

# Automatic Navigation of Aerial Vehicles on a Vision-Aided Navigation System

F. Samadzadegan<sup>1</sup> and Gh. Abdi<sup>2\*</sup>

1,2. Dept. of Surveying and Geomatics Engineering, College of Engineering, University of Tehran

\* North Amirabad, Tehran, IRAN

[ghasem.abdi@ut.ac.ir](mailto:ghasem.abdi@ut.ac.ir)

*The increase in capability and performance of digital cameras, processors and image processing algorithms has caused vision-aided navigation of aerial vehicles to be a hot research of interest. In order to determine pose parameters from vision-aided navigation methods, it is common to use automatic image registration using information of reference databases. However, solving registration issue in automatic navigating of aerial vehicles has been considered a complex manner. In this paper, a novel method for vision-aided navigation of aerial vehicles to increase reliability and accuracy of geo-referencing aerial image is proposed. To have robust evaluation, different aerial images with variety of conditions are utilized to assess this method. Obtained results show high performance of proposed method to solve issues related to automatic GEO-referencing of aerial images.*

**Keywords:** Unmanned aerial vehicles, Global positioning system, Inertial navigation system, Aided navigation systems, Vision-aided navigation system, Pose estimation, Image geo-referencing, Feature extraction

---

1. Associate Professor  
2. M. Sc. (Corresponding Author)

# ناوبری اتوماتیک سکوهای پرنده بر مبنای یک سیستم کمک ناوبری بینایی مبنای

فرهاد صمدزادگان<sup>۱</sup> و قاسم عبدی<sup>۲\*</sup>

۱ و ۲- گروه مهندسی نقشه برداری و ژئوماتیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران

\* تهران - امیرآباد شمالی

ghasem.abdi@ut.ac.ir

در سال‌های اخیر با افزایش قابلیت و کارایی دوربین‌های رقومی، پردازشگرها و توسعه الگوریتم‌های پردازش تصاویر، روش‌های ناوبری هوایی بینایی مبنای به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های سایر سامانه‌های ناوبری مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در این روش‌ها به‌منظور تعیین پارامترهای ناوبری، عمدتاً از تناظریابی اتوماتیک تصویر اخذ شده توسط یک سنجنده با اطلاعات موجود در یک پایگاه داده مرجع استفاده می‌شود. از آنجا که حل مسئله تناظریابی در ناوبری اتوماتیک سکوهای پرنده با پیچیدگی‌های فراوانی مواجه است، در این تحقیق روشی نوین در زمینه ناوبری بینایی مبنای سکوهای پرنده به‌منظور افزایش قابلیت اعتماد، سرعت و دقت فرآیند زمین مرجع‌سازی تصاویر هوایی ارائه شده است. به‌منظور ارزیابی توانایی روش ارائه شده، پارامترهای توجیه یک سنجنده هوایی در مناطق با پیچیدگی‌های مختلف و با شرایط متفاوت تعیین شد. نتایج حاصل بیانگر توانایی روش ارائه شده به‌منظور حل مشکلات مطرح در روند زمین مرجع کردن اتوماتیک تصاویر هوایی و افزایش دقت و صحت سامانه ناوبری بینایی مبنای است.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم تعیین موقعیت جهانی، سیستم ناوبری اینرسی، سامانه‌های کمک ناوبری، ناوبری مبتنی بر عوارض زمین، تعیین موقعیت و وضعیت سکوهای پرنده، هم‌مرجع کردن تصاویر، استخراج عوارض، تناظریابی عوارض

## مقدمه

موقعیت و ناوبری افزایش یافته و ادغام اطلاعات این سنجنده‌ها سیستمی را ایجاد می‌کند که قابلیت‌های بیشتری نسبت به هر کدام از سنجنده‌ها دارد [۲]. در این راستا سیستم‌های ناوبری اینرسی<sup>۳</sup>، بردار وضعیت را با استفاده از مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌ها نسبت به نقطه اولیه، به‌صورت نسبی محاسبه می‌کنند. لیکن به‌دلیل خاصیت تجمعی خطاها در طول زمان [۳]، اینگونه سیستم‌ها باید توسط سیستم‌هایی که موقعیت لحظه‌ای خود را فارغ از موقعیت نقاط قبلی محاسبه می‌کنند (نظیر سیستم‌های تعیین موقعیت جهانی ماهواره‌ای<sup>۴</sup>)، به‌طور مرتب مقادردهی اولیه شوند [۴-۱۲]. از سوی دیگر استفاده از

ناوبری و کنترل موقعیت و وضعیت سکوهای پرنده اغلب بر اساس پارامترهای موقعیت، سرعت و شتاب سکو، زوایای دورانی، زاویه انحراف از مسیر طراحی شده، ارتفاع از سطح زمین و فاصله سکو تا عوارض موجود در میدان دید آن، و عموماً با استفاده از تلفیق سامانه‌های مختلف ناوبری و کمک ناوبری انجام می‌گیرد [۱]. در این راستا در سال‌های اخیر با به‌کارگیری از سیستم‌های ناوبری چندسنجنده‌ای، قابلیت اعتماد، صحت و دقت تعیین

۱. دانشیار

۲. کارشناسی ارشد (نویسنده مخاطب)

3. Inertial Navigation Systems (INS)

4. Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

**جدول ۱- مقایسه مزایا و معایب سیستم‌های ناوبری اینرشیتال، تعیین موقعیت جهانی و مبتنی بر عوارض زمین**

معایب	مزایا	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- افزایش خطاهای سنجنده با زمان</li> <li>- قیمت زیاد در مورد سیستم‌های دقیق</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- سیستم غیرفعال</li> <li>- سیستم خودکفا و مستقل با امکان خود کالیبراسیون</li> <li>- اخذ اطلاعات با پوشش سراسری و بدون قطع‌شدگی</li> <li>- تعیین شش درجه آزادی به صورت دائم</li> <li>- نمونه‌برداری با سرعت زیاد</li> <li>- قابلیت اعتماد بالا</li> </ul>	سیستم ناوبری اینرشیتال
<ul style="list-style-type: none"> <li>- عدم گزارایی در زیر آب، زیرزمین، نواحی جنگلی و متراکم شهری</li> <li>- سرعت پایین نمونه‌برداری</li> <li>- زمان ابهام طولانی به ویژه در مورد فاصله‌های طولانی یا وجود نوبزهای محیطی</li> <li>- قابلیت تهیه اطلاعات موقعیتی دقیق به شرط وجود سیگنال پیوسته و هندسه مناسب ماهواره‌ها</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- دقت بالا در تخمین موقعیت و برآورد سرعت</li> <li>- مستقل از زمان</li> <li>- تخمین وضعیت به وسیله DGPS با دقت تعدیل یافته</li> <li>- سبک، جرم و توان الکتریکی مناسب برای سکوها</li> <li>- مختلف</li> </ul>	سیستم تعیین موقعیت جهانی
<ul style="list-style-type: none"> <li>- عدم امکان استفاده در شب و شرایط بد آب و هوایی</li> <li>- وابستگی مستقیم دقت تعیین موقعیت به دقت پایگاه اطلاعات مرجع</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- سیستم غیرفعال</li> <li>- امکان کسب اطلاعات پیوسته و با پوشش سراسری</li> <li>- دقت و قابلیت اعتماد بالا در تعیین موقعیت و وضعیت سکو</li> <li>- تعیین شش درجه آزادی</li> <li>- قابلیت به‌کارگیری اطلاعات تصویری در سایر مقاصد</li> <li>- بینائی مینا، اکتشافی و امنیتی</li> </ul>	سیستم ناوبری مبتنی بر عوارض زمین

سیستم‌های تعیین موقعیت جهانی ماهواره‌ای با توجه به خطاها و پارازیت‌های مختلف، عدم پوشش جامع و امکان قطع سیگنال، با مشکلات و محدودیت‌های متعددی مواجه است. در این میان بسیاری از محققان، ناوبری مبتنی بر عوارض زمین<sup>۵</sup> را به‌عنوان یک سیستم ناوبری کارا و دقیق، به منظور غلبه بر محدودیت در دسترسی یا خطاهای بارز سایر سامانه‌های ناوبری، پیشنهاد کرده‌اند [۳] و [۱۲-۱۷].

در سال‌های اخیر با پیشرفت سیستم‌های تصویربرداری رقومی، بهبود در دقت، کیفیت و قدرت تفکیک مکانی تصاویر، و همچنین افزایش کارایی الگوریتم‌های پردازش تصاویر، استفاده از تصاویر به‌عنوان منبع غنی اطلاعات به منظور کمک به ناوبری سکوها پرنده<sup>۶</sup>، در سیستم‌های ناوبری تلفیقی بطور وسیعی گسترش یافته است [۱۷-۱۹]. در این روش‌ها تصاویر مسیر مورد نظر ذخیره شده و این اطلاعات با تصویر اخذ شده توسط دوربین نصب شده بر روی سکو مقایسه می‌شود و تصحیحات لازم برای اصلاح مسیر محاسبه می‌شود [۵، ۱۲]. در این روش‌ها موقعیت لحظه‌ای سکوی هوایی، تقریباً فارغ از وضعیت‌های قبلی آن محاسبه شده و لذا در طولانی مدت دچار خطاهای فاحش نظیر دریافت سیستم ناوبری اینرشیتال نمی‌شود. همچنین به‌دلیل غیرفعال بودن و پوشش سراسری سیستم‌های ناوبری بینائی مینا، از آن‌ها به‌عنوان جایگزین (یا تکمیل‌کننده) ناوبری رادیویی استفاده می‌شود. در مقایسه با سایر روش‌های ناوبری، ناوبری مبتنی بر عوارض زمین یک روش مستقل بوده و نیازی به یک سیستم ناوبری مجزا نظیر سیستم ناوبری اینرشیتال، جهت تبدیل پارامترهای اندازه‌گیری شده از سیستم مختصات بدنه به سیستم مختصات اینرشیتال ندارد [۲۰]. به‌علاوه سنجنده‌های بینائی مینا<sup>۷</sup> علاوه بر ناوبری، در تشخیص هدف و موقعیت دقیق آن<sup>۸</sup>، تهیه نقشه و موزائیک عکسی، ردیابی و مانیتورینگ عوارض<sup>۹</sup> نیز کاربرد دارند. لیکن علیرغم مزایای فوق، دقت در این روش اغلب وابسته به دقت اطلاعات نقشه‌ها یا تصاویر ذخیره شده در حافظه‌ی سکو است. در جدول (۱) مشخصات کلی سیستم‌های ناوبری اینرشیتال، تعیین موقعیت جهانی و مبتنی بر عوارض زمین ارائه شده است.

