

# A Survey on Vision Navigation Methods for UAV Navigation Applications

M.V. Arbabmir<sup>1</sup>, M. EbrahimiKachoie<sup>2\*</sup> and M. Norozi<sup>3</sup>

1, 2 and 3. Department of Mechanical Engineering, TarbiatModares University

\*Postal Code: 14115116, Tehran, IRAN

**ebrahimikm@modares.ac.ir**

*Inertial navigation system error increases due to sensor errors with the increase in time. Usually, to prevent the growth of navigation system error, inertial navigation systems are integrated with sensors or auxiliary systems. The importantly aided system is GNSS. Because of GNSS outage or its invalidity, the other auxiliary sensors are used to increase the accuracy of the inertial navigation system. In this article, the types of methods which are used by imaging camera for navigation or for the accuracy improvement of an inertial navigation system for UAVs are discussed. After reviewing the literature in the field of vision navigation in UAVs, the proper classification for vision navigation methods and the development of these methods are presented. In UAVs, the vision navigation techniques are based more on Map metric, optical flow, feature tracking, odometers and simultaneous localization and mapping.*

**Key word:** Inertial Navigation System, Vision Navigation, Estimator, UAV

---

1.PhD Student

2.Associate Professor (Corresponding Author)

3.M. Sc.

# مروری بر انواع روش‌های ناوبری تصویری برای کاربردهای ناوبری در پرنده‌های بدون سرنشین

محمودلی ارباب‌میر<sup>۱</sup>، مسعود ابراهیمی کچویی<sup>۲\*</sup> و محمد نوروز<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

\*تهران، کد پستی: ۱۴۱۱۵۱۱۶

ebrahimikm@modares.ac.ir

خطای سیستم ناوبری اینرسی به علت خطاهای حسگرهای آن، با افزایش زمان، زیاد می‌شود. معمولاً برای جلوگیری از رشد خطای سیستم ناوبری، این سیستم را با حسگر یا سامانه‌های کمکی تلفیق می‌کنند؛ که مهم‌ترین سامانه کمکی، سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی است. به دلیل امکان قطع سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی یا معتبر نبودن اطلاعات آن، از حسگرهای کمکی دیگر در زمان قطع سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی برای افزایش دقت سیستم ناوبری اینرسی استفاده می‌شود. در این مقاله، به بررسی انواع روش‌های استفاده‌شده از دوربین تصویربردار برای ناوبری یا افزایش دقت سیستم ناوبری اینرسی انواع پرنده‌های بدون سرنشین، پرداخته شده است. پس از مرور مقالات در حوزه ناوبری تصویری در پرنده‌های بدون سرنشین، دسته‌بندی مناسبی برای انواع روش‌های ناوبری تصویری ارائه شده و روند توسعه این روش‌ها بررسی شده است. در پرنده‌های بدون سرنشین ناوبری تصویری بیشتر بر اساس تکنیک‌های: نقشه متریک، شار نوری، ردیابی مشخصه‌ها، ادمتری و سیستم‌های ناوبری تصویری مبتنی بر تشکیل و استفاده هم‌زمان نقشه، انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: سیستم ناوبری اینرسی، ناوبری تصویری، تخمین گر، پرنده بدون سرنشین

## علائم و اختصارات

|  |  |   |
|--|--|---|
| Partial Invariant Feature Descriptor (PIFD)    | توصیف‌گر ویژگی مقاوم جزئی (پی‌آی‌اف‌دی)                  | سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی                |
| Fixed-Keypoint SIFT (FSIFT)                    | توصیف‌گر ویژگی ثابت جزئی نقاط کلیدی ثابت‌شده (اف‌سی‌ف‌ت) | سیستم ناوبری اینرسی                           |
| Inertial Measurement Unit (IMU)                | واحد اندازه‌گیری اینرسی                                  | سیستم موقعیت‌یاب جهانی                        |
| Particle Filter (PF)                           | فیلتر ذره‌ای   | تشکیل و استفاده هم‌زمان از نقشه               |
| Extended Kalman Filter (EKF)                   | فیلتر کالمن توسعه‌یافته                                  | تبدیل ویژگی مقاوم در برابر تغییر مقیاس (سیفت) |
| Digital Scene Matching Area Correlator (DSMAC) | تطبیق صحنه به روش همبستگی ناحیه‌ای                       | ویژگی‌های مقاوم سرعت داده‌شده (سیرف)          |
| Sum of Absolute Differences (SAD)              | مجموع تفاضلات مطلق                                       |   |
| Zero mean Normalized Cross Correlation (ZNCC)  | همبستگی تفاضلی نرمال‌شده با میانگین صفر                  |   |
| Kalman Filter (KF)                             | فیلتر کالمن  |   |
| Sigma Point Kalman Filter (SPKF)               | فیلتر کالمن نقاط سیگما                                   |   |
| Bierman-Thornton EKF (BTEKF)                   | فیلتر کالمن توسعه‌یافته بیرمن-تورتون                     |   |
| Global Navigation Satellite System (GNSS)      |  | ۱. دانشجوی دکتری                              |
| Inertial Navigation System (INS)               |  | ۲. استادیار (نویسنده مخاطب)                   |
| Global Positioning System (GPS)                |  | ۳. کارشناس ارشد                               |
| Simultaneous Localization And Mapping (SLAM)   |  |   |
| Scale Invariant Feature Transform (SIFT)       |  |   |
| Speeded Up Robust Features (SURF)              |  |   |

به‌طور کلی انواع سیستم‌های استفاده‌شده و یا در حال توسعه و تحقیق در زمینه ناوبری تصویری در انواع وسایل را می‌توان بر اساس داشتن، نداشتن یا تشکیل نقشه مرجع، بر اساس محیطی که در آن استفاده می‌شود، نوع دوربین و کاربرد آن دسته‌بندی نمود. دسته‌بندی بر اساس نقشه مرجع شامل: نقشه متریک<sup>۱۲</sup>، نقشه توپولوژیک<sup>۱۳</sup> و نقشه محلی موانع<sup>۱۴</sup> است. نوع دیگر سیستم‌های ناوبری تصویری مبتنی بر SLAM می‌باشند. سیستم‌های ناوبری تصویری بدون نقشه شامل: سیستم‌های ناوبری تصویری