اولین کنفرانس مهندسی فناوری اطلاعات مکانی
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه‌برداری
۲۹ و ۳۰ دی ماه ۱۳۹۴

The 1st National Conference on Geospatial Information Technology
K.N.Toosi University of Technology
Faculty of Geomatics Engineering
19 - 20 January 2016

روشهای تعیین موقعیت مطلق تصویر مبنا در ناوبری پهپادها

علیرضا آفری[۱*]، مسعود ورشوساز[۲]، محمد سعادت سرشت[۳]، برات مجردی[۴]

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
۲- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
۳- استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور دانشگاه تهران
۴- استادیار گروه نقشه برداری دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده :

بالا بردن امنیت پرواز و اتوماسیون، در هدایت و ناوبری پرنده های هدایت پذیر از راه دور، پهپاد - UAV، در مسیرهای پروازی طولانی، مستلزم تعیین موقعیت مطلق پهپاد در چارچوب مختصاتی جهانی و در هر لحظهٔ پرواز می باشد. بدین منظور استفاده از گیرنده های GPS در تعیین موقعیت مطلق پهپاد امری متداول و ضروری است. اما با توجه به اینکه گیرنده های GPS، ممکن است تحت تأثیر عواملی مانند سیگنالهای مزاحم، پدیده های اتمسفری، و نیز جنگ الکترونیک و یا خرابی خود گیرنده دچار اختلال و از کار افتادگی شوند، وجود سیستمی جایگزین که بتواند در مواقع اختلال GPS، موقعیت مطلق پهپاد را تعیین کند ضروری است. از جمله روشهای جایگزین مورد استفاده برای تعیین موقعیت مطلق می توان به روش تناظریابی بین اطلاعات ارتفاعی اخذ شده از مسیر در حین پرواز و اطلاعات ارتفاعی موجود مانند DEM، استفاده از اطلاعات تصویری اخذ شده از مسیر پرواز و تناظریابی بین این تصاویر و تصاویر زمین مرجع موجود از مسیر پرواز و روشهای نجومی تعیین موقعیت مطلق، مبتنی بر تصویر برداری از ستاره ها، اشاره کرد. روش استفاده از اطلاعات ارتفاعی در مناطق دارای تغییرات ارتفاعی نتایج بهتری ارائه می دهد و بسته به روش اخذ اطلاعات ارتفاعی، می تواند در تمام شبانه روز انجام شود. روش استفاده از اطلاعات تصویری در هنگام روز قابل انجام می باشد. روش نجومی نیز در شب هنگام و در هوای بدون ابر امکانپذیر است. در این مقاله روشهای تعیین موقعیت مطلق مبتنی بر تصاویر اخذ شده از مسیر پرواز بررسیس شده و مزایا و معایب هر روش بیان و مشکل کلی موجود در همه این روشها نیز که کارآیی این روشها را محدود می نماید مورد بحث قرار گرفته است. با توجه به معایب و مزایای هر روش، استفاده از روشهای ترکیبی برای غلبه بر محدودیتهای هر روش پیشنهاد می گردد.

واژه‌های کلیدی : تعیین موقعیت مطلق، ناوبری، پهپاد، روشهای تصویر مبنا.

نویسنده مکاتبه کننده : علیرضا آفری
آدرس پستی : تهران- خیابان ولیعصر – تقاطع میرداماد – دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک - کد پستی ۱۹۹۶۷-۱۵۴۳۳
تلفن : ۰۲۱-۸۷۷۰۲۱۸
آدرس پست الکترونیک : arafary@mail.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی، استفاده از پهپادها (تجهیزات پرنده بدون سرنشین و هدایت پذیر از راه دور)، UAV[۱] ها، در بخش غیر نظامی رو به گسترش بوده و از این تجهیزات برای مقاصد مختلف مانند پایش و تهیه نقشه استفاده می شود. هدایت و ناوبری این پرنده ها بصورت کنترل از راه دور و توسط یک خلبان انسانی از روی زمین و یا بصورت خودکار و توسط کامپیوترهای مستقر بر روی پهپاد و با استفاده از سنسورهای مختلف ناوبری مانند GPS[۲]/INS[۳] [۱] و میکرو پروسسورها و امکانات هوش مصنوعی مستقر بر روی پهپاد انجام می شود [۲]. منظور از ناوبری فرآیند نظارت و کنترل حرکت یک وسیله متحرک و تعیین مسیر حرکت مناسب و ایمن بین دو نقطه شروع و پایان حرکت از طریق تعیین سه مؤلفه موقعیت و سه مؤلفه سرعت متحرک می باشد [۳، ۴]. سه مؤلفه موقعیت و سه مؤلفه سرعت متحرک که با هم یک بردار شش مؤلفه ای به نام بردار وضعیت[۴] را ایجاد می کنند که اندازه گیری آن مستلزم تعریف یک چارچوب مختصاتی ناوبری می باشد [۵]. همچنین موقعیت، سرعت و وضعیت (زوایای دوران) نیز بردار وضعیت ناوبری نامیده می شوند [۶]. لیست کامل پارامترهای بردار وضعیت، دوازده پارامتر شامل سه پارامتر موقعیت، سه پارامتر سرعت خطی، سه پارامتر زاویه ای وضعیت[۵] و سه پارامتر سرعتهای زاویه ای پهپاد می باشد که بایستی با نرخ مناسب و به صورت آنی محاسبه شوند [۷، ۸]. در صورتی که محاسبات در روی خود وسیله متحرک انجام شود به این عملیات ناوبری گفته می شود و در صورتی که محاسبات خارج از وسیله متحرک صورت گیرد این فرآیند، پایش و مراقبت[۶] یا تعیین موقعیت نامیده می شود [۵] که در این مقاله منظور از ناوبری همان تعیین بردار وضعیت ناوبری در روی متحرک می باشد.