هدف از این تحقیق، طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم کمک ناوبری بینائی مینا به منظور محاسبه پارامترهای موقعیت و وضعیت<sup>۱۰</sup> سکوها هوایی است. در ادامه، مروری بر تحقیقات انجام شده و مفاهیم روش پیشنهادی شامل پردازش اطلاعات بینائی مینا، زمین مرجع کردن تصاویر<sup>۱۱</sup> و محاسبه پارامترهای ناوبری سکو مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در زمینه پیاده‌سازی و استفاده عملی از روش ارائه شده، آزمایش‌های عملی و ارزیابی آن‌ها بیان شده و در نهایت خلاصه‌ای از نتایج کسب شده به‌همراه پیشنهادها ارائه می‌شود.

5. Terrain Based Navigation (TBN)  
6. Aerial Vehicles  
7. Vision Based Sensors  
8. Automatic Target Recognition (ATR)  
9. Object Tracking

10. Pose Parameters  
11. Image Geo-referencing

## مروری بر تحقیقات انجام شده

مراتبی استفاده شده است. کوتاه<sup>۱۴</sup> و دوهرتی<sup>۱۵</sup> [۱۴] در سال ۲۰۰۸ میلادی، یک سیستم تلفیقی به منظور ناوبری سکوهای هوایی بر مبنای تناظریابی تصاویر، پیاده سازی کردند. در این روش، که بر مبنای انطباق لبهها تصاویر ویدئویی را با هم تثبیت می کند، از یک ارتفاع سنج برای رفع جابه جایی ناشی از اختلاف ارتفاع استفاده می شود. کابالرو<sup>۱۶</sup> و همکاران [۲۴] نیز در سال ۲۰۰۸، یک سیستم مسافت سنج را بر مبنای تصاویر، برای ناوبری در سکوهای هوایی بدون سرنشین پیشنهاد کرده اند. در این روش با استفاده از تصاویر منفرد به وسیله تکنیک شار نوری<sup>۱۷</sup> موقعیت نسبی محاسبه شده و مقیاس تصاویر با استفاده از یک ارتفاع سنج لیزری محاسبه می گردد. همچنین در زمینه ناوبری بینایی مبنا، روش هایی مشابه روش پیشنهادی توسط صمدزادگان و همکاران به منظور توسعه تکمیلی این روش ارائه شده است. مرور کلی این روش ها در مرجع [۲۵] آمده است.

در این تحقیق سعی در ارائه روشی نوین در زمینه ناوبری بینایی مبناست که ضمن بهره گیری از فن های ارائه شده در تحقیقات انجام گرفته، دقت و قابلیت اعتماد ناوبری را افزایش داده و موقعیت مطلق سکو را مستقل از موقعیت های پیشین تعیین کند. در این روش تعیین پارامترهای ناوبری سکو بر مبنای هم مرجع سازی تصویر هوایی اخذ شده توسط سکو و تصاویر زمین مرجع ماهواره ای و ارتو شده است.

## روش پیشنهادی

در این تحقیق، روشی نوین در زمینه ناوبری بینایی مبنا طراحی و پیاده سازی شده است که بتواند با استفاده از تصاویر ماهواره ای مرجع، موقعیت و وضعیت مطلق سکو را نسبت به زمین مشخص کند. در این راستا روش پیشنهادی به دو مرحله پیش از پرواز و در حین پرواز تقسیم بندی می شود.

مرحله پیش از پرواز شامل پردازش و آماده سازی پایگاه داده های مکانی مرجع با توجه به مقیاس نقشه، وسعت منطقه، دقت تعیین موقعیت و طراحی مسیر سکو است. در این راستا، ابتدا تصاویر ماهواره ای توسط نقشه و DSM<sup>۱۸</sup> منطقه زمین مرجع و ارتو می شود، سپس عوارض و توصیفگرهای هر عارضه توسط الگوریتم ASIFT<sup>۱۹</sup> که نسبت به تمامی پارامترهای افاین مستحکم است [۲۶] استخراج، و در کتابخانه سیستم ذخیره می شوند.

استفاده از سیستم های کمک ناوبری بینایی مبنا از اواسط دهه ۸۰ میلادی برای هدایت و تعیین دقیق موقعیت هدف [۲۱] آغاز و در طی سال های اخیر روش های مختلفی برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته است. اهم تحقیقات انجام گرفته در این زمینه بر مبنای تعیین موقعیت سکو با استفاده از موزائیک فریم ها و در حقیقت ایجاد یک سیستم «مسافت سنج تصویری» است که جهت حرکت و مسافت را نمایش می دهد. کاناتا<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۲] در سال ۱۹۹۸ میلادی با استفاده از اطلاعات ارتفاع سنجی تله متری، تصویر ویدئویی اخذ شده را به یک ارتوفتو با سیستم تصویر ارتوگونال تبدیل کرده و پارامترهای سنجنده را به وسیله فیلتر کالمن برای بیان پیوستگی زمانی، بهنگام کرده اند. در روش دیگری که توسط کومار و همکاران [۲۲] ارائه شده است، بجای ارتوکردن فریم ویدئویی، از ناحیه مربوطه در تصویر مرجع، تصویر پرسپکتیوی ساخته می شود. در این روش، از موزائیک تصاویر که محتوای اطلاعاتی بیشتری دارد استفاده می شود تا در مناطقی که حاوی اطلاعات رادیومتریک ضعیف هستند، مؤثر باشد. در این روش، تناظریابی بر اساس ساختار سلسله مراتبی در دو مرحله کلی - محلی انجام می گیرد. مقاله دیگری توسط ویلز<sup>۱۳</sup> و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۰۱ میلادی انتشار یافته است که مشابه روش کومار است؛ با این تفاوت که به جای در نظر گرفتن موزائیک های ویدئویی، از موزائیک تنها سه فریم کلیدی که با یکدیگر ۵۰٪ هم پوشانی دارند، استفاده می شود. پس از آن، نقاط متناظر سازگار با مدل هم ترازی در یک ساختار سلسله مراتبی سه لایه، استخراج می شوند. روش پیشنهادی توسط سیم و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۰۲ میلادی، از دو بخش تعیین موقعیت نسبی و مطلق تشکیل شده است. بخش تعیین موقعیت نسبی، موقعیت سکو را با استفاده از مجموع جابجایی های نسبی استخراج شده از فریم های متوالی، و بخش تعیین موقعیت مطلق، برای محدود کردن خطاهای تجمعی ناشی از تعیین موقعیت نسبی، موقعیت سکو را با استفاده از تناظریابی تصاویر و مدل ارتفاعی سطح زمین با اطلاعات مرجع محاسبه می کند. روش ارائه شده در سال ۲۰۰۷ میلادی توسط صمدزادگان و همکاران [۱۶، ۱۹]، به منظور ناوبری بینایی مبنا سکوهای پرنده بر مبنای هم مرجع سازی اتوماتیک تصاویر هوایی اخذ شده توسط سکو با پایگاه اطلاعات مرجع، از یک روش تناظریابی عارضه ای بر مبنای معیارهای مختلف تشابه هندسی و رادیومتریک در قالب ساختار سلسله

14. Conte

15. Doherty

16. Caballero

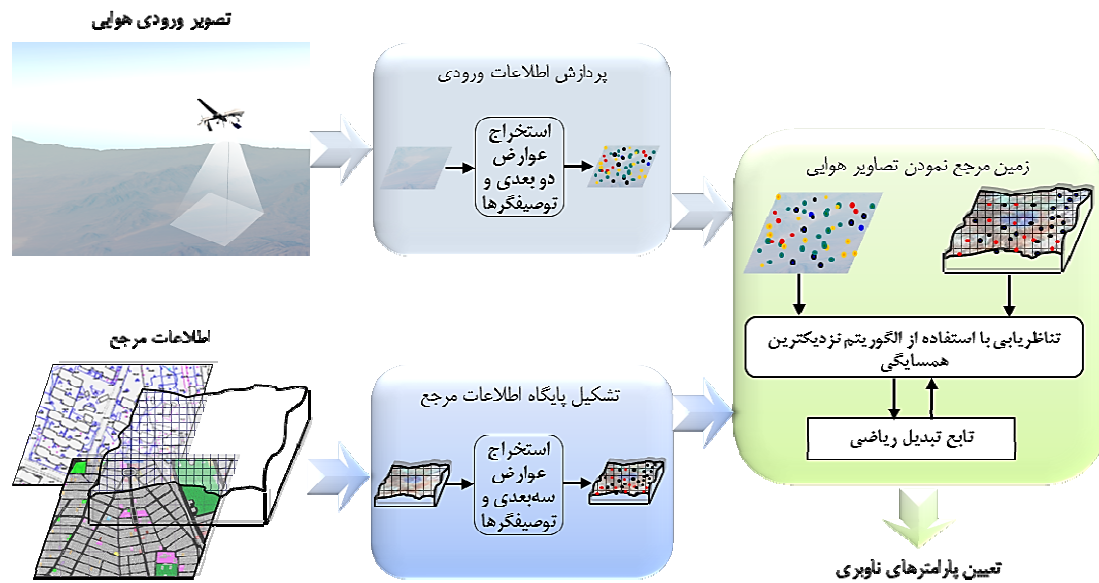
17. Optical Flow

18. Digital Surface Model

19. Affine-SIFT

12. Cannata

13. Wiles



شکل ۱- ساختار و مراحل روش پیشنهادی

مکانی مرجع را با سرعت، دقت و قابلیت اعتماد زیاد فراهم می‌سازد. سپس بر مبنای ساختار فوق، کتابخانه مرجع سیستم با لایه‌های مختلف اطلاعاتی نظیر تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های سه‌بعدی و مدل رقومی ارتفاعی منطقه، مختصات عوارض استخراج شده و بردار توصیفگر ویژگی عوارض، ایجاد می‌شود. در نهایت از این پایگاه مرجع به‌عنوان زیرساختی کارا به‌منظور زمین مرجع کردن اتوماتیک تصاویر هوایی در حداقل زمان استفاده می‌شود.

