنی دسته اشعه، تعداد تصاویر مورد استفاده برای محاسبه شاخص DCSI در هر موقعیت از مسیر، به تعداد کمی محدود گردید که تاثیر آن در محاسبه شاخص DCSI در بخش ۴-۴ آورده شده است. برای این منظور از یک پنجره لغزنده در طول مسیر و به ابعاد مشخص استفاده شد که یک دریچه برای انتخاب تعدادی مشخص از تصاویر متوالی پشه‌ها در هر موقعیت خاص از مسیر می‌باشد. این پنجره از ابتدا تا انتهای مسیر حرکت کرده و برای هر موقعیت از مسیر، شاخص DCSI بر اساس مسیر دوربین استخراج شده از تصاویر داخل این پنجره محاسبه خواهد شد. در هر موقعیت از مسیر پشه‌ها از موقعیت تعداد محدودی از نقاط مسیر واقع در داخل یک پنجره لغزنده برای استخراج توصیفگر مسیر HOD متناظر با هر دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب، استفاده می‌شود. در صورت استفاده از

پنجره لغزنده‌ای به ابعاد کل نقاط مسیر پشه‌ها برای محاسبه شاخص DCSI، در این صورت برای کل مسیر تنها یک مقدار شاخص DCSI تولید می‌شود که شاید زیاد قابل اطمینان و مناسب برای تصمیم‌گیری نباشد. استفاده از پنجره لغزنده با ابعادی کوچکتر از طول کل مسیر پشه‌ها این امکان را فراهم می‌کند که بتوان برای هر نقطه از مسیر پشه‌ها یک مقدار شاخص DCSI استخراج کرده و تصمیم‌گیری درباره صحت عملکرد رهیاب پشه‌ها و نیز وقوع حملات تداخل پیرازیت مبتنی بر مبنای تعداد زیادی از مقادیر شاخص DCSI خواهد بود. از سوی دیگر استفاده از یک پنجره با تعداد محدودی از نقاط مسیر پشه‌ها باعث کاهش بسیار زیاد تاثیر خطای تجمعی و انحراف ناشی از آن در روش VO و در تعیین مسیر دوربین خواهد شد و این موضوع باعث افزایش قابلیت اعتماد به شاخص DCSI می‌گردد.

۴- پیاده سازی، نتایج و ارزیابیها

در این قسمت ابتدا داده‌های تصویری مورد استفاده و نحوه شبیه‌سازی حملات تداخل پیرازیت بیان می‌شوند و سپس نتایج عملکرد توصیفگر مسیر HOD در آشکارسازی وقوع حملات تداخل پیرازیت و مقایسه آن با عملکرد توصیفگرهای مسیر NDCP و CDA بر مبنای شاخص DCSI ارائه خواهند شد. با توجه به محدودیت‌های قانونی موجود در استفاده از مسدود کننده واقعی و نیز حفظ امنیت پرواز پشه‌ها، تاثیرات حملات تداخل پیرازیت با توجه به کار انجام شده در [۹، ۱۲]، با استفاده از شبیه‌سازی خطای تعیین موقعیت گیرنده رهیاب ناشی از تداخل پیرازیت در موقعیت نقاط مسیر پشه‌ها اعمال گردیده است.

۴-۱- داده‌های مورد استفاده و محیط پیاده سازی

برای ارزیابی عملکرد توصیفگر مسیر HOD و مقایسه آن با عملکرد توصیفگرهای مسیر NDCP و CDA از ۴۲ تصویر هوایی از منطقه بشاگرد ایران، اخذ شده توسط پشه‌ها فانتوم-۳ که با استفاده از داده‌های رهیاب برچسب‌گذاری^۱ شده‌اند، استفاده گردید. دوربین مورد استفاده، مدل DJI و از نوع FC300S با فاصله کانونی ۴mm و با ابعاد تصویر ۳۰۰۰ در ۴۰۰۰ پیکسل و با زاویه

^۱ Geo-tagged

میدان دید 94° می باشد. پوشش طولی این تصاویر در امتداد پرواز در حدود ۷۵٪ می باشد که از ارتفاعی در حدود ۷۰m از سطح زمین اخذ شده اند. طول کل مسیر پرواز نیز در حدود ۸۶۰ متر می باشد. مسیر پرواز پهباد به صورت مستقیم طراحی شده است که دارای عوارض تپه ماهور با پوشش بوته ای غیر متراکم می باشد. شکل (۷) دو فریم متوالی پوشش دار از این مجموعه را نشان می دهد. دقت تعیین موقعیت مراکز این تصاویر با استفاده از داده های رهیاب پهباد در حدود ۱.۵m می باشد.