سیستمهای تعیین موقعیت به دو دسته تعیین موقعیت مطلق (Fixing) و تعیین موقعیت نسبی یا مسیری[۷] (Dead Reckoning) تقسیم می شوند که وجود هر دو آنها برای ناوبری پهپادها ضروری است [۹]. در سیستمهای تعیین موقعیت مطلق، بردار وضعیت متحرک به صورت مستقل از مسیر حرکت متحرک و به صورت نقطه ای اندازه گیری می شود. این سیستمها به سه دسته سیستمهای تعیین موقعیت رادیویی[۸]، سماوی[۹] و نقشه ای[۱۰] تقسیم می شوند [۵]. سیستمهای تعیین موقعیت رادیویی شامل یک شبکه از ایستگاههای ارسال امواج رادیویی مستقر بر روی زمین، ماهواره ها (مانند GPS) و یا سایر تجهیزات می باشد. در ناوبری هوایی این امواج توسط سنسورهای تعیین موقعیت دریافت شده و با معلوم بودن موقعیت ایستگاههای ارسال در یک چارچوب مختصاتی ناوبری، موقعیت هواپیما محاسبه می شود. سرعت هواپیما از شیفت داپلر سیگنالهای ارسالی و یا از دنباله مختصاتهای اندازه گیری شده محاسبه می گردد. در سیستمهای تعیین موقعیت سماوی موقعیت هواپیما از طریق اندازه گیری زاویه ارتفاعی و آزیموت اجرام سماوی نسبت به چارچوب مختصاتی ناوبری در زمانهای دقیق و معلوم محاسبه می شود. در سیستمهای تعیین موقعیت نقشه ای نیز بردار وضعیت از طریق تصویر برداری از سطح زمین و یا اندازه گیریهای پروفیل ارتفاعی محاسبه می شود [۵].

در سیستمهای تعیین موقعیت نسبی، مانند INS، بردار وضعیت متحرک از یک سری اندازه گیریهای پیوسته نسبت به یک موقعیت اولیه تعیین می شود [۵]. این سیستمها از اندازه گیری زوایای وضعیت[۱۱] متحرک و بردار سرعت یا شتاب

---

[۱] Unmanned Aerial Vehicle
[۲] Global Positioning System
[۳] Inertial Navigation System
[۴] State Vector
[۵] Attitude Angles
[۶] Surveillance
[۷] Dead-Reckoning
[۸] Radio Navigation System
[۹] Celestial Navigation System
[۱۰] Mapping Navigation System
[۱۱] Aircraft Heading

متحرک برای اندازه گیری جابجائیهای نسبی متحرک استفاده می کنند. در ادامه ما این دو نوع ناوبری را با عناوین مطلق و نسبی بیان خواهیم کرد.

در روباتهای زمینی که بیشتر در محیطهای کوچک و یا سرپوشیده[۱۲] مورد استفاده قرار می گیرند ناوبری اغلب به صورت نسبی و نسبت به اولین نقطه حرکت (مبداء سیستم مختصات) و در یک چارچوب دکارتی دلخواه انجام می شود و روبات برای حرکت در محیط، بیشتر نیاز به دانستن موقعیت نسبی خود در یک سیستم مختصات محلی و نسبت به عوارض موجود در محیط دارد [۱۰]. اما در مورد سیستمهای پهپاد به لحاظ تامین امنیت پرواز، هر دو نوع ناوبری و تعیین موقعیت مطلق و نسبی مطرح می باشد [۹]. البته در مورد سیستمهایی پهپادی که در یک محدوده کوچک مورد استفاده قرار می گیرند ناوبری نسبی جوابگو خواهد بود اما در مورد پهپادهایی که مسیر پروازی آنها طولانی می باشد و یا برای پرواز در مناطق با وسعت زیاد مورد استفاده قرار می گیرند علاوه بر تعیین موقعیت نسبی، ناوبری و تعیین موقعیت مطلق پهپاد در یک چارچوب مختصاتی جهانی از اهمیت خاصی برخوردار است.

در حال حاضر برای تعیین موقعیت مطلق پهپاد در یک سیستم مختصات جهانی از GPS استفاده می شود که یک سیستم رادیو ناوبری ماهواره ای آنی است و امکان استفاده از آن در هر نقطه از سطح روی زمین و فضای بالای سطح آن و به صورت شبانه روزی و با دقتی در حدود چند متر و نرخ یک ثانیه فراهم می باشد [۹]. سیستم INS نیز در اصل یک سیستم تعیین موقعیت نسبی است که دارای سنسورهای شتاب سنج و ژیروسکوپ بوده و بر اساس اندازه گیری و انتگرالگیری شتاب ثقل زمین در مسیر حرکت و با تعیین پارامترهای جابجایی نسبی و تغییر وضعیت نسبی، امکان تعیین موقعیت نسبی با نرخ بالا (بیش از ۱۰۰ هرتز) را فراهم می کند (مرجع). در این میان سنسور GPS دارای دقت و صحت تعیین موقعیت مطلق نسبتا پایدار ولی با نرخ پایین می باشد (مرجع) و سنسور INS نیز دارای نرخ بالای تعیین موقعیت نسبی ولی با دقت و صحت ناپایدار و نزولی بدلیل وجود خطای تجمعی در تعیین موقعیت می باشد (مرجع). برای رفع معایب این دو سیستم از تلفیق داده های سنسور GPS با داده های سنسور INS بوسیله فیلتر کالمن (مرجع) استفاده می شود که باعث می شود نرخ تعیین موقعیت GPS افزایش یافته و خطای تجمعی INS نیز کنترل شود (مرجع). بنابراین سیستم تلفیقی GPS/INS در اکثر مواقع یک سیستم ایده آل برای تعیین موقعیت تجهیزات پرنده با سرنشین و بدون سرنشین محسوب می شود ولی با این وجود سیستم GPS/INS نیز با مشکلاتی همراه می‌باشد. سیستم GPS ممکن است به علت طوفانهای خورشیدی، میدانهای مغناطیسی شدید، تأثیر پدیده های اتمسفری، عوامل منعکس کننده سیگنال و سازه های بلند بخصوص در مناطق شهری، وجود نویز و جنگ الکترونیک و یا خرابی خود گیرنده و در اثر نوسانات الکتریکی دچار اختلال شده و غیر قابل استفاده گردد [۱۱]. پس از قطع سیگنالهای GPS و یا خرابی آن، موقعیت مطلق پهپاد از دست خواهد رفت و سیستم INS نیز به علت خطای دریفت زیاد و تجمعی ایجاد شده در پارامترهای ناوبری بدست آمده از آن، پس از یک مدت زمان کوتاه در حد چند ثانیه تا چند ده ثانیه کارآیی خود را به سرعت از دست داده و دقت تعیین موقعیت نسبی و مطلق با INS نیز به سرعت کاهش خواهد یافت [۱۱-۱۴]. بنابراین برای امکان هدایت و ناوبری امن و مستمر در سیستمهای پهپاد، در زمانهایی که سیستم GPS دچار اختلال شده و یا برای حالتهایی که امکان استفاده از سیستم GPS وجود ندارد، بایستی سیستمهای جایگزین GPS برای ناوبری مورد استفاده قرار گیرد. در حالت کلی یک سیستم ایده آل و جایگزین GPS برای ناوبری پهپاد بایستی بتواند با ترکیب با دیگر سنسورهای مستقر بر روی پهپاد مانند INS، ارتفاع سنج، و دوربین تصویر برداری و یا فیلمبرداری بتواند پارامترهای کامل ناوبری شامل سه پارامتر موقعیت، سه پارامتر سرعت خطی، سه پارامتر وضعیت و سه پارامتر سرعتهای زاویه ای پهپاد را با نرخ مناسب و به صورت آنی بدست آورد [۷].