در این پایگاه با توجه به مقیاس نقشه، وسعت منطقه، دقت تعیین موقعیت و طراحی مسیر سکو، سیستم تصویر مناسب و دیتوم مرجع برای نقشه‌های موجود تعریف شده، و تبدیلات لازم بر روی مختصات نقاط انجام می‌گیرد. سپس نقشه‌های آماده‌سازی شده در دو مرحله زمین مرجع کردن تصاویر و تولید مدل رقومی ارتفاعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدین ترتیب روند مطرح شده در ایجاد پایگاه مرجع اطلاعات مکانی در قالب دو مرحله ایجاد زیرساخت و تشکیل پایگاه مرجع، انجام می‌پذیرد.

### ایجاد زیرساخت مرجع

ایجاد زیرساخت مرجع شامل فرایند طراحی، جمع‌آوری، پردازش و آماده‌سازی انواع مختلف داده‌های مکانی مرجع به‌منظور ایجاد زیرساختی کارا، قابل اعتماد، قدرتمند و متناسب با شرایط مسئله مورد نظر است. در این مرحله مجموعه اطلاعات مکانی مورد استفاده در دو فضای تصویر (تصاویر ماهواره‌ای) و شیء (نقشه‌های سه بعدی) جمع‌آوری می‌شوند. پس از طراحی و

در حین پرواز بعد از استخراج عوارض از تصویر هوایی، فرآیند تناظریابی بین عوارض تصویر هوایی و عوارض موجود در کتابخانه سیستم توسط الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی<sup>۲۰</sup> صورت می‌گیرد، سپس با استفاده از الگوریتم RANSAC<sup>۲۱</sup> اشتباهات تناظریابی<sup>۲۲</sup> حذف، و موقعیت و وضعیت سکو از مدل ریاضی DLT<sup>۲۳</sup> بر مبنای نقاط تناظریابی شده محاسبه می‌شوند. در انتها با توجه به تبدیل سیستم مختصات، اطلاعات مورد نظر به سیستم استاندارد ناوبری انتقال و پارامترهای ناوبری سکو محاسبه می‌شود.

بدین ترتیب، روش پیشنهادی مطابق شکل (۱) از چهار مرحله ایجاد پایگاه مرجع اطلاعات مکانی، پردازش تصویر هوایی اخذ شده، زمین مرجع نمودن اتوماتیک تصویر هوایی اخذ شده، و برآورد پارامترهای ناوبری، تشکیل شده است.

### ایجاد پایگاه مرجع اطلاعات مکانی

پردازش‌های مطرح در مراحل مختلف روش پیشنهادی این تحقیق، نیازمند یک ساختار مرجع کارا به‌منظور به‌کارگیری همزمان داده‌ها و اطلاعات مکانی مختلف مورد استفاده در روند تعیین پارامترهای ناوبری است. این ساختار تحت یک پایگاه اطلاعاتی مکان‌مبنا ایجاد شده و مجموعه عملیات ذخیره‌سازی، بهنگام‌سازی، بازیابی، پردازش و دسترسی به مجموعه اطلاعات

20. Nearest Neighbor Rule

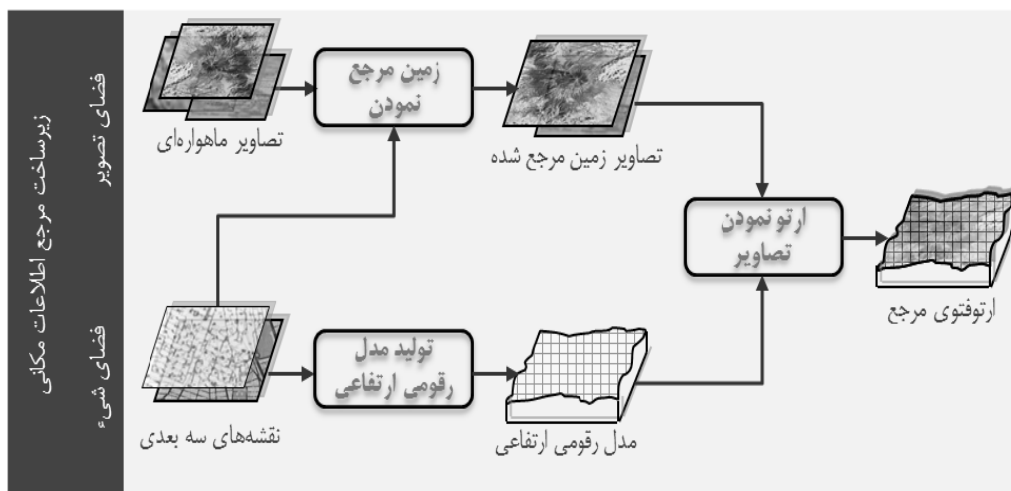
21. Random Sample Consequent

22. Outlier Removal

23. Direct Linear Transformation

۲). با توجه به اینکه نقشه‌های سه بعدی و مدل رقمی ارتفاعی حاصل از آن‌ها زیربنا و مرجع اصلی اطلاعات مکانی هستند، دقت و صحت آن‌ها، نقش اساسی در دقت و صحت حاصل از مدل‌سازی هندسی روش پیشنهادی خواهد داشت.

جمع‌آوری اطلاعات در فضای تصویر، نقشه‌های سه‌بعدی منطقه مورد نظر در مقیاسی سازگار با دقت مورد نیاز و قدرت تفکیک تصاویر تهیه می‌شوند. از این نقشه‌ها در مراحل بعدی به منظور زمین مرجع کردن تصاویر ماهواره‌ای، تولید مدل رقمی سه‌بعدی سطح زمین و در نهایت ارتو کردن تصاویر استفاده می‌شود (شکل



شکل ۲- نمودار مراحل ایجاد زیرساخت اطلاعات مرجع با استفاده از اطلاعات فضای شیء و تصویر

### تشکیل پایگاه مرجع

در روند پیشنهادی، با ایجاد زیرساخت اطلاعات مکانی، نسبت به تشکیل پایگاه مرجع اطلاعات مکان مینا اقدام می‌شود. در این مرحله، ابتدا نمایش اطلاعات تصویری و شیء ایجاد شده و سپس بر مبنای اطلاعات فوق، عوارض و فضای توصیفگرهای عوارض مورد نظر تشکیل می‌شود (شکل ۳). در ادامه این بخش، الگوریتم اپراتور ASIFT شامل پنج مرحله: (۱) شبیه‌سازی تصویر، (۲) ایجاد فضای مقیاس، (۳) استخراج اکستریم‌های محلی، (۴) تخصیص راستا، و (۵) توصیفگر نقاط کلیدی، به صورت اجمالی بررسی خواهد شد [۲۶، ۲۷].

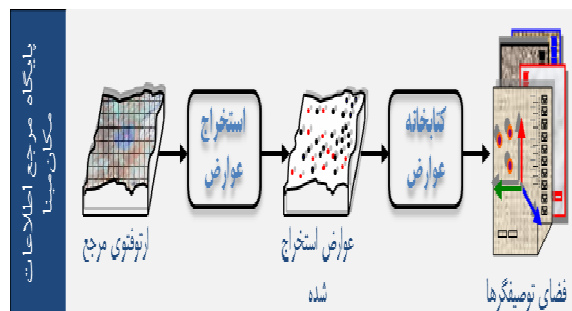
شبیه‌سازی تصویر: به منظور شبیه‌سازی تیلت<sup>۲۴</sup> خطی، ناشی از تغییر جهت محور دوربین، هر تصویر در فواصل مختلف شبیه‌سازی<sup>۲۵</sup> می‌شود. این فواصل برای پارامتر شبیه‌سازی شده متناظر با تیلت، به صورت  $t = 1, a, \dots, a^n$  و برای هر  $t$  به صورت  $0, b/t, \dots, kb/t$  است. سپس برای استخراج نقاط کلیدی و توصیفگرها، مراحل زیر برای هر تصویر شبیه‌سازی شده تکرار می‌شوند.