الف



ب

شکل ۷- الف و ب: دو تصویر نمونه پوشش دار از مسیر پرواز پهباد

۴-۲- شبیه سازی حملات تداخل پرازیت

با توجه به اینکه امکان استفاده از مسدود کننده^۱ واقعی در این تحقیق وجود نداشت وقوع حملات تداخل پرازیت با استفاده از نحوه تاثیر حملات تداخل پرازیت بر روی تعیین موقعیت رهیاب پهباد به صورت شبیه سازی انجام شد. حمله های تداخل پرازیت می توانند با توانهای مختلف و در بازه های زمانی متفاوت انجام شوند. در [۱۲] نشان داده شده است که در اثر حمله های تداخل پرازیت، اندازه خطای

تعیین موقعیت با استفاده از رهیاب بیشتر از مواقع عادی خواهد بود. در این تحقیق نشان داده شده است که خطای تعیین موقعیت با رهیاب در مواقع وقوع حملات تداخل پرازیت برای انواع گیرنده ها، دارای توزیعی نزدیک به توزیع نرمال بوده که میانگین و انحراف معیار آن تقریباً با هم برابر می باشند. در این تحقیق همچنین نشان داده شده است که با افزایش توان سیگنال های تداخل پرازیت، میانگین و انحراف معیار خطای تعیین موقعیت با رهیاب نیز افزایش می یابد. بنابراین، در این مقاله با توجه به کار انجام شده در [۱۲] برای شبیه سازی وقوع حملات تداخل پرازیت و بررسی تاثیر آن، خطای تعیین موقعیتی به صورت یک خطای تصادفی دارای توزیع نرمال، $N(\text{Mean}, \text{STD})$ ، به داده های موقعیت پهباد به دست آمده از گیرنده رهیاب افزوده گردید. همچنین برای نمایش تاثیر افزایش توان سیگنال های تداخل پرازیت نیز مقادیر میانگین و انحراف معیار این خطا در چند مرحله افزایش داده شد. برای نمایش تاثیر بازه زمانی وقوع حملات تداخل پرازیت نیز، خطای موقعیت ناشی از تداخل پرازیت به چهار بخش مختلف از مسیر پهباد یعنی: به یک چهارم آخر، نصف آخر، سه چهارم آخر و نیز کل مسیر پهباد اعمال گردید. با توجه به ماهیت تصادفی خطای تعیین موقعیت ناشی از حملات تداخل پرازیت، این خطا برای هر حالت مختلف به صورت تکراری (۱۰۰۰ بار تکرار) تولید و اعمال شد و نتایج ارائه شده برای هر حالت، میانگین نتایج بدست آمده برای کل تکرارها در هر حالت خاص می باشد.

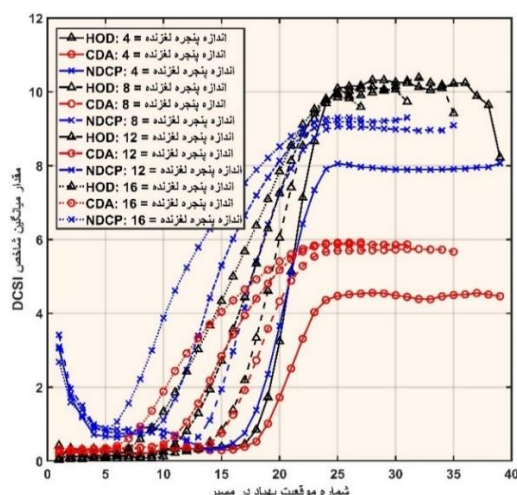
همچنین محاسبات در نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۸ انجام شده است.