[۱۲] Indoor

در این مقاله برآن هستیم تا مروری کلی بر تحقیقات انجام شده بر روی سیستمهای ناوبری مطلق و تصویر مبناء که می تواند جایگزین GPS در ناوبری مطلق پهپادها باشند داشته باشیم. برای این منظور جنبه های مختلفی مورد بررسی و ارزیابی قرار می گیرند که در ادامه به آنها می پردازیم.

۲- روشهای تصویر مبناء در تعیین موقعیت مطلق پهپاد

تا کنون تحقیقات چندی بر روی سیستم های تعیین موقعیت جایگزین GPS/INS در پهپادها با استفاده از داده های سنسورهای تصویر برداری و بر مبنای استفاده از روشهای تناظریابی بین اطلاعات ارتفاعی و تصویری اخذ شده در حین پرواز پهپاد با اطلاعات متناظر موجود و بایگانی شده در یک پایگاه داده مستقر بر روی پهپاد انجام شده است [۱۵-۲۵]. روشهای تصویر مبناء در تعیین موقعیت مطلق پهپاد به چهار دسته قابل تقسیم می باشند.

۱- روش استفاده از اطلاعات ارتفاعی تصویر
۲- روش تناظریابی بین تصاویر پهپاد و تصاویر زمین مرجع موجود
۳- روش تناظریابی بین اطلاعات GIS ای استخراج شده از تصاویر با اطلاعات نقشه ای (برداری)
۴- روش تعیین موقعیت سماوی و استفاده از Star-Tracker

در روش اول از اطلاعات ارتفاعی بدست آمده از زوج تصاویر استریو در حین پرواز و تناظریابی بین این اطلاعات با اطلاعات ارتفاعی موجود از منطقه پرواز در یک کریدور پروازی برای تعیین موقعیت مطلق پهپاد استفاده می شود. در روش دوم از تصاویر اخذ شده توسط پهپاد و رجیستر نمودن آنها به تصاویر آرشیو و تصحیح هندسی شده موجود از منطقه پرواز جهت تعیین پارامترهای موقعیت و توجیه دوربین در لحظه عکسبرداری استفاده می شود. در روش سوم نیز که به اطلاعات تصویری اخذ شده توسط پهپاد از منطقه پرواز متکی است ابتدا یک سری اطلاعات نقطه ای و خطی مناسب، مانند جاده ها، خطوط راه آهن یا نقاط ابتدا و انتهای جاده ها، تونلها، و یا تقاطع جاده ها، از روی تصاویر اخذ شده توسط پهپاد استخراج شده و پس از آماده نمودن آنها جهت ورود در یک سیستم GIS، بین این اطلاعات و لایه های برداری اطلاعات مکانی و GIS موجود تناظریابی شده و تصاویر پهپاد به اطلاعات مکانی موجود در سیستم GIS رجیستر می شوند و پارامترهای موقعیت و وضعیت دوربین با این روش استخراج می گردد. در روش تعیین موقعیت سماوی نیز از تصویر برداری ستارگان در شب هنگام و ثبت زمان دقیق تصویربرداری و کاتالوگ ستارگان برای تعیین موقعیت پهپاد استفاده می کند.

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 می باشد. همچنین، این روشها تا حدودی مستقل از GPS می باشند 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 اندازه گیریهای ارتفاعی ضروری می باشد که این اطلاعات بعد از قطع سیگنالهای GPS برای یک بازه زمانی کوتاه، با استفاده از آخرین داده های GPS و یا داده های INS استخراج می گردد. در صورتی که این موقعیت تقریبی معلوم نباشد روشهای فوق به نتیجه نخواهند رسید.

داده های آرشیو موجود که در پژوهشهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته اند عبارتند از:

۱- اطلاعات ارتفاعی شامل منحنیهای میزان و مدلهای رقومی ارتفاعی زمین، DEM [۱۵, ۱۹, ۲۳-۲۵]
۲- تصاویر هوایی و ماهواره‌ای زمین مرجع شده [۱۵-۱۷, ۲۰, ۲۱]
۳- لایه های برداری سیستمهای اطلاعات مکانی GIS [۱۸, ۲۱, ۲۲]
۴- کاتالوگ ستارگان شامل مختصات ستارگان و مقادیر تغییرات آنها در روش تعیین موقعیت سماوی

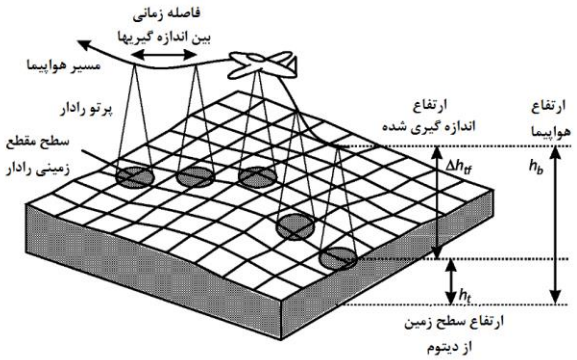
هر کدام از این روشها دارای معایب و مزایای خاص خود می باشند و در برخی موارد نیز برای غلبه بر محدودیتهای هر روش به صورت ترکیبی نیز مورد استفاده قرار گرفته اند [۱۵, ۲۱].