ایجاد فضای مقیاس: به منظور استخراج نقاط کلیدی پایدار که نسبت به تغییرات مقیاس مستقل باشند، پردازش‌ها بر روی مقیاس‌های مختلفی از تصویر صورت می‌گیرد [۲۸]. فضای مقیاس یک تصویر،  $L(x, y, \sigma)$ ، عبارت است از کانولوشن تابع گوسین با مقیاس‌های متفاوت،  $G(x, y, \sigma)$ ، با تصویر ورودی،  $I(x, y)$ :

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (1)$$

در معادله فوق، \* عملگر کانولوشن است و

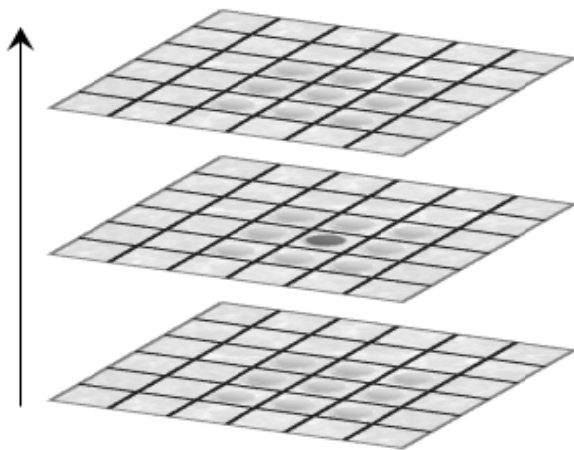
$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (2)$$



شکل ۳- ساختار ایجاد پایگاه مرجع اطلاعات مکان مینا

24. Tilt

25. Simulate



شکل ۵- پیکسل‌های شرکت کننده در فرآیند تعیین نقطه اکسترمم

تخصیص راستا: در این مرحله با تخصیص یک راستای پایدار به هر نقطه کلیدی، بردار توصیفگرها نسبت به این بردار تعریف شده و توصیفگرهایی مستقل از دوران تصویر تعیین می‌شوند. ابتدا با استفاده از معادله (۴) مقدار و جهت بردار گرادینان برای هر پیکسل از تصویرهای موجود در فضای مقیاس محاسبه می‌شود:

$$m(x, y) = \left( \frac{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2}{2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

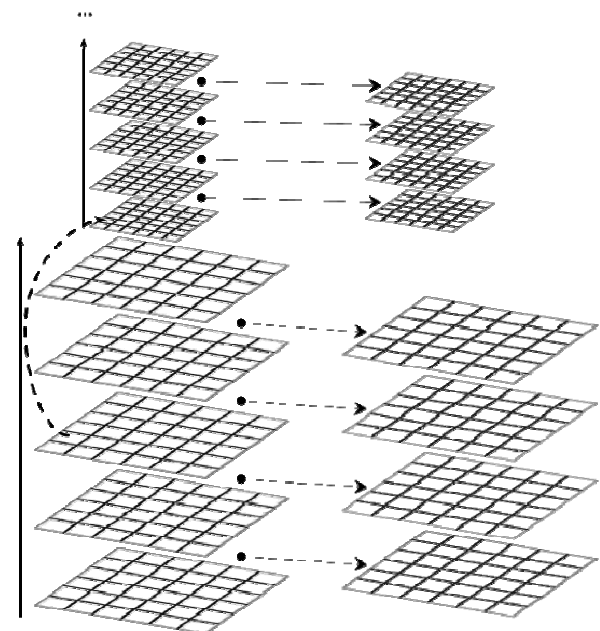
$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \right)$$

سپس بردار گرادینان‌های یک همسایگی از نقطه کلیدی را در نظر گرفته و یک تابع گوسین با انحراف معیاری برابر با ۱/۵ برابر مقیاس نقطه، به اندازه این بردارها اعمال می‌شود و در نهایت یک هیستوگرام ۳۶ جهتی تشکیل داده می‌شود. بیشینه این نمودار به‌عنوان راستای نقطه کلیدی در نظر گرفته می‌شود (شکل ۶).

توصیفگر نقاط کلیدی: در این مرحله، بردار گرادینان‌های یک همسایگی از نقطه کلیدی را در نظر گرفته و یک تابع گوسین با انحراف معیاری برابر با نصف عرض پنجره در نظر گرفته شده، به اندازه این بردارها اعمال می‌شود. سپس برای هر زیرمجموعه، هیستوگرام هشت جهتی تشکیل داده می‌شود و در نهایت ۱۲۸ = ۸ × ۴ × ۴ توصیف کننده برای هر نقطه کلیدی به وجود می‌آید (شکل ۷). همچنین برای کاهش اثر روشنایی، ابتدا تمام مقادیر توصیفگرها نسبت به واحد طول نرمالیزه می‌شوند تا اثر خطی تغییرات روشنایی کاهش یابد، و برای تغییرات غیرخطی، مقادیر بالای ۰/۲ حذف و سپس مجدداً نرمالیزه می‌شوند.

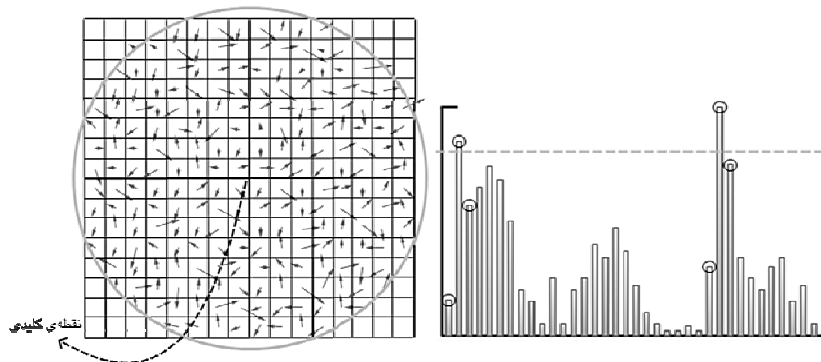
بنابراین تصویر ام از گروه ۲۶ اولیه نتیجه کانولوشن یک تابع گوسین با انحراف معیار  $\sigma_0^{(i-1)}$ ، با تصویر ورودی است. مقدار ثابت  $k$  نیز از معادله  $k = 2^{1/s}$ ، که  $s$  برابر با تعداد تصویرهای مورد نیاز در مرحله استخراج نقاط کلیدی است، به دست می‌آید. سپس ابعاد تصویری که انحراف معیار آن برابر با  $2\sigma_0$  است، نصف می‌شود؛ و این تصویر به‌عنوان تصویر ورودی برای گروه دوم استفاده می‌شود. تصویرها و گروه‌های بعدی نیز به همین روش ایجاد شده و فضای مقیاس تکمیل می‌شود. در پایان برای هر گروه، تفاضل تصویرهای مجاور محاسبه و به‌عنوان تصویر تفاضلی ذخیره می‌شود (شکل ۴):

$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (3)$$

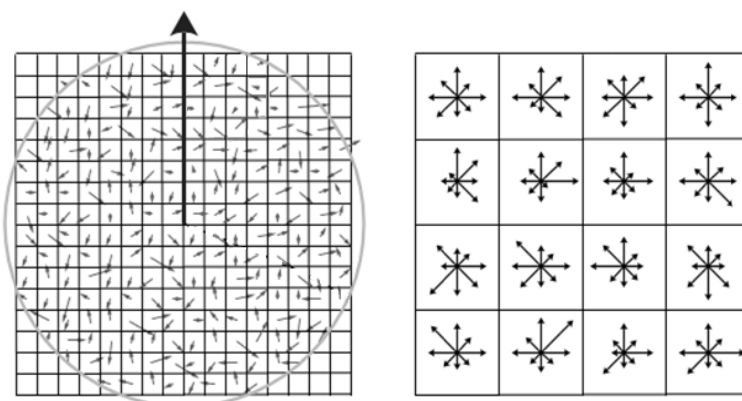


شکل ۴- فضای مقیاس و تفاضلی

استخراج اکسترمم‌های محلی: در این مرحله برای تصویرهای تفاضلی هر گروه، هر پیکسل یک تصویر با هشت پیکسل مجاور خود در همان تصویر و نه پیکسل مجاور در تصویرهای بعدی و قبلی مقایسه می‌شود و تنها زمانی این پیکسل به‌عنوان اکسترمم انتخاب می‌شود که کمینه یا بیشینه بین تمام پیکسل‌های مجاور خود باشد (شکل ۵). سپس برای کاهش اثر حساسیت به نویز و لبه تابع تفاضلی، یک مدل ریاضی [۲۹] به تابع تفاضلی برازش داده می‌شود و موقعیت و مقیاس نقاط پایدارتر با دقت زیر پیکسل تعیین می‌شود.



شکل ۶- هیستوگرام جهتی



شکل ۷- هیستوگرام‌های هشت‌جهتی اطراف نقطه کلیدی

### پردازش تصاویر هوایی اخذشده

این مرحله شامل اعمال پارامترهای کالیبراسیون و پیش‌پردازش‌های رادیومتریک و هندسی مورد نیاز به منظور تسهیل و بهبود استخراج عوارض و توصیف‌گرهای مورد نیاز است. این پیش‌پردازش‌ها می‌تواند تا حد زیادی در زمینه بهبود دقت، قابلیت اعتماد و سرعت این فرآیندها مؤثر واقع شود. بدین منظور در روش پیشنهادی پس از انجام پیش‌پردازش‌های رادیومتریک و هندسی تصاویر، عوارض نقطه‌ای بارز تشخیص داده شده و مشابه پایگاه اطلاعات مرجع، توصیف‌گرهای مورد نیاز در نقاط استخراج شده تعیین می‌شوند.

### زمین مرجع کردن اتوماتیک تصویر هوایی اخذ شده

تعیین پارامترهای تابع تبدیل ریاضی به منظور تعیین ارتباط و زمین مرجع کردن تصاویر هوایی اخذ شده نسبت به پایگاه اطلاعات مرجع، با استفاده از تناظرهایی عوارض مشترک بین فضای تصویر و فضای مرجع انجام می‌گیرد [۳۰]. با توجه به اینکه مسئله مورد نظر در این تحقیق، دشواری‌های جستجوی تشابه در تصاویر اخذ شده با استفاده از سنجنده‌های متفاوت از موقعیت‌های دید و در

زمان‌های مختلف، و ساختار هندسی گوناگون دارند، و نیز از آنجاکه در مسائل ناوبری زمان و انجام آنی الگوریتم‌ها از فرضیات اساسی در زمینه هم‌مرجع‌سازی است، روش پیشنهادی باید مشکلات و چالش‌های فوق را در نظر گیرد تا بتواند به دقت و قابلیت اعتماد مطلوب در شرایط خاص و پیچیده دست یابد. شکل (۱) بیانگر خصوصیات اصلی مرحله زمین مرجع کردن تصاویر هوایی و ارتباط آن با دیگر مراحل روش پیشنهادی است.