۴-۳- ارزیابی عملکرد شاخص DCSI در صورت وقوع تداخل پرازیت

همانطور که در [۱۸] نشان داده شده است در صورت وقوع تداخل پرازیت مقادیر شاخص DCSI استخراج شده بر حسب توصیفگرهای مسیر NDCP و CDA افزایش قابل ملاحظه ای نسبت به مقدار صفر خواهند داشت. در این قسمت عملکرد توصیفگر مسیر HOD در مقایسه با دو توصیفگر مسیر NDCP و CDA ارائه می شود. در این مقایسه خطای موقعیت ناشی از تداخل پرازیت در موقعیت نقاط نیمه دوم از مسیر رهیاب به صورت یک خطای

^۱ Jammer

ابعاد پنجره لغزنده بررسی و با رفتار دو مسیر NDCP و CDA مقایسه می‌شود. در این بررسی ابعاد پنجره لغزنده در چهار مرحله برابر با مقادیر چهار، هشت، دوازده، و شانزده تصویر در نظر گرفته شد. همچنین شبیه‌سازی تداخل پارازیت با اعمال خطای موقعیت با توزیع نرمال $N(\Delta m, \Delta m)$ که تنها به نقاط نیمه دوم از مسیر رهیاب اعمال گردید انجام شده است.



شکل ۹- نمودار تاثیر اندازه پنجره لغزنده در رفتار شاخص DCSI

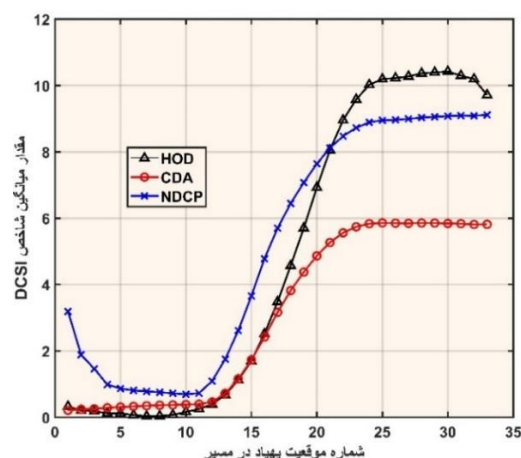
شکل (۹) تاثیر ابعاد این پنجره را برای هر سه توصیفگر مسیر فوق نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل دیده می‌شود با کاهش تدریجی اندازه این پنجره از مقدار شانزده تا چهار، شیب افزایش نمودار مقدار میانگین شاخص DCSI مربوط به هر سه توصیفگر مسیر تندتر می‌شود (خطوط پیوسته در نمودار). همچنین همانطور که از شکل (۹) دیده می‌شود در مورد توصیفگر HOD، کاهش ابعاد پنجره لغزنده تاثیر چندانی در مقدار نهایی شاخص DCSI ندارد ولی در مورد دو توصیفگر مسیر NDCP و CDA با کاهش ابعاد پنجره لغزنده مقدار شاخص DCSI کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که در مورد توصیفگر مسیر هر چند با کاهش ابعاد پنجره لغزنده نمودار شاخص DCSI با شیب تندتری تغییر می‌کند ولی مقدار نهایی آن در ابعادهای مختلف پنجره لغزنده با هم تفاوت چندانی ندارند.

۴-۵- بررسی تاثیر قدرت سیگنال تداخل پارازیت

توان سیگنال‌های حملات تداخل پارازیت می‌تواند متفاوت باشد. در [۱۲] نشان داده شده است که با افزایش توان حملات تداخل پارازیت مقادیر میانگین و انحراف

تصادفی با توزیع نرمال $N(\Delta m, \Delta m)$ در نظر گرفته شد. اندازه پنجره لغزنده نیز برای این مقایسه و استخراج شاخص DCSI در هر موقعیت از مسیر پهپاد برابر با ده منظور شده است. برای مسیر رهیاب و مسیر دوربین در داخل هر پنجره توصیفگرهای مسیر CDA، NDCP و HOD محاسبه و نمودار این مقادیر در شکل (۸) آورده شده است.