۲-۱- ناوبری و تعیین موقعیت مطلق پهپاد با استفاده از اطلاعات ارتفاعی

روشهای تعیین موقعیت پهپاد مبتنی بر استفاده از مدل رقومی ارتفاعی زمین به روشهای مبتنی بر سطح زمین ،TRN[۱۳]، مشهور می باشند [۲۵, ۲۶]. در این روشها، از اطلاعات ارتفاعی موجود مانند منحنی های میزان و یا مدل رقومی ارتفاعی زمین DEM، برای تعیین موقعیت مطلق سیستم پهپاد استفاده می شود. در این شیوه بین اطلاعات ارتفاعی اندازه گیری شده توسط سیستم پهپاد و اطلاعات ارتفاعی موجود، تناظریابی شده و تعیین موقعیت مطلق سیستم پهپاد از هم مختصات نمودن[۱۴] مدل رقومی موجود با داده های ارتفاعی اندازه گیری شده توسط سیستم پهپاد انجام می شود [۱۹]. اندازه گیری اطلاعات ارتفاعی توسط سیستم پهپاد به روشهای ارتفاع سنجی راداری[۱۵]، ارتفاع سنجی بارومتریک[۱۶] و یا با استفاده از روشهای مبتنی بر اخذ تصویر مانند بازسازی استریو [۱۵] یا بازسازی سه بعدی از طریق شار اپتیکی[۱۷] [۲۳]، انجام می شود. ارتفاع سنجی راداری برای تعیین موقعیت در سیستمهای ناوبری نظامی TERCOM[۱۸] [۱۵, ۲۷, ۲۸] و TERPROM[۱۹] [۲۹, ۳۰] و برای هدایت اتوماتیک موشکهای کروز از سال ۱۹۶۱ مورد استفاده بوده است که دارای دقتی در ۱۰ تا ۵۰ متر می باشند [۲۶, ۲۹] (شکل ۱).

از زوج تصاویر اخذ شده توسط پهپاد برای استخراج اطلاعات ارتفاعی از طریق بازسازی استریو[۲۰] برای مناطقی که عوارض مصنوعی مانند جاده، منطقه مسکونی، و ... وجود نداشته نباشد استفاده می شود [۱۵، ۲۴]. برای این منظور ابتدا یک نقشه ارتفاعی، REM[۲۱]، از تصاویر اخذ شده توسط پهپاد، به روش بازسازی استریو استخراج شده و سپس بین اطلاعات ارتفاعی موجود، DEM، و REM تهیه شده، تناظریابی انجام شده و موقعیت مطلق پهپاد از این روش تعیین می گردد [۱۹]. در [۲۳] از روش شار اپتیکی جهت تولید اطلاعات ارتفاعی از مسیر پرواز پهپاد استفاده شده است. در این پژوهش که بر روی داده های شبیه سازی انجام شده است تناظریابی بین مدل رقومی ارتفاعی تولید شده با مدل DEM مرجع در چند نقطه بین اطلاعات DEM موجود و اطلاعات REM تولید شده به روش شار اپتیکی و با استفاده از کرلیشن دو بعدی انجام شده و نتایج این مرحله برای تعیین پارامترهای مقیاس، شیفت سه بعدی و دوران بین مدلها نسبت به هم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مزیت روش شار اپتیکی دقت خوب آن در نتیجه زیاد بودن تعداد نقاط مورد استفاده در تناظریابی در تعیین موقعیت سیستم پهپاد و همچنین استفاده از تنها یک دوربین می‌باشد [۲۳]. دقت تعیین موقعیت با روشهای TRN بطور مستقیم تحت تأثیر دقت مدل DEM مورد استفاده می باشد [۲۳].

[۱۳] Terrain-Referenced Navigation
[۱۴] Registration
[۱۵] Radar Altimetry
[۱۶] Barometric Altimetry
[۱۷] Optical Flow
[۱۸] TERrain COntour Matching
[۱۹] TERrain PROfile Matching).
[۲۰] Stereo Reconstruction
[۲۱] Recovered Elevation Map



شکل ۱: مسیر یابی با استفاده از روش TRN

از جمله مزایای روشهای TRN می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- پایدار بودن نسبت به روشنایی محیط و تغییرات آن: محاسبات تعیین موقعیت بر اساس تناظریابی بین داده های ارتفاعی و کرلیشن بین آنها انجام می شود و این محاسبات مستقل از اختلاف روشنایی می باشند [۱۸].
۲- کارآمدی در مناطق کوهستانی که عوارضی هندسی منظم و مصنوعی به ندرت وجود دارد. روشهای TRN به این علت که تنها نیاز به استفاده از اطلاعات ارتفاعی دارند در مناطق کوهستانی نتایج بهتری را نسبت سایر روشها ارائه می دهند.
۳- پایین بودن هزینه محاسباتی این روشها در مقایسه با سایر روشها به علت پایین بودن حجم اطلاعات مورد پردازش [۲۴].

با این حال، روشهای TRN دارای معایبی هستند که مهمترین آنها عبارتند از:

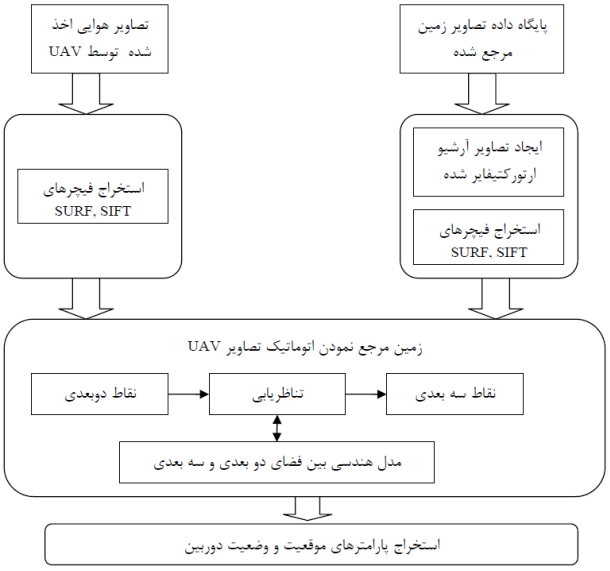
۱- معلوم بودن موقعیت تقریبی پهپاد در حین اخذ اطلاعات نسبت به سیستم مختصات زمینی. این موقعیت تقریبی از آخرین داده های GPS قبل از قطع سیگنال و یا برای یک بازه زمانی محدود از داده های INS بدست می آیند [۲۵].
۲- در مناطقی که تغییرات ارتفاعی چندانی وجود نداشته باشد مانند زمینهای پست و هموار، مناطق پوشیده از آب، دقت تعیین موقعیت با این روشها به دلیل پایین بودن محتوای اطلاعاتی کم خواهد بود [۱۵, ۲۹].