در این مرحله بر مبنای اطلاعات اولیه، شامل موقعیت و وضعیت تقریبی سنجنده، سرعت تقریبی سکو، ابعاد تصویر و ارتفاع متوسط منطقه مورد بررسی، نسبت به تعیین محدوده تقریبی تصویر در پایگاه اطلاعات مرجع اقدام می‌شود. بر مبنای محدوده تقریبی جستجو در پایگاه اطلاعات مرجع، نقاط مورد نظر به همراه توصیف‌گرهای مربوطه از پایگاه اطلاعات مرجع استخراج و در روند تناظریابی استفاده می‌شوند. روند تناظریابی نیز از دو مرحله تعیین نقاط متناظر از بین نقاط کاندید در بین دو فضای تصویر و شیء، و حذف اشتباهات تناظریابی تشکیل شده است. در ادامه این قسمت، هر یک از این مراحل به صورت اجمالی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.



## تعیین نقاط متناظر از بین نقاط کاندید در بین دو فضای تصویر و شیء

در این تحقیق به منظور تناظریابی عوارض استخراج شده با عوارض موجود در پایگاه مرجع اطلاعات مکانی، از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی استفاده شده است. در این راستا، برای بررسی انطباق عوارض استخراج شده با عوارض موجود در پایگاه مرجع اطلاعات مکانی، هر توصیفگر تصویر هوایی اخذ شده با تمام بردارهای توصیفگر در پایگاه مرجع اطلاعات مکانی، ضرب داخلی دو بردار می‌شوند. سپس این مقادیر به صورت صعودی مرتب می‌شوند، اگر نسبت اولین درایه به دومین درایه از یک حد آستانه‌ای کمتر نباشد آن دو نقطه متناظر هم در نظر گرفته می‌شوند [۲۷].

### حذف اشتباهات تناظریابی

در این تحقیق برای حذف اشتباهات تناظریابی از الگوریتم RANSAC استفاده شده است. در این الگوریتم ابتدا حداقل تعداد متناظر مورد نیاز، برای حل ترانسفورماسیون بین مجموعه نقاط متناظر به صورت تصادفی انتخاب، و پارامترهای ترانسفورماسیون با استفاده از آن‌ها برآورد می‌شود. سپس با داشتن پارامترهای ترانسفورماسیون، تعداد متناظرهای مجموعه نقاط متناظر، که از این پارامترها پیروی می‌کنند، قابل شمارش هستند. این مراحل آنقدر تکرار می‌شوند تا به احتمال ۹۹٪ هیچ اشتباهی در مجموعه نقاط متناظر وجود نداشته باشد. در نهایت پارامترهای ترانسفورماسیون مرتبط با حداکثر تعداد پیروی، به عنوان راه‌حل نهایی معرفی می‌شود [۳۱].

پس از تناظریابی، نقاط متناظر از میان نقاط استخراج شده در دو فضای تصویر ورودی و اطلاعات مرجع تعیین می‌شوند. با استفاده از همترازی این نقاط به عنوان عوارض کنترل معلوم در دو فضا، پارامترهای ارتباط دهنده فضای تصویر و شیء محاسبه و المان‌های تعیین شده از حل این معادلات به عنوان پارامترهای توجیه خارجی سنجنده در نظر گرفته می‌شود (معادله ۵):

$$\begin{aligned} x &= \frac{D_1 X + D_2 Y + D_3 Z + D_4}{D_9 X + D_{10} Y + D_{11} Z + 1} \\ y &= \frac{D_5 X + D_6 Y + D_7 Z + D_8}{D_9 X + D_{10} Y + D_{11} Z + 1} \end{aligned} \quad (5)$$

در معادله فوق  $(X, Y, Z)$  مختصات هر نقطه دلخواه از پایگاه مرجع اطلاعات مکانی در سیستم مختصات شیء،  $(x, y)$  مختصات نقطه متناظر با آن بر روی تصویر در سیستم مختصات دوربین و  $(D_1, D_2, \dots, D_{11})$  ضرایب معادلات DLT حاوی پارامترهای توجیه خارجی سنجنده هستند (معادله ۶).

$$\begin{aligned} \omega &= \tan^{-1}(-D_{10}/D_{11}) \\ \phi &= \sin^{-1}\left(-D_9/\sqrt{D_9^2 + D_{10}^2 + D_{11}^2}\right) \\ \kappa &= \cos^{-1}\left((D_1 - x_0 D_9)/\left(c \cos \phi \sqrt{D_9^2 + D_{10}^2 + D_{11}^2}\right)\right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_1 & D_2 & D_3 \\ D_5 & D_6 & D_7 \\ D_9 & D_{10} & D_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D_4 \\ D_8 \\ 1 \end{bmatrix}$$

در معادله فوق  $x_0$  و  $c$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} x_0 &= D_1 D_9 + D_2 D_{10} + D_3 D_{11} / D_9^2 + D_{10}^2 + D_{11}^2 \\ y_0 &= D_5 D_9 + D_6 D_{10} + D_7 D_{11} / D_9^2 + D_{10}^2 + D_{11}^2 \\ c_x &= \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 / D_9^2 + D_{10}^2 + D_{11}^2 - x_0^2} \\ c_y &= \sqrt{D_5^2 + D_6^2 + D_7^2 / D_9^2 + D_{10}^2 + D_{11}^2 - y_0^2} \\ c &= c_x + c_y / 2 \end{aligned} \quad (7)$$

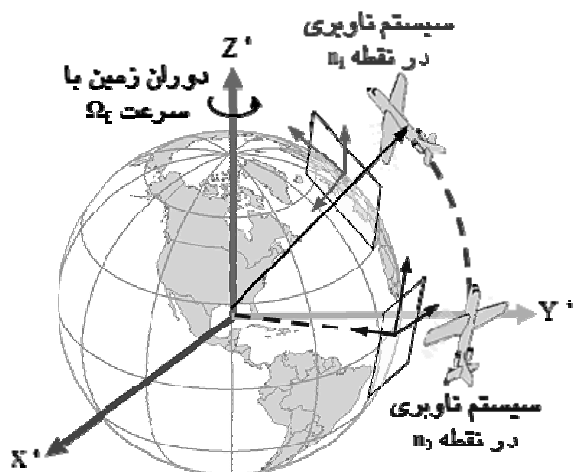
### برآورد پارامترهای ناوبری

با وجود آنکه محاسبه توجیه خارجی سنجنده که توسط فرآیند زمین مرجع کردن تصاویر انجام می‌گیرد، پارامترهای دقیق موقعیت و توجیه مرکز تصویر سنجنده را در لحظه تصویب برداری مشخص می‌کند، از آنجاکه تعریف پارامترها و زوایای استاندارد ناوبری با آنچه در فتوگرامتری و بینایی کامپیوتر محاسبه می‌شود متفاوت است [۳۲]، تعیین تابع تبدیل مناسب به منظور انتقال از سیستم مختصات مرجع به سیستم مختصات استاندارد در ناوبری هوایی اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا با استفاده از روابط تحلیلی تبدیل میان سیستم‌های مختصات مورد نظر، پارامترهای موقعیت و وضعیت سکوی هوایی براساس سیستم مختصات ناوبری محاسبه می‌شود [۳۳].

### معادلات موقعیت

موقعیت سکوی هوایی عموماً با بردار اختلاف مبدأ سیستم مختصات بدنه نسبت به سیستم مختصات زمین مرکز زمین ثابت یا نسبت به سیستم مختصات جغرافیایی مرجع جهانی نمایش داده می‌شود. از آنجاکه امروزه، استفاده از سیستم مختصات بایضوی مرجع WGS-84 در ناوبری هوایی به صورت گسترده‌ای مطرح است و تبدیل مختصات از سیستم WGS-84 به سیستم مختصات جهانی به راحتی امکان‌پذیر است، در این قسمت به منظور بیان موقعیت سکو از آن استفاده شده است. با توجه به معلوم بودن

نتیجه رابطه (۹)، یک ماتریس تبدیل، به منظور انتقال هر بردار دلخواه از سیستم مختصات متصل به زمین به هر سیستم مختصات ناوبری دلخواه یا بر عکس است.



شکل ۸- تعریف سیستم مختصات ناوبری و ارتباط آن با سیستم مختصات زمین مرکز زمین ثابت

به منظور محاسبه زوایای مورد استفاده در ناوبری لازم است تبدیلات مختلفی انجام گیرد و در شرایط خاص و مسافت‌های بلند تصحیحات مربوط به کرویت زمین و انحراف نصف‌النهارات، که در سیستم‌های مختصات زمین مرجع به کار گرفته می‌شوند، مدنظر قرار گیرد. در این تحقیق با توجه به تعریف سیستم مختصات شیء که به صورت UTM در نظر گرفته شده است و با توجه به بعد مسافت، نیازی به تصحیح کرویت زمین در تبدیلات وجود ندارد.