همانطور که از نمودار ارائه شده در شکل (۸) دیده می‌شود در نیمه اول از مسیر پهپاد که تداخل پارازیت وجود ندارد و عملکرد رهیاب درست می‌باشد و بنابراین، مقدار شاخص DCSI نزدیک به صفر است. با رسیدن پهپاد به نیمه دوم مسیر که محل وقوع حمله تداخل پارازیت می‌باشد، در مورد هر سه توصیفگر مقدار شاخص DCSI به طور محسوسی و با شیب تند مسیر افزایش می‌یابد که اختلاف فاحش و معنی‌داری با مقدار صفر دارند که نشان دهنده وقوع خطای نظاممند و حمله تداخل پارازیت در تعیین موقعیت رهیاب می‌باشند. همانطور که از نمودار شکل (۸) دیده می‌شود عملکرد توصیفگر مسیر HOD از عملکرد هر دو توصیفگر مسیر NDCP و CDA بهتری می‌باشد.



شکل ۸- نمودار مقادیر متوسط شاخص DCSI برای توصیفگر HOD و NDCP در زمان وقوع تداخل پارازیت در نیمه دوم از مسیر پهپاد

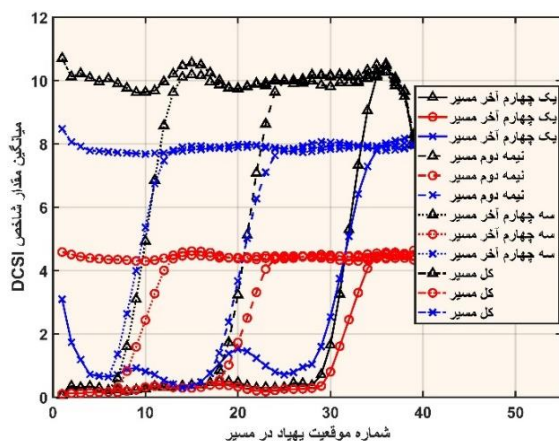
۴-۴- بررسی تاثیر ابعاد پنجره لغزنده

در ادامه تاثیر ابعاد پنجره لغزنده را در مورد توصیفگر مسیر HOD بررسی خواهیم کرد. در [۱۸] نشان داده شد که در صورت وقوع تداخل پارازیت، با کاهش اندازه پنجره لغزنده نمودار شاخص DCSI مربوط به توصیفگرهای مسیر NDCP و CDA با شیب تندتری افزایش می‌یابد. در این قسمت نیز رفتار توصیفگر HOD در مقابل تغییر اندازه

قابلیت توصیفگر مسیر HOD در آشکارسازی حملات تداخل پارازیت با توانهای پایین خیلی بیشتر از دو توصیفگر مسیر NDCP و CDA می‌باشد.

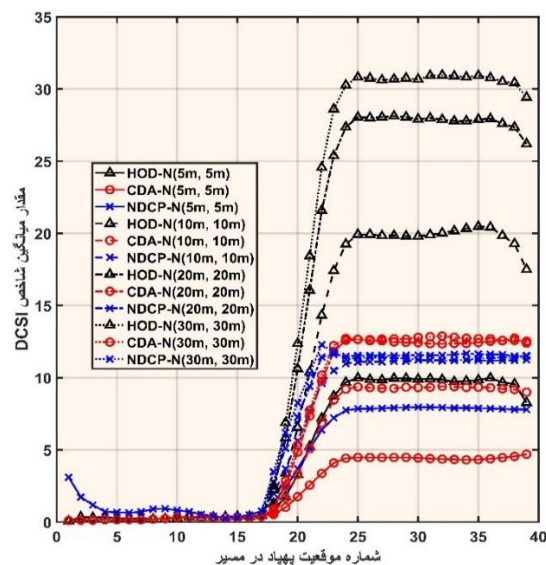
۴-۶- بررسی تاثیر بازه زمانی حملات تداخل پارازیت