برای افزایش دقت و کارآمدی روشهای TRN می توان از ایجاد مسیرهای حلقوی برای پرواز توسط پهپاد استفاده نمود [۲۳]. به این ترتیب می توان با استفاده از روشهای سرشکنی و با معلوم بودن مقدار خطای بست مسیر طی شده دقت پارامترهای حاصل از این روش را افزایش داد. همچنین در روشهای مبتنی بر شار اپتیکی جهت افزایش سرعت پردازش و محاسبات آنلاین می توان از محاسبات سخت افزاری برای تولید شار اپتیکی استفاده نمود [۲۳, ۳۱]. برای استخراج پارامترهای جابجایی دوربین و تغییر وضعیت دوربین در روشهای TRN مبتنی بر تصویر نیز می توان از روابط هموگرافی استفاده نمود [۲۵].

۲-۲- تعیین موقعیت مطلق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و هوایی آرشیو

با استفاده از هم مختصات نمودن تصاویر اخذ شده توسط سیستم پهپاد به تصاویر ماهواره‌ای و هوایی زمین مرجع شده موجود و با قدرت تفکیک بالا، پارامترهای موقعیت و وضعیت دوربین مستقر در سیستم پهپاد از طریق ترفیع فضایی و محاسبات شرط هم خطی قابل استخراج می باشد. برای هم مختصات نمودن تصاویر پهپاد به تصاویر زمین مرجع شده

استفاده از الگوریتمهای مختلف مانند ROHM[۲۲] [۱۵, ۳۲]، تبدیل فوریه [۳۳, ۳۴] تناظریابی فیچرهای نقطه‌ای بین تصاویر اخذ شده توسط پهپاد و تصاویر آرشیو، مانند الگوریتمهای SIFT[۲۳] [۳۵, ۳۶] یا SURF[۲۴] [۳۷, ۳۸]، تناظریابی فیچرهای گروهی FGM[۲۵] [۲۰, ۳۹]، الگوریتم تناظریابی فازی [۱۴] پیشنهاد شده است. شکل ۲ روند انجام محاسبات در این روش را نشان می دهد. در این روشها برای انجام سریع محاسبات در حین پرواز، تصاویر زمین مرجع شده آرشیو، پیش از پرواز مورد پردازش قرار گرفته و یک سری نقاط مناسب[۲۶] (فیچرهای نقطه‌ای[۲۷]) در آنها شناسایی شده و به همراه توصیفگرهای[۲۸] هر نقطه استخراج شده و در یک پایگاه داده ساختار بندی شده و در روی کامپیوتر مستقر بر روی پهپاد ذخیره می شوند [۳۷]. در حین پرواز پهپاد نیز، تصاویر اخذ شده توسط دوربین مستقر بر روی پهپاد، مورد پردازش قرار گرفته و فیچرهای نقطه‌ای و بردارهای توصیفگر مربوطه استخراج شده و محاسبات رجیستر نمودن تصاویر پهپاد با تصاویر موجود و از پیش تهیه شده در پایگاه داده تصاویر انجام می‌گردد. در نهایت پارامترهای وضعیت و موقعیت دوربین از طریق مدلهای هندسی ترفیع فضایی استخراج می گردد.



شکل ۲: روند تعیین موقعیت پهپاد با استفاده از رجیستر نمودن تصویر پهپاد به تصویر آرشیو زمین مرجع شده

مزایای روش مبتنی بر رجیستر نمودن تصاویر پهپاد با تصاویر موجود را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- امروزه تصاویر زمین مرجع آرشیو در قدرت تفکیکهای مکانی مختلف براحتی قابل دسترس می باشند و حتی از سرویسهایی شبیه Google Earth نیز می توان برای تهیه این تصاویر استفاده نمود. در [۱۵] و [۲۰] از تصاویر هوایی و تصاویر ماهواره ای، در [۱۵] از تصاویر ماهواره ای آیکونوس یک متری و در [۲۱] از تصاویر Google Earth استفاده شده است.

۲- با توجه به اینکه استفاده از دوربین در سیستمهای پهپاد به صورت مونو یا استریو برای کاربردهای بازرسی و ثبت وقایع رایج می باشد و دوربینهای مورد استفاده وزن زیادی ندارند می توان به راحتی از این روش برای

[۲۲] Robust-Oriented Hausdorff Measure
[۲۳] Scale-Invariant Feature Transform
[۲۴] Speeded Up Robust Features
[۲۵] Feature Group Matching
[۲۶] Interest Point
[۲۷] Point Feature
[۲۸] Descriptor

ناوبری سیستمهای پهپاد استفاده نمود بدون آنکه بار زیادی به لحاظ وزنی بر پهپاد تحمیل گردد. استفاده از دوربین ویدئویی [۱۷] و یا دوربین های تک فریم [۱۵, ۱۶] و یا به صورت توام امکانپذیر می باشد.

۳- با توجه به اینکه دوربین تحت تأثیر سیگنالهای خارجی قرار ندارد بنابراین احتمال از کار افتادن آن توسط سیگنالهای مخرب و سیستمهای جنگ الکترونیک نیز وجود نخواهد داشت.

۴- دقت تعیین موقعیت پهپاد با استفاده از هم مختصات نمودن تصاویر پهپاد به تصاویر آرشیو نسبتا بالا می باشد. در [۱۶] دقتی در حد چند متر برای موقعیت و در حد چند صدم درجه برای پارامترهای وضعیت دوربین گزارش شده است.

۵- در این روش علاوه بر اینکه می توان از تصاویر اخذ شده توسط پهپاد، موقعیت مطلق سیستم پهپاد را تعیین نمود بلکه می توان با استفاده از محاسبات تقاطع و ترفیع برای تعیین موقعیت نسبی و به عنوان یک سیستم ناوبری بصری اینرشیال[۲۹] استفاده کرد [۲۵, ۴۰, ۴۱].

معایب روش مبتنی بر هم مختصات نمودن تصاویر پهپاد با تصاویر موجود را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- نیاز به معلوم بودن موقعیت تقریبی سیستم پهپاد جهت امکان رجیستر نمودن تصاویر پهپاد به تصاویر آرشیو. به همین منظور برای محدود کردن منطقه جستجو در تصاویر آرشیو برای رجیستر نمودن تصاویر پهپاد، از داده های تقریبی INS استفاده می شود. در [۱۵] زمانی از این روش استفاده شده است که موقعیت پهپاد با دقتی در حد ۴۰۰ متری معلوم بوده باشد.