برای هر نقطه، اخذ تصویر  $i$  در مسیر هوایی، ماتریس‌های زیر با استفاده از مختصات ژئودتیکی  $(\varphi, \lambda)$  در نقطه  $i$  و نقطه  $o$  (مبدأ حرکت سکوی هوایی) به عنوان مرکز صفحه مماس بر بیضوی تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} C_s^{Obj} &= f(\omega, \varphi, \kappa) & C_b^n &= f(\phi, \theta, \psi) \\ C_e^{n_0} &= f(\varphi_0, \lambda_0) & C_e^{n_i} &= f(\varphi_i, \lambda_i) \end{aligned} \quad (10)$$

با ترکیب ماتریس تبدیلات لازم با استفاده از عملگرهای ماتریسی، رابطه زیر به عنوان ماتریس تبدیل از سیستم مختصات بدنه به سیستم مختصات ناوبری ارائه می‌شود:

$$C_b^{n_i} = C_e^{n_i} \cdot (C_e^{n_0})^T \cdot \left( (C_b^s)^T \cdot C_{Obj}^s \cdot (C_n^{Obj})^T \right) \quad (11)$$

با استفاده از ماتریس فوق زوایای دورانی اولر می‌تواند با استفاده از المان‌های ماتریس  $C_b^n$  به صورت زیر محاسبه شوند:

پارامترهای ترانسفورماسیون از سیستم مختصات سنسور بینایی مینا به بدنه (اندازه‌گیری شده پیش از پرواز) و پارامترهای توجیه خارجی سنجنده (محاسبه شده توسط معادلات DLT)، معادله موقعیت سکو به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} X^n \\ Y^n \\ Z^n \end{bmatrix} = C_{Obj}^n \times \begin{bmatrix} X_p^{Obj} \\ Y_p^{Obj} \\ Z_p^{Obj} \end{bmatrix} + C_{Obj}^n \times C_s^{Obj} \times C_b^s \times P_{sb}^b \quad (8)$$

در معادله فوق،  $C_{Obj}^n$  ماتریس ترانسفورماسیون از سیستم مختصات شیء به سیستم مختصات ناوبری،  $X_p^{Obj}$ ،  $Y_p^{Obj}$  و  $Z_p^{Obj}$  مختصات مرکز لنز تصویربرداری در سیستم مختصات شیء (محاسبه شده توسط معادلات DLT)،  $C_s^{Obj}$  ماتریس ترانسفورماسیون از سیستم مختصات سنسور بینایی مینا به سیستم مختصات شیء بر حسب زوایای  $\omega$ ،  $\varphi$  و  $\kappa$  (محاسبه شده توسط معادلات DLT)،  $C_b^s$  ماتریس ترانسفورماسیون از سیستم مختصات بدنه به سیستم مختصات سنسور بینایی مینا (اندازه‌گیری شده پیش از پرواز) و  $P_{sb}^b$  افست بین مراکز سیستم‌های مختصات سنسور بینایی مینا و بدنه در سیستم مختصات بدنه (اندازه‌گیری شده پیش از پرواز) هستند.

### معادلات وضعیت

پارامترهای وضعیت سکو از ارتباط میان سیستم مختصات بدنه نسبت به سیستم مختصات ناوبری بر اساس زوایای دورانی اولر توسط استانداردهای هوانوردی تعریف می‌شود. همچنین سیستم مختصات ناوبری با سطح تراز محلی و جهت شمال هر محل در ارتباط است، در نتیجه در حالتی که از سکوهای قاره‌پیما که مسافت‌های طولانی را می‌پیمایند استفاده شود، این سیستم مختصات ثابت نبوده و با توجه به سرعت سکو و سرعت دوران زمین تغییر می‌یابد (شکل ۸). رابطه میان سیستم ناوبری متغیر و جهت محورهای مختصات آن به کمک یک سیستم مختصات متصل به زمین و مبدأ در مرکز زمین محقق می‌شود. این تبدیل به وسیله دو ماتریس دورانی زیر که بر اساس پارامترهای مختصات ژئودتیکی است انجام می‌گیرد:

$$\begin{aligned} C_e^n &= R_y(\varphi + 90^\circ) \cdot R_z(\lambda) \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\varphi + 90^\circ) & 0 & \sin(\varphi + 90^\circ) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi + 90^\circ) & 0 & \cos(\varphi + 90^\circ) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\lambda & -\sin\lambda & 0 \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

پیچیدگی‌های بالایی دارد و عوارض و مناطق متنوع مسکونی، صنعتی و کشاورزی دارد (شکل ۹).

▪ مشخصات سیستم کمک ناوبری: در این تحقیق، به‌منظور اطمینان از صحت عملکرد سیستم و بررسی تأثیر پایگاه اطلاعات مرجع بر روی دقت روش ناوبری، از یک دوربین غیرمتریک با پارامترهای کالیبراسیون مشخص استفاده شد. همچنین موقعیت اولیه تصاویر توسط سیستم تعیین موقعیت جهانی مستقر بر سکوی هوایی به‌عنوان اطلاعات اولیه، معلوم فرض شده است. تصاویر هوایی با ابعاد ۲۰۴۸×۲۰۴۸ پیکسل و پیکسل سایز ۰/۶ متر در سال ۱۳۸۷ اخذ شده است (شکل ۹).

### ایجاد پایگاه مرجع اطلاعات مکانی

این مرحله شامل پردازش و آماده‌سازی داده‌های مکانی مرجع به‌منظور ایجاد زیرساختی کارا و متناسب با شرایط مسئله مورد نظر است. با توجه به در اختیار بودن تصاویر زمین مرجع شده و مدل رقومی ارتفاعی متناظر با آن، برای اطمینان از صحت عملکرد سیستم و بررسی تأثیر پایگاه اطلاعات مرجع بر روی دقت روش ناوبری، تصاویر زمین مرجع شده و مدل رقومی متناظر با آن، در قدرت تفکیک دو و نیم متری نمونه‌برداری و تولید شد. همچنین با

$$\phi = \arctan\left(\frac{C_{32}}{C_{33}}\right) \quad \theta = -\arcsin(C_{31}) \quad (12)$$

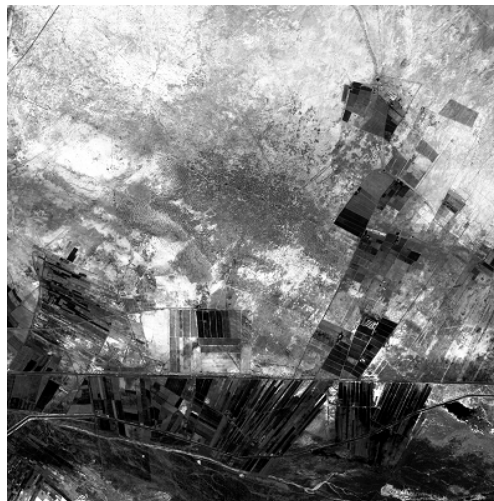
$$\psi = \arctan\left(\frac{C_{21}}{C_{11}}\right)$$

### پیااده‌سازی روش پیشنهادی

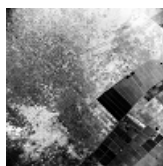
به‌منظور ارزیابی توانایی روش ارائه شده در زمینه ناوبری بینایی‌مبنا، مفاهیم مورد نظر در محیط‌های برنامه‌نویسی ++C و متلب طراحی، پیااده‌سازی و ارزیابی شد. در این راستا، ابتدا مشخصات اطلاعات زیرساختی مرجع برای تشکیل پایگاه مرجع اطلاعات مکانی، سپس مشخصات سیستم کمک ناوبری مورد استفاده، و در نهایت ارزیابی و تحلیل نتایج شامل ارزیابی دقت داخلی و دقت خارجی ارائه می‌شود.

### خصوصیات داده‌های مورد استفاده

▪ مشخصات اطلاعات زیرساختی مرجع: به‌منظور ارزیابی توانایی روش ارائه شده در زمینه ناوبری بینایی‌مبنا، مفاهیم مورد نظر بر روی منطقه‌ای در شهر اصفهان آزمایش و ارزیابی شد. اطلاعات زیرساختی مرجع در این منطقه شامل تصاویر سال ۱۳۸۴ سنجنده ماهواره IRS-P5 با قدرت تفکیک دو و نیم متر است. همچنین بافت منطقه مورد نظر



(الف)



(د)



(ج)



(ب)

شکل ۹- تصاویر استفاده‌شده برای ارزیابی روش پیشنهادی (الف) تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده، (ب)، (ج) و (د) تصاویر اخذ شده توسط دوربین سکوی هوایی

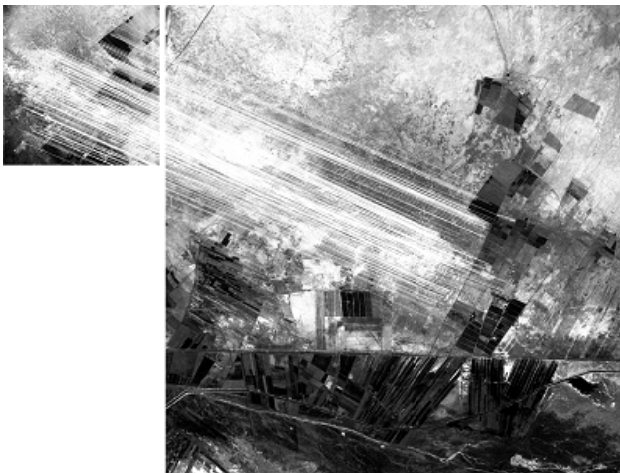
می‌شوند.

سپس فرآیند بررسی انطباق بین عوارض استخراج شده و عوارض موجود در پایگاه اطلاعات مرجع مکانی، توسط الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی صورت می‌گیرد، و در نهایت با استفاده از الگوریتم RANSAC اشتباهات تناظریایی حذف می‌شوند (شکل ۱۰). حال با داشتن مجموعه نقاط متناظر، با استفاده از هم‌ترازی این نقاط به‌عنوان عوارض کنترل معلوم در دو فضا، پارامترهای ارتباط‌دهنده فضای تصویر و شیء محاسبه شده و المان‌های تعیین شده از حل این معادلات به‌عنوان پارامترهای توجیه خارجی سنجنده در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از روابط تحلیلی تبدیل میان سیستم‌های مختصات، پارامترهای موقعیت و وضعیت سکوی هوایی بر اساس سیستم مختصات ناوبری محاسبه می‌شود.