در این قسمت عملکرد توصیفگرهای مسیر HOD، NDCP و CDA در مقابل افزایش زمان حملات تداخل پارازیت و تاثیر آن بر روی مقدار میانگین شاخص DCSI مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. در این بررسی، مدت زمان حملات تداخل پارازیت با اعمال خطای تعیین موقعیت با توزیع نرمال $N(\Delta m, \Delta m)$ به موقعیت‌های نقاط مسیر در بازه‌های زمانی یک چهارم آخر مسیر، نیمه آخر مسیر، سه چهارم آخر مسیر و کل مسیر، شبیه‌سازی گردید. همچنین ابعاد پنجره لغزنده برای انتخاب نقاط مسیر رهیاب و دوربین در هر موقعیت از مسیر پهناد برابر با چهار در نظر گرفته شد. شکل (۱۱) نتیجه عملکرد این توصیفگرهای مسیر را در چهار بازه زمانی فوق نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل‌ها دیده می‌شود عملکرد هر سه توصیفگر نسبت به تغییر بازه زمانی حملات تداخل پارازیت رفتار مشابهی است و شاخص DCSI محاسبه شده توسط این توصیفگرهای مسیر مستقل از بازه زمانی حملات تداخل پارازیت بوده و حتی در بازه زمانی کوتاه یک چهارم نقاط از کل مسیر پهناد نیز وقوع حملات تداخل پارازیت با افزایش قابل ملاحظه‌ای که در مقدار شاخص DCSI نسبت به مقدار صفر رخ داده به خوبی قابل تشخیص می‌باشد.



شکل ۱۱- نمودار تاثیر افزایش بازه زمانی حملات تداخل پارازیت در رفتار شاخص DCSI

معیار در تابع توزیع احتمال خطای تعیین موقعیت با رهیاب، $N(\text{Mean}, \text{STD})$ ، نیز افزایش خواهد یافت. همچنین در [۱۸] نشان داده شد که با افزایش مقادیر میانگین و انحراف معیار خطای تعیین موقعیت با رهیاب از Δm تا $30m$ شاخص DCSI نیز افزایش می‌یابد. در این قسمت عملکرد توصیفگر مسیر HOD در مقابل افزایش توان سیگنال تداخل پارازیت بررسی و با عملکرد دو توصیفگر مسیر NDCP و CDA مقایسه می‌گردد.



شکل ۱۰- نمودار تاثیر افزایش میانگین و انحراف معیار خطای تعیین موقعیت با رهیاب ناشی از حملات تداخل پارازیت در رفتار شاخص DCSI

شکل (۱۰) نمودار مقادیر میانگین شاخص DCSI برای هر سه توصیفگر مسیر HOD، NDCP و CDA را نشان می‌دهد. در این بررسی نیز خطای تعیین موقعیت تنها بر روی موقعیت نقاط واقع در نیمه دوم از مسیر رهیاب اعمال گردیده و ابعاد پنجره لغزنده برابر با چهار در نظر گرفته شد. همانطور که از این نمودار دیده می‌شود توصیفگر مسیر HOD در مقابل افزایش توان سیگنال تداخل پارازیت حساسیت خیلی بیشتری از خود نشان می‌دهد. در مقابل توصیفگرهای مسیر NDCP و CDA در مقابل افزایش مقادیر میانگین و انحراف معیار خطای تعیین موقعیت از $20m$ به $30m$ افزایش قابل توجهی از خود نشان نمی‌دهند. همچنین حساسیت توصیفگر مسیر HOD به خطای تعیین موقعیتی با میانگین و انحراف معیار $10m$ بیشتر از حساسیت توصیفگرهای مسیر NDCP و CDA به خطای تعیین موقعیتی با میانگین و انحراف معیار $30m$ می‌باشد. این نکته نشان می‌دهد که

۵- نتیجه گیری

در این مقاله راه کاری ارائه شد تا بتوان بر حساسیت توصیفگر مسیر HOD نسبت به تغییرات سیستم مختصات مسیرهایی که قصد مقایسه آنها وجود دارد غلبه شود. با استفاده از این راه کار، این امکان فراهم آمد که بتوان از توصیفگر مسیر HOD، که دارای مزیت مستقل بودن از تعداد نقاط مسیر می باشد و به متناظر بودن نقاط موجود در مسیرهایی رهیاب و مسیر دوربین حساس نیست، برای آشکارسازی وقوع حملات تداخل پارازیت استفاده شود. جدول ۱ به صورت خلاصه عملکرد توصیفگرهای مسیر HOD، CDA، و NDCP را بر حسب پارامترهای مختلف بررسی شده نشان می دهد. مقایسه عملکرد این توصیفگر مسیر با دو توصیفگر مسیر NDCP و CDA نشان می دهد که این توصیفگر حساسیت بیشتری نسبت به وقوع