۲- وابستگی به وجود فیچرهای نقطه‌ای مناسب در منطقه پرواز. این روش بطور عمده در مناطقی که دارای عوارض مصنوعی مانند جاده، خانه، منطقه شهری می باشند کاربرد دارد. بنابراین در مناطق بیابانی و کوهستانی استفاده از این روش ممکن است به نتیجه نرسد. برای غلبه بر این مشکل در مناطق کوهستانی از روش TRN استفاده شده است [۱۵].

۳- وابستگی به شرایط محیطی. وجود ابر و مه باعث عدم امکان استفاده از این روش خواهد شد.

۴- وابستگی به تغییرات روشنایی و نیز فاصله زمانی بین زمان اخذ تصاویر آرشیو با تصاویر اخذ شده از پهپاد. برای غلبه بر این مشکل بایستی از اپراتورهای استخراج فیچرهای نقطه‌ای که در مقابل تغییرات روشنایی پایدار می باشند استفاده کرد [۴۲].

۵- وابستگی به ارتفاع پرواز و تغییرات آن. تغییرات ارتفاع پرواز باعث تغییر مقیاس عکسبرداری می شود. بنابراین در استخراج فیچرهای نقطه ای بایستی از روشهایی مانند SIFT [۳۵] استفاده شود که تا حدی نسبت به تغییرات مقیاس پایدار می باشند.

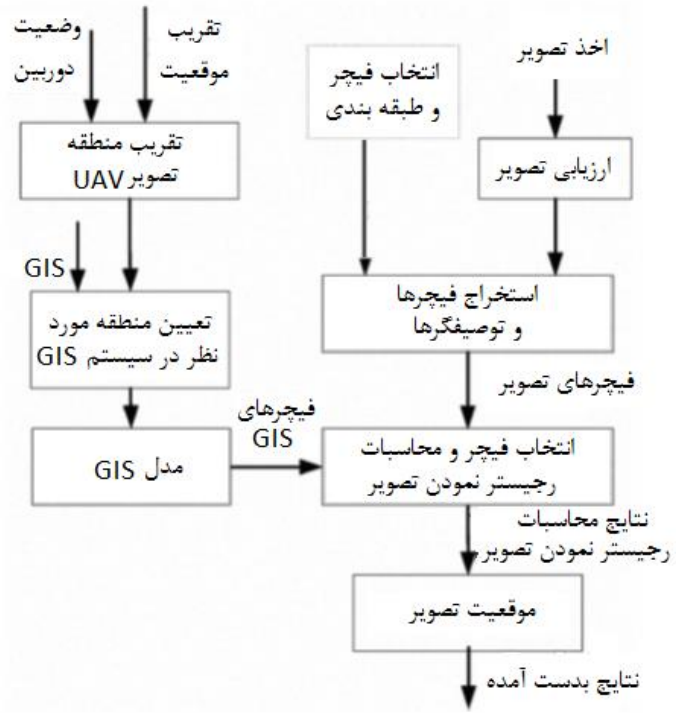
با توجه به اینکه در این شیوه از سنسور INS به همراه سنسور دوربین استفاده می شود در تعدادی از پژوهشها برای افزایش دقت نتایج از فیلتر کالمن توسعه یافته EKF[۳۰] [۴۳] برای تلفیق بین پارامترهای بدست آمده از این سنسورها استفاده شده است [۱۷, ۴۰]. همچنین در [۲۰] برای افزایش دقت هم مختصات نمودن تصاویر و حذف نقاط متناظر اشتباه از الگوریتم RANSAC [۴۴] و تناظریابی گروهی فیچرها FGM [۳۹] استفاده شده است.

۲-۳- تعیین موقعیت مطلق با استفاده داده های برداری و لایه های GIS

اطلاعات موجود در سیستمهای اطلاعات مکانی، GIS، که معمولا به صورت فرمت برداری در یک پایگاه داده ذخیره می شوند می توانند برای هم مختصات نمودن تصاویر اخذ شده از سیستم پهپاد مورد استفاده قرار می گیرد [۱۸, ۲۲]. در شکل ۳ روند اجرایی این روش به صورت نموداری نشان داده شده است.

[۲۹] Vision Based Inertial Navigation System
[۳۰] Extended Kalman Filter

در این شیوه تصاویر اخذ شده توسط پهپاد برای استخراج برخی عوارض خاص نقطه‌ای مانند ابتدا و انتهای جاده ها، تونلها، تقاطع جاده ها، و نیز برخی عوارض مانند مناطق مسکونی، باغها و سایر اطلاعات مفید، طبقه بندی و آنالیز می شوند. سپس این اطلاعات برای امکان مقایسه با داده های موجود در سیستم GIS، آماده ورود به سیستم GIS شده و در نهایت برای هم مختصات نمودن تصاویر پهپاد با داده های GIS مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۸, ۲۱, ۲۲, ۴۵]. از تناظریابی بین عوارض خطی مانند جاده ها و نقاطی مانند تقاطع جاده ها و نقاط ابتدایی و انتهایی جاده ها با داده های GIS [۴۵] برای هم مختصات نمودن تصاویر استفاده می شود [۲۲]. عوارض خطی و نقطه ای استخراج شده از تصاویر هوایی اخذ شده پس از فیلتر شدن آماده ورود به سیستم GIS گردیده و با تناظریابی بین این عوارض و داده های GIS موجود بر اساس روش ارائه شده در [۴۵]، تصاویر هوایی با داده های GIS هم مختصات شده و موقعیت سیستم پهپاد استخراج می شود. برای طبقه بندی نواحی اطراف لبه های موجود در تصاویر اخذ شده توسط سیستم پهپاد، پس از هم مقیاس شدن و همراستا شدن تصویر با لایه نقشه موجود بر اساس داده های ژیروسکوپ و ارتفاع سنج، لبه ها با استفاده از اپراتور لبه Canny [۴۶] استخراج شده و نواحی اطراف خطوط استخراج شده بر اساس یک حد آستانه فاصله‌ای با استفاده از طبقه بندی کننده ماگزیمم شباهت MLC[۳۱]، طبقه بندی می شوند [۱۸].