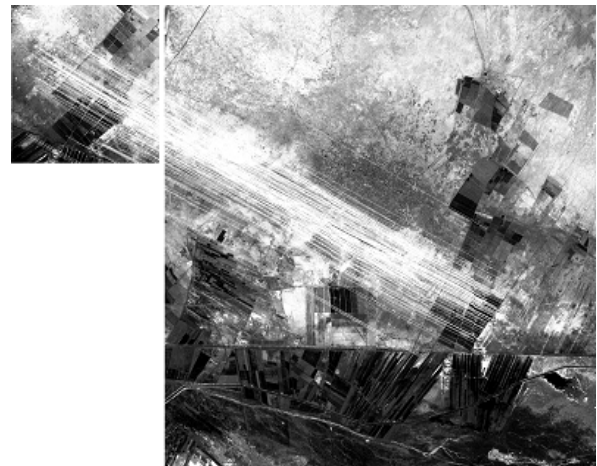
توجه به عدم پراکندگی یکنواخت و مناسب رادیومتریکی اطلاعات طیفی ثبت شده در تصاویر زمین مرجع شده توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای، به منظور ایجاد شرایط مناسب برای استخراج عوارض (نقاط کلیدی) بارزسازی رادیومتریکی و همانندسازی هیستوگرام صورت می‌گیرد. سپس به‌وسیله اپراتور ASIFT نقاطی که پایداری بیشتری نسبت به تغییرات جابه‌جایی، دوران، مقیاس، شرایط نوری و نویز دارند از تصویر مورد نظر استخراج می‌شوند. در نهایت توصیفگرهای هر نقطه، استخراج شده و در کتابخانه سیستم ذخیره شدند.

### برآورد پارامترهای ناوبری

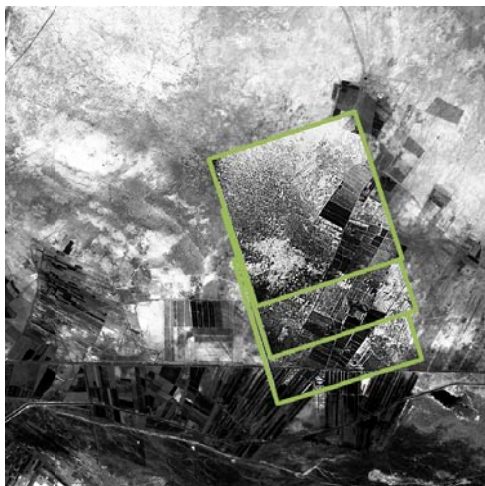
در حین پرواز، ابتدا با استفاده از اپراتور ASIFT نقاطی که پایداری بیشتری نسبت به تغییرات ج+ابه‌جایی، دوران، مقیاس، شرایط نوری و نویز دارند از تصویر مورد نظر استخراج



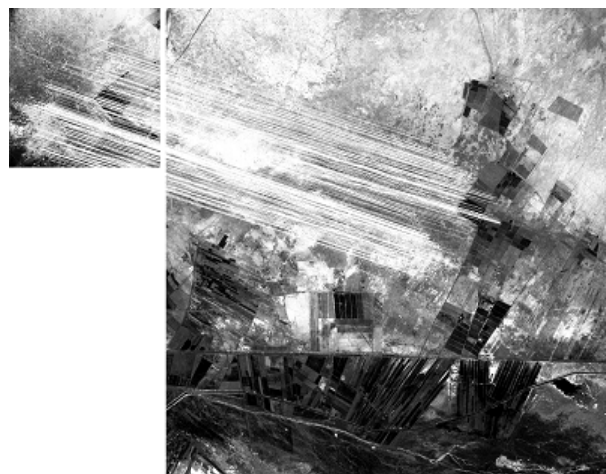
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۰- فرآیند بررسی انطباق بین عوارض استخراج شده و عوارض موجود در پایگاه اطلاعات مرجع مکانی توسط الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی و RANSAC (الف)، (ب) و (ج) تناظریایی تصاویر هوایی اخذ شده با پایگاه مرجع اطلاعات مکانی، (د) تصاویر هم‌مرجع شده با پایگاه مرجع اطلاعات مکانی

## ارزیابی و تحلیل نتایج

در این بخش نتایج حاصل از به کارگیری روش پیشنهادی در رابطه با سه ناحیه انتخابی در وضعیت به کارگیری پایگاه مرجع اطلاعات مکانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این ارزیابی در دو وضعیت «ارزیابی دقت داخلی» که بیانگر برآورد دقت روند تناظریابی است و «ارزیابی دقت خارجی» که بیانگر برآورد دقت حاصل از مقایسه نتایج مدل‌سازی تحلیلی این روش با روش مرجع است، انجام می‌پذیرد.

- ارزیابی دقت داخلی: به منظور ارزیابی دقت داخلی روش پیشنهادی، نتایج روند تناظریابی برای هر یک از سه تصویر مورد ارزیابی و در حالت استفاده از پایگاه مرجع اطلاعات مکانی دو و نیم متری در جدول زیر ارائه شده است:

جدول ۲- نقاط استخراج شده و تناظر یافته تصاویر مورد ارزیابی با پایگاه مرجع

اطلاعات مکانی دو و نیم متری

تصویر	تعداد نقاط استخراج شده		تعداد نقاط تناظر		انحراف معیار (پیکسل)
	تصویر هوایی	تصویر ماهواره‌ای	X	Y	
اول	۲۳۵۲۱	۲۴۵۹۸	۲۸۰	۰.۳۲	۰.۳۹
دوم	۲۳۴۸۶	۲۴۹۵۲	۳۷۴	۰.۳۳	۰.۳۱
سوم	۲۲۲۱۰	۲۵۳۷۶	۴۱۵	۰.۲۲	۰.۳۰

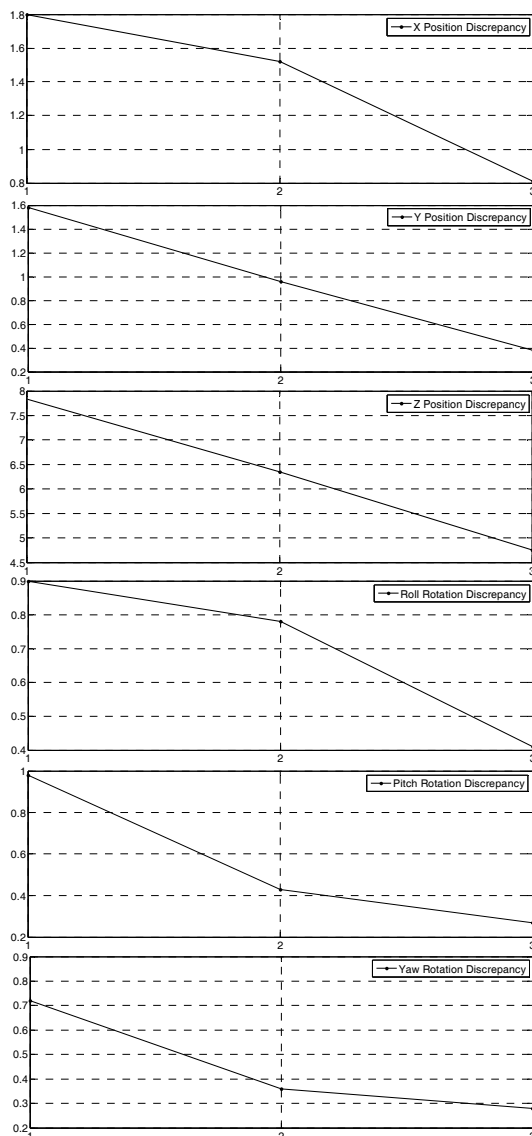
همان‌طور که در نتایج هر یک از داده‌ها مشاهده می‌شود، افزایش و پراکندگی نقاط متناظر منجر به افزایش دقت داخلی حاصل شده است.

- ارزیابی دقت خارجی: راهبرد مورد نظر در ارزیابی دقت خارجی، مقایسه پارامترهای ناوبری محاسبه شده توسط روش اتوماتیک ارائه شده، با مقادیر به دست آمده از GPS/IMU است. بیان گرافیکی نتایج حاصل از روش پیشنهادی و مقادیر مرجع پارامترهای ناوبری سکو به منظور مقایسه توانایی روش فوق برای هر یک از سه تصویر مورد ارزیابی و در حالت استفاده از پایگاه مرجع اطلاعات مکانی دو و نیم متری در شکل (۱۱) ارائه شده است.

همانگونه که از شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، روش فوق توانسته است با توجه به دقت اطلاعات مرجع مکانی مورد استفاده، با کارایی مناسبی پارامترهای ناوبری سکو را در هر سه ناحیه مورد ارزیابی برآورد کند. همچنین با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲) و شکل (۱۱)، دقت داخلی و خارجی روش پیشنهادی کاملاً به دقت اطلاعات مرجع وابسته است. با توجه به اینکه در مرحله تناظریابی نقاط از معادلات DLT و مختصات نقاط در فضای شیء استفاده شد، دقت داخلی به

دقت پایگاه اطلاعات مرجع وابسته است. همچنین این مدل ریاضی از یک طرف در مرحله زمین مرجع کردن به عنوان قید هندسی اعمال و از طرف دیگر، در برآورد پارامترهای ناوبری استفاده می‌شود. در نتیجه دقت خارجی و مطلق روش ارائه شده نیز به اطلاعات مرجع وابسته است. بدین ترتیب دقت اطلاعات مکانی مرجع مورد استفاده در سیستم، یکی از عوامل محدودکننده دقت حاصل در روند پیشنهادی است.

به منظور نمایش بهتر، دقت تعیین موقعیت در این روش در حالت استفاده از پایگاه اطلاعات مرجع با قدرت تفکیک مکانی دو و نیم متری به حدود ۸ متر در تعیین پارامترهای موقعیت، و حدود ۱ درجه در تعیین پارامترهای وضعیت سکوست.