حملات تداخل پارازیت داشته و هم در توانهای پایین سیگنال تداخل پارازیت که منجر به خطاهای موقعیت بزرگتر از ۵ متر می شوند و هم در بازه های زمانی کوتاه وقوع تداخل پارازیت با اطمینان بیشتری نسبت به دو توصیفگر مسیر دیگر، وقوع حملات تداخل پارازیت را آشکارسازی می کند. همچنین با افزایش توان تداخل پارازیت، میزان حساسیت توصیفگر مسیر HOD نیز به صورت متناسب با آن افزایش می یابد به طوری که مقدار میانگین شاخص DCSI برای توصیفگر مسیر HOD ناشی از خطای موقعیت با توزیع $(10m, 10m)$ از مقدار میانگین شاخص DCSI برای توصیفگرهای مسیر CDA و NDCP در خطای موقعیت با توزیع $(30m, 30m)$ نزدیک به دو برابر می باشد.

جدول ۱- خلاصه عملکرد توصیفگرهای مسیر HOD، CDA، و NDCP را بر حسب پارامترهای مختلف

پارامتر	توصیفگر	CDA	NDCP	HOD
پایداری نسبت به یکسان نبودن سیستم مختصات دو مسیر	پایدار	پایدار	پایدار	ناپایدار
پایدار بودن نسبت به تعداد نقاط دو مسیر	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	پایدار
پایدار بودن نسبت به متناظر نبودن نقاط دو مسیر	پایدار	ناپایدار	ناپایدار	پایدار
حساسیت نسبی به خطاهای موقعیت با توان پایین (در حد ۵ متر)	پایین	متوسط	بالا	بالا
میزان حساسیت نسبی به خطاهای موقعیت با توان بالا (در حد ۲۰ متر و ۳۰ متر)	پایین	پایین	بالا	بالا
میزان واکنش سریع به وقوع تداخل پارازیت	بالا	بالا	بالا	بالا
میزان حساسیت به ابعاد پنجره لغزنده	متوسط	خوب	عالی	عالی
میزان حساسیت نسبی به بازه زمانی وقوع تداخل پارازیت	خوب	خوب	خوب	خوب

تصویر مبنا برای مقابله با فریب رهیاب مورد بررسی و پژوهش قرار گیرد. همچنین با توجه به اهمیت موضوع، پیشنهاد می شود روش ارائه شده در این تحقیق در شرایط مختلف پرواز پهنپاد و با داده های اخذ شده در شرایط متفاوت توسط پژوهشگران مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

۶- پیشنهادات و پژوهش های آتی

با توجه به تازه و نو بودن موضوع استفاده از روش های تصویر مبنا در آشکارسازی وقوع اختلال در عملکرد گیرنده های رهیاب، لزوم کار بیشتر در این حوزه آشکار است. برای کارهای آتی پیشنهاد می شود که امکان استفاده از روش های

مراجع

- [1] G. H. Elkaim, F. A. P. Lie, and D. Gebre-Egziabher, "Principles of Guidance, Navigation, and Control of UAVs," in Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, K. P. Valavanis and G. J. Vachtsevanos, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015, pp. 347-380.
- [2] R. P. Collinson, Introduction to avionics systems. Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] A. El-Rabbany, Introduction to GPS: the global positioning system. Artech House, 2002.
- [4] F. Kendoul, "Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems," Journal of Field Robotics, vol. 29, no. 2, pp. 315-378, 2012.