شکل ۳: روند اجرایی تعیین موقعیت پهپاد با استفاده از اطلاعات GIS

حسن روش مبتنی بر GIS عبارت است از:

۱- پایداری نسبت به تغییرات روشنایی محیط
۲- کاهش هزینه محاسباتی
۳- افزایش دقت رجیستر نمودن تصاویر به نقشه

معایب زیر نیز در این روش مشاهده می شوند:

[۳۱] Maximum Likelihood Classifier

۱- وابستگی به وجود عوارض مصنوعی و خطی
۲- وابستگی آن به ارتفاع پرواز سیستم پهپاد بخصوص در مناطق کوهستانی [۱۸, ۲۲].
۳- وابستگی به موقعیت تقریبی سیستم پهپاد و داده های بدست آمده از INS

۲-۴- روش ناوبری سماوی و استفاده از Star-Tracker

استفاده از ستارگان برای تعیین موقعیت، یکی از قدیمیترین روشهای تعیین موقعیت مطلق می باشد که از قرنها قبل توسط ژئودزینها و دریانوردان برای تعیین موقعیت و ناوبری مورد استفاده قرار می گرفت. این روش مبتنی بر استفاده از موقعیت معلوم اجرام سماوی (شامل خورشید، ماه و ستارگان) و اندازه گیریهای زاویه ای به آنها و نیز اندازه گیری زمان می باشد [۴۸, ۴۷]. از ستارگان آسمان توسط دوربین مستقر بر روی پهپاد تصویربرداری شده و با شناسایی ستارگان و با استفاده از مختصات معلوم ستارگان در لحظه تصویربرداری موقعیت طول و عرض جغرافیایی پهپاد و نیز پارامترهای وضعیت پهپاد از تصاویر اخذ شده قابل استخراج خواهد بود [۴۹]. در این شیوه از تجهیزاتی به نام Star-Tracker استفاده می شود که از این تجهیزات بطور عمده در ماهواره ها و هواپیماهای نظامی، استفاده می شود. دقت این روش از یک ثانیه کمانی تا ۲۰۰ ثانیه کمانی (۳۱ متر تا ۶۲۰۰ متر در شعاع ۶۴۰۰ کیلومتری زمین) بسته به نوع Star-Tracker مورد استفاده متغییر می باشد [۵۰، ۴۹]. البته تا کنون به غیر از یک عنوان [۵۱]، مقاله علمی یا گزارشی درباره استفاده از روش ناوبری سماوی و نیز استفاده از Star-Tracker در ناوبری پهپاد ها ارائه نشده است که می تواند به دلایل زیر باشد: اول، این روش قابل استفاده در روشنایی روز نبوده و در هنگام شب قابل انجام می باشد. دوم، ابعاد و وزن Star-Tracker های موجود در بازار (وزن بالاتر از 4kg و ابعاد بزرگتر از 15cm*15cm*30cm) خارج از میزان توانایی حمل پهپاد های عادی می باشد. البته اخیرا Star-Tracker هایی با وزن حدود یک کیلوگرم و کمتر (در حد صد گرم) و با ابعاد کوچکتر که قابل حمل توسط پهپاد های معمولی باشند نیز تولید شده است [۵۲، ۵۰] که می تواند شروعی برای استفاده از این روش برای ناوبری پهپاد باشد. سوم، دقت ناوبری با Star-Tracker پایین می باشد و برای پروازهای در ارتفاع پایین مناسب نمی باشد [۵۰، ۴۹].

۳- نتیجه گیری

در این مقاله روشهای مختلف تصویر مبنا که قابلیت استفاده در تعیین موقعیت مطلق پهپاد را دارا می باشند مورد بررسی قرار گرفت. کارایی و دقت هر روش به پارامترهای مختلفی وابسته می باشد و هر کدام از این روشها در شرایط خاصی نتایج بهتری را ارائه خواهند داد. نکته ای که در تمام این روشها قابل ذکر می باشد وابستگی همه این روشها به معلوم بودن موقعیت تقریبی پهپاد در زمان تصویر برداری می باشد و از این منظر هیچ کدام از این روشها قابلیت جایگزینی با سیستم GPS را نخواهند داشت. در صورت معلوم نبودن موقعیت تقریبی پهپاد این روشها کار آرائی نخواهند داشت. بنابراین برای استفاده از روشهای ناوبری و تعیین موقعیت با استفاده از اطلاعات مکانی موجود در مواقعی که موقعیت تقریبی پهپاد معلوم نیست و یا دقت بسیار پایینی دارد، بایستی راه حل مناسبی ارائه شود. این حالت می تواند در زمانهایی اتفاق بیفتد که پهپاد برای یک بازه زمانی طولانی نتواند موقعیت مطلق را با دقت خوب تعیین کند. این حالت ممکن است در مواقع زیر روی دهد:

۱- اطلاعات مکانی از منطقه کامل نباشد و گپ اطلاعاتی وجود داشته باشد.
۲- در اثر وجود موانع دید مانند مه یا ابر، و یا پرواز در شب هنگام پهپاد قادر به تصویربرداری نباشد. همچنین به علت ایجاد مات شدگی در تصویر به دلیل حرکت نسبی دوربین و زمین تصویر اخذ شده دارای محتوای مناسب نباشد.
۳- از لحظه قطع سیگنالهای GPS زمان زیادی گذشته باشد و خطای داده های INS بسیار زیاد باشد.

همچنین از نظر نرخ تعیین موقعیت روشهای تصویر مبنا حجم محاسباتی بالایی را می طلبند و با توجه به نیاز به تعیین موقعیت با نرخ حداقل یک هرتز، بایستی امکانات محاسباتی سریع و مناسبی بر روی سیستم پهباد مستقر باشد. بنابراین از این لحاظ نیز این روشها قادر به رقابت با سیستم GPS نمی باشند.

با توجه به مطالب بیان شده و محاسن و معایب روشهای ذکر شده می توان نتیجه گرفت که برای استفاده موثر از روشهای تصویر مبنا در تعیین موقعیت مطلق استفاده از چند روش در کنار همدیگر می تواند نواقص هر روش را برطرف نموده و بر کارایی کل سیستم بیفزاید.

مراجع

[1] J. Wendel, O. Meister, C. Schlaile, and G. F. Trommer, "An integrated GPS/MEMS-IMU navigation system for an autonomous helicopter," *Aerospace Science and Technology*, vol. 10, pp. 527-533, 2006.

[2] K. Nonami, F. Kendoul, S. Suzuki, W. Wang, and D. Nakazawa, *Autonomous Flying Robots: Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles*: Springer Science & Business Media, 2010.

[3] N. Bowditch, J. I. Bowditch, and U. S. H. Office, *The New American Practical Navigator*: New York: EM Blunt,[1802-18--], 1811.

[4] H. M. Choset, *Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation*: MIT press, 2005.

[5] M. Kayton and W. R. Fried, *Avionics navigation systems*: John Wiley & Sons, 1997.

[6] S. Gleason and D. Gebre-Egziabher, *GNSS applications and methods*: Artech House, 2009.