شکل ۱۱- نمایش گرافیکی اختلاف پارامترهای ناوبری سکو حاصل از روش پیشنهادی و مقادیر مرجع

Congress, Washington, D.C., USA, Vol. 1, 2002, pp. 19-26.

- [3] Saeedi, S., Samadzadegan, F. and El-Sheimy, N., "Vision-Aided Inertial Navigation for Pose Estimation of Aerial Vehicles," *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009)*, 2001, pp. 453-459.
- [4] Kim, J. and Sukkarieh, S., "Autonomous Airborne Navigation in Unknown Terrain Environments," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions*, Vol. 40, No. 3, 2004, pp. 1031-1045.
- [5] Gracias N. R., Van Der Zwaan, S., Bernardino, A. and Santos-Victor, J., "Mosaic-Based Navigation for Autonomous Underwater Vehicles," *Oceanic Engineering, IEEE Journal*, Vol. 28, No. 4, 2003, pp. 609-624.
- [6] Lewantowicz, Z. H., "Architectures and GPS/INS Integration: Impact on Mission Accomplishment," *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, Vol. 7, No. 6, 1992, pp. 16-20.
- [7] Snyder, S., Schipper, B., Vallot, L., Parker, N. and Spitzer, C., "Differential GPS/Inertial Navigation Approach/Landing Flight Test Results," *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, Vol. 7, No. 5, 1992, pp. 3-11.
- [8] Greenspan, R. L., "GPS and Inertial Integration, Global Positioning System," *Journal of Theory and Application*, Vol. 2, 1996, pp. 187-220.
- [9] Phillips, R. E. and Schmidt, G. T., *GPS/INS Integration*, Agard Lecture Series Agard LS, 1996, p. 9.
- [10] Sukkarieh, S., Nebot, E. M. and Durrant-Whyte, H. F., "A High Integrity IMU/GPS Navigation Loop for Autonomous Land Vehicle Applications," *Robotics and Automation, IEEE Transactions*, Vol. 15, No. 3, 1999, pp. 572-578.
- [11] Kim, J. H. and Sukkarieh, S., "Flight Test Results of GPS/INS Navigation Loop for an Autonomous Unmanned Aerial Vehicle(UAV)," *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2002)*, Portland, 2002, pp. 510 - 517.
- [12] Cannata, R. W., Blask, S. G., Van Workum, J. A. and Shah, M., "Autonomous Video Registration Using Sensor Model Parameter Adjustments," *AIPR, Proceedings of the 29<sup>th</sup> Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, 2000, p. 215.
- [13] Kamel, B., Santana, M. C. S. and De Almeida, T. C., "Position Estimation of Autonomous Aerial Navigation Based on Hough Transform and Harris Corners Detection," *Proceedings of the 9<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing*, 2010, pp. 148-153.
- [14] Conte, G. and Doherty, P., "Vision-Based Unmanned Aerial Vehicle Navigation Using Geo-Referenced

## نتیجه گیری

در این تحقیق روشی نوین به منظور تعیین موقعیت و وضعیت سکوهای پرنده در قالب یک سیستم کمک ناوبری بینایی مینا ارائه شد. روش پیشنهادی در زمینه ناوبری هواپیماهای بدون سرنشین، سکوهای پرنده، ربات‌های متحرک کاربردهای فراوانی دارد و می‌تواند در زمینه‌های ردیابی، کنترل و مانیتورینگ پدیده‌ها، و گرفتن اطلاعات از نواحی غیرقابل دسترس نیز مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، در ناوبری با استفاده از سیستم‌های ترکیبی، این روش نقش مؤثری در زمینه اخذ اطلاعات دقیق و کالیبره کردن سایر سیستم‌ها، در راستای دستیابی به یک سیستم ناوبری ترکیبی دقیق، قابل اعتماد و با پوشش سراسری در شرایط مختلف خواهد داشت.

این روش بر روی مجموعه‌های مختلفی از شرایط محیطی پیچیده، نواحی شهری، کوهستانی، تپه ماهور و ... آزمایش شده است و نتایج تجربی به دست آمده کارایی و قابلیت اعتماد آن را در شرایط مختلف به اثبات رسانید. به منظور نمایش استحکام و قابلیت‌های روش پیشنهادی، نتایج به دست آمده در حالتی که اطلاعات دقیق ناوبری با استفاده از روش‌های مرجع موجود است مقایسه شده است. این مسئله بیانگر موفقیت روش فوق در حل مسئله برآورد پارامترهای ناوبری سکوست.

اگرچه نتایج حاصل از به کارگیری روش پیشنهادی در این تحقیق بیانگر توانایی آن در زمینه تعیین پارامترهای موقعیت و وضعیت در ناوبری اتوماتیک سکوهای هوایی است، به منظور افزایش کارایی روش فوق، موارد ذیل برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود:

- در روند تناظریابی روش فوق، صرفاً از عوارض نوع نقطه استفاده شده است. استفاده از عوارض نوع خط یا سطح می‌تواند باعث افزایش کارایی روند تناظریابی در این سیستم شود.
- تقویت توصیفگرهای سیستم می‌تواند عامل دیگری در بهبود افزایش کارایی روند تناظریابی در شرایط مختلف باشد.
- تحقیق بر روی تلفیق روش‌های ناوبری بینایی مینا با سایر روش‌های ناوبری به عنوان یکی از زمینه‌های تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

## مراجع

- [1] Hsu, S. "Geocoded Terrestrial Mosaics Using Pose Sensors and Video Registration," *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on*, Vol. 1, 2001, pp. 834-841.
- [2] El-Sheimy, N., "Report on Kinematic and Integrated Positioning Systems," *FIG XXII International*

- [24] Caballero, F., Merino, L. Ferruz, J. and Ollero, A., "Vision-Based Odometry and SLAM for Medium and High Altitude Flying UAVs", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Springerlink, Vol. 54, No. 1-3, 2008, pp.137-161. (Online).
- [25] Samadzadegan, F, and Abdi, Gh., "Vision-Based Pose Estimation for Autonomous Outdoor Navigation of Aerial Vehicles", *ICCIA 2011, The 2<sup>nd</sup> International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA)*. Shiraz, Iran, 2011.
- [26] Morel, J. M. and Yu, G., "ASIFT: A new Framework for Fully Affine Invariant Image Comparison," *SIAM Journal on Imaging Sciences*, Vol. 2, No. 2, 2009, pp. 438-469.
- [27] Lowe, D. G., "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, No. 2, 2004, pp. 91-110.
- [28] Witkin, A. P. "Scale-Space Filtering," *Readings in Computer Vision: Issues, Problems, Principles, and Paradigms*, 1987, pp. 329-332.
- [29] Brown, M. and Lowe, D. G. "Invariant Features from Interest Point Groups," *British Machine Vision Conference, Cardiff, Wales*, 2002, pp. 656-665.
- [30] Drewniok, C. and Rohr, K., "Exterior Orientation-an Automatic Approach Based on Fitting Analytic Landmark Models," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 3, 1997, pp. 132-145.
- [31] Fischler, M. A. and Bolles, R. C., "Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography," *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, 1981, pp. 381-395.
- [32] Airlines Electronic Engineering Committee, "ARINC Characteristic 705 - Attitude and Heading Reference System," <http://www.arinc.com/cgi-bin/store/arinc>, 1985.
- [33] Baumker, M., Heimes, F. J. and Bochum, F. H., "New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using the Position and Angular Data of an Hybrid Inertial Navigation System," *OEEPE Workshop, Integrated Sensor Orientation*, 2001.
- Information," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2009, No. 10, 2009.
- [15] Sim, D. G., Park, R. H. Kim, R. C., Lee, S. U. and Kim, I. C. "Integrated Position Estimation Using Aerial Image Sequences," *IEEE Transactions on pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 24, Issue 1, 2002, pp. 1-18.
- [16] Samadzadegan, F. Hahn, M. and Saeedi, S. "Position Estimation of Aerial Vehicle Based on a Vision Aided Navigation System," [http://www.geovisualisierung.net/isprs2007/docs/41\\_Samadzadegan.pdf](http://www.geovisualisierung.net/isprs2007/docs/41_Samadzadegan.pdf).
- [17] Kim, J. H. and Sukkarieh, S. "Airborne Simultaneous Localisation and Map Building," *Robotics and Automation, Proceedings, ICRA '03. IEEE International Conference*, Vol. 1, 2003, pp. 406-411.
- [18] Barrows, G. L., "Future Visual Microsensors for Mini/Micro-UAV Applications," *Cellular Neural Networks and Their Applications, 2002.(CNNA 2002). Proceedings of the 2002 7<sup>th</sup> IEEE International Workshop*, 2002, pp. 498-506.
- [19] Samadzadegan, F. and Saeedi, S., "Vision Based Navigation of Aerial Vehicles Based on Geo-Referenced Imagery," *World Scientification Proceedings*, pp. 1105-1110.
- [20] Colomina, I., "GPS, INS and Aerial Triangulation: What is the Best Way for the Operational Determination of Photogrammetric Image Orientation?," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, No. 3, 1999, SECT 2W5, pp. 121-130.
- [21] Zheng, H., Chellappa, R., "A Computational Vision Approach to Image Registration", *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 2, No.3, 1993, pp. 311 -326.
- [22] Kumar. R., Sawhney. H., Asmuth. J., Pope, A. and Hsu, S., "Registration of Video to Georeferenced Imagery", *Fourteenth International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 2. 1998, pp.1393-1400.
- [23] Wiles. R., Hirvonen, D. J., Hsu, S. C., Kumar, R., Lehman, W. B., Matei, B. and Zhao, W. Y., "Video Georegistration: Algorithm and Quantitative Evaluation," *Computer Vision, ICCV 2001. Proceedings, Eighth IEEE International Conference*, Vol. 2, 2001, pp. 343-350.