- [5] F. Dovis, GNSS Interference Threats and Countermeasures. Artech House, 2015.
- [6] J. S. Warner and R. G. Johnston, "GPS spoofing countermeasures," *Homeland Security Journal*, vol. 25, no. 2, pp. 19-27, 2003.
- [7] J. Volpe, "Vulnerability assessment of the transportation infrastructure relying on the global positioning system," 2001.
- [8] R. Sabatini, S. Ramasamy, T. Moore, and C. Hill, "Avionics-based GNSS integrity augmentation performance in a jamming environment," in *AIAC16: 16th Australian International Aerospace Congress*, 2015, p. 469: Engineers Australia.
- [9] D. Borio, F. Dovis, H. Kuusniemi, and L. L. Presti, "Impact and detection of GNSS jammers on consumer grade satellite navigation receivers," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 6, pp. 1233-1245, 2016.
- [10] S. Haykin, *Kalman filtering and neural networks*. John Wiley & Sons, 2004.
- [11] L. Ruotsalainen, M. Kirkko-Jaakkola, Z. Bhuiyan, S. Söderholm, S. Thombre, and H. Kuusniemi, "Deeply coupled GNSS, INS and visual sensor integration for interference mitigation," *Proc. ION GNSS+*, Tampa, FL, USA, 2014.
- [12] H. Kuusniemi, E. Airos, M. Z. H. Bhuiyan, and T. Kröger, "GNSS jammers: how vulnerable are consumer grade satellite navigation receivers?," *European Journal of Navigation*, vol. 10, no. 2, pp. 14-21, 2012.
- [13] K. Jansen and C. Pöpper, "Advancing attacker models of satellite-based localization systems: the case of multi-device attackers," in *Proceedings of the 10th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks*, 2017, pp. 156-159: ACM.
- [14] D. Borio and C. Gioia, "Real-time jamming detection using the sum-of-squares paradigm," in *Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, 2015 International Conference on, 2015, pp. 1-6: IEEE.
- [15] P. Papadimitratos and A. Jovanovic, "GNSS-based positioning: Attacks and countermeasures," in *Military Communications Conference*, 2008. MILCOM 2008. IEEE, 2008, pp. 1-7: IEEE.
- [16] N. O. Tippenhauer, C. Pöpper, K. B. Rasmussen, and S. Capkun, "On the requirements for successful GPS spoofing attacks," in *Proceedings of the 18th ACM conference on Computer and communications security*, 2011, pp. 75-86: ACM.
- [17] Z. Zhang, S. Gong, A. D. Dimitrovski, and H. Li, "Time synchronization attack in smart grid: Impact and analysis," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 87-98, 2013.
- [18] A. Afary, M. Varshosaz, M. SaadatSeresht, and B. Mojaradi, "A New Vision-Based and GPS-Signal-Independent Approach in Jamming Detection and UAV Absolute Positioning Assessment," *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. Accepted and in publish process, 2018.
- [19] D.-G. Sim, R.-H. Park, R.-C. Kim, S. U. Lee, and I.-C. Kim, "Integrated position estimation using aerial image sequences," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 24, no. 1, pp. 1-18, 2002.
- [20] D.-G. Sim, R.-H. Park, R.-C. Kim, S. U. Lee, and I.-C. Kim, "Integrated position estimation using aerial image sequences," *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 1, pp. 1-18, 2002.
- [21] D.-G. Sim and R.-H. Park, "Localization Based on the Gradient Information for DEM matching," in *MVA*, 1998, pp. 266-269: Citeseer.
- [22] V. Tchernykh, M. Beck, and K. Janschek, "Optical flow navigation for an outdoor UAV using a wide angle mono camera and DEM matching," in *Mechatronic Systems*, 2006, vol. 4, no. 1, pp. 590-595.
- [23] Y. Kim, D. Lee, and H. Bang, "Vision-only uav navigation aided by terrain elevation map," in *Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2012 12th International Conference on, 2012, pp. 1729-1733: IEEE.
- [24] D. Lee, Y. Kim, and H. Bang, "Vision-based terrain referenced navigation for unmanned aerial vehicles using homography relationship," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 69, no. 1-4, pp. 489-497, 2013.
- [25] F. Samadzadegan, M. Hahn, and S. Saeedi, "Position estimation of aerial vehicle based on a vision aided navigation system," 2007.
- [26] G. Conte and P. Doherty, "An integrated UAV navigation system based on aerial image matching," in *Aerospace Conference*, 2008 IEEE, 2008, pp. 1-10: IEEE.
- [27] A. Cesetti, E. Frontoni, A. Mancini, A. Ascani, P. Zingaretti, and S. Longhi, "A visual global positioning system for unmanned aerial vehicles used in photogrammetric applications," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 61, no. 1-4, pp. 157-168, 2011.