[7] Q. Yu, Y. Shang, X. Liu, Z. Lei, X. Li, X. Zhu, *et al.*, "Full-parameter vision navigation based on scene matching for aircrafts," *Science China Information Sciences*, vol. 57, pp. 1-10, 2014.

[8] K. P. Valavanis and G. J. Vachtsevanos, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*: Springer, 2015.

[9] R. P. Collinson, *Introduction to avionics systems*: Springer Science & Business Media, 2013.

[10] J. McDonald, M. Kaess, C. Cadena, J. Neira, and J. J. Leonard, "Real-time 6-DOF multi-session visual SLAM over large-scale environments," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, pp. 1144-1158, 2013.

[11] R. Rodrigues, H. Shiguemori, C. Forster, and S. Pellegrino, "Color and Texture Features for Landmarks Recognition on UAV Navigation," *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2009.

[12] N. El-Sheimy, E.-H. Shin, and X. Niu, "Kalman filter face-off: Extended vs. unscented kalman filters for integrated gps and mems inertial," *Inside GNSS*, vol. 1, pp. 48-54, 2006.

[13] D. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown inertial navigation technology* vol. 17: IET, 2004.

[14] N. El-Sheimy, "Emerging MEMS IMU and Its Impact on Mapping Applications," in *Photogrammetric Week*, 2009.

[15] 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, pp. 1-18, 2002.

[16] F. Samadzadegan, M. Hahn, and S. Saeedi, "Position estimation of aerial vehicle based on a vision aided navigation system," *Proceedings of Visualization and Exploration of Geospatial Data, Stuttgart*, 2007.

[17] G. Conte and P. Doherty, "An integrated UAV navigation system based on aerial image matching," in *Aerospace Conference, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1-10.

[18] 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.

[19] D.-G. Sim and R.-H. Park, "Localization Based on the Gradient Information for DEM matching," in *MVA*, 1998, pp. 266-269.

[20] 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, pp. 157-168, 2011.

[21] F. Lindsten, J. Callmer, H. Ohlsson, D. Törnqvist, T. B. Schön, 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.

[22] 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.

[23] 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, pp. 590-595.

[24] 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.

[25] 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, pp. 489-497, 2013.

[26] P. D. Groves, *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems*: Artech house, 2013.

[27] J. P. Golden, "Terrain contour matching (TERCOM): a cruise missile guidance aid," in *24th Annual Technical Symposium*, 1980, pp. 10-18.

[28] X.-w. LI, J.-y. LIU, and G.-h. KANG, "Development and application of TERCOM elevation-aided navigation system [J]," *Journal of Chinese Inertial Technology*, vol. 1, pp. 34-40, 2006.

[29] G. M. Siouris, *Missile guidance and control systems*: Springer Science & Business Media, 2004.

[30] M. Cowie, N. Wilkinson, and R. Powlesland, "Latest development of the TERPROM® Digital Terrain System (DTS)," in *Proceedings of IEEE/ION PLANS 2008*, 2001, pp. 1219-1229.

[31] K. Janschek, V. Tchernykh, S. Dyblenko, and B. Harnisch, "Compensation of the attitude instability effect on the imaging payload performance with optical correlators," *Acta Astronautica*, vol. 52, pp. 965-974, 2003.

[32] D.-G. Sim and R.-H. Park, "Two-dimensional object alignment based on the robust oriented Hausdorff similarity measure," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 10, pp. 475-483, 2001.

[33] H. Bülow and A. Birk, "Fast and robust photomapping with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)," in *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, 2009, pp. 3368-3373.

[34] S. Dawn, V. Saxena, and B. Sharma, "Remote sensing image registration techniques: a survey," in *Image and Signal Processing*, ed: Springer, 2010, pp. 103-112.

[35] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International journal of computer vision*, vol. 60, pp. 91-110, 2004.

[36] F. Samadzadegan and G. Abdi, "Autonomous navigation of Unmanned Aerial Vehicles based on multi-sensor data fusion," in *Electrical Engineering (ICEE), 2012 20th Iranian Conference on*, 2012, pp. 868-873.

[37] 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.

[38] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, "Surf: Speeded up robust features," in *Computer vision–ECCV 2006*, ed: Springer, 2006, pp. 404-417.

[39] A. Ascani, E. Frontoni, A. Mancini, and P. Zingaretti, "Feature group matching for appearance-based localization," in *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, 2008, pp. 3933-3938.

[40] S. Zhao, F. Lin, K. Peng, B. M. Chen, and T. H. Lee, "Homography-based vision-aided inertial navigation of UAVs in unknown environments," in *Proc. 2012 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2012.

[41] F. Caballero, L. Merino, J. Ferruz, and A. Ollero, "Vision-based odometry and SLAM for medium and high altitude flying UAVs," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 54, pp. 137-161, 2009.

[42] C. Fernandez-Maloigne, *Advanced color image processing and analysis*: Springer Science & Business Media, 2012.

[43] S. Haykin, *Kalman filtering and neural networks* vol. 47: John Wiley & Sons, 2004.

[44] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Communications of the ACM*, vol. 24, pp. 381-395, 1981.

[45] C.-F. Zhu, S.-X. Li, H.-X. Chang, and J.-X. Zhang, "Matching road networks extracted from aerial images to GIS data," in *Information Processing, 2009. APCIP 2009. Asia-Pacific Conference on*, 2009, pp. 63-66.

[46] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, pp. 679-698, 1986.

[47] J. Karl, *Celestial Navigation in the GPS Age*: Paradise Cay Publications, 2007.

[48] M. Kayton and W. R. Fried, *Avionics navigation systems*: John Wiley & Sons, 1997.

[49] F. Pappalardi, S. Dunham, M. LeBlang, T. Jones, J. Bangert, and G. Kaplan, "Alternatives to GPS," in *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, 2001, pp. 1452-1459.

[50] T. Segert, S. Engelen, M. Buhl, and B. Monna, "Development of the Pico Star Tracker ST-200–Design Challenges and Road Ahead," 2011.

[51] P. Sorensen, "Star Tracker Augmented Inertial Navigation System for High Altitude UAV, " *Navy SBIR FY2008.1*, *http://www.navysbir.com/08_1/188.htm*, 2008.

[52] J. L. Jørgensen, T. Denver, M. Betto, and P. S. Jørgensen, "Microasc-a miniature star tracker," *Technical University of Denmark, Dept. of Measurement and Instrumentation*, 2001.