- [28] F. Lindsten, J. Callmer, H. Ohlsson, D. Tornqvist, T. Schon, and F. Gustafsson, "Geo-referencing for UAV navigation using environmental classification," in *Robotics and Automation (ICRA)*, 2010 IEEE International Conference on, 2010, pp. 1420-1425: IEEE.
- [29] F. Samadzadegan and G. Abdi, "Vision-based pose estimation for autonomous outdoor navigation of aerial vehicles," in *Control, Instrumentation and Automation (ICCIA)*, 2011 2nd International Conference on, 2011, pp. 883-888: IEEE.
- [30] G. Abdi, F. Samadzadegan, and F. Kurz, "POSE ESTIMATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON A VISION-AIDED MULTI-SENSOR FUSION," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, vol. 41, 2016.
- [31] F. Samadzadegan and G. Abdi, "Autonomous navigation of Unmanned Aerial Vehicles based on multi-sensor data fusion," in *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2012, pp. 868-873.
- [32] X. Zhuo, T. Koch, F. Kurz, F. Fraundorfer, and P. Reinartz, "Automatic UAV Image Geo-Registration by Matching UAV Images to Georeferenced Image Data," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 4, p. 376, 2017.
- [33] T. Patterson, S. McClean, P. Morrow, and G. Parr, "Utilizing geographic information system data for unmanned aerial vehicle position estimation," in *Computer and Robot Vision (CRV)*, 2011 Canadian Conference on, 2011, pp. 8-15: IEEE.
- [34] D.-Y. Gu, C.-F. Zhu, J. Guo, S.-X. Li, and H.-X. Chang, "Vision-aided UAV navigation using GIS data," in *Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, 2010 IEEE International Conference on, 2010, pp. 78-82: IEEE.
- [35] A. Afary, M. Varshosaz, M. SaadatSeresht, and B. Mojaradi, "Absolut Vision-Based Positioning Methods in UAV Navigation," presented at the The 1st National Conference on Geospatial Information Technology, January 2016, 1394. Available: http://ncegit2016.kntu.ac.ir:81/usersFiles/articleFiles3/HN10103630309_3_17050704230.pdf
- [36] F. Fraundorfer and D. Scaramuzza, "Visual odometry: Part i: The first 30 years and fundamentals," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 18, no. 4, pp. 80-92, 2011.
- [37] M. Elbahnasawy, T. Shamseldin, and A. Habib, "Image-assisted GNSS/INS navigation for UAV-based mobile mapping systems during GNSS outages," in *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 2018, pp. 417-425.
- [38] F. Liu, Y. B. Sarvrood, and Y. Gao, "Implementation and Analysis of Tightly Integrated INS/Stereo VO for Land Vehicle Navigation," *Journal of Navigation*, vol. 71, no. 1, pp. 83-99, 2018.
- [39] M. Irani, B. Rousso, and S. Peleg, "Recovery of ego-motion using image stabilization," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 1994. Proceedings CVPR'94*, 1994 IEEE Computer Society Conference on, 1994, pp. 454-460: IEEE.
- [40] W. Burger and B. Bhanu, "Estimating 3D egomotion from perspective image sequence," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 11, pp. 1040-1058, 1990.
- [41] A. Milella and R. Siegwart, "Stereo-based ego-motion estimation using pixel tracking and iterative closest point," in *Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems (ICVS'06)*, 2006, pp. 21-21: IEEE.
- [42] D. Nistér, O. Naroditsky, and J. Bergen, "Visual odometry," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on*, 2004, vol. 1, pp. I-652-I-659 Vol. 1: IEEE.
- [43] C. Forster, M. Pizzoli, and D. Scaramuzza, "SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry," in *Robotics and Automation (ICRA)*, 2014 IEEE International Conference on, 2014, pp. 15-22: IEEE.
- [44] Y. Cai and R. Ng, "Indexing spatio-temporal trajectories with Chebyshev polynomials," in *Proceedings of the 2004 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, 2004, pp. 599-610: ACM.
- [45] G. Sidorov, A. Gelbukh, H. Gómez-Adorno, and D. Pinto, "Soft similarity and soft cosine measure: Similarity of features in vector space model," *Computación y Sistemas*, vol. 18, no. 3, pp. 491-504, 2014.
- [46] M. A. Gawayyed, M. Torki, M. E. Hussein, and M. El-Saban, "Histogram of Oriented Displacements (HOD): Describing Trajectories of Human Joints for Action Recognition," in *IJCAI*, 2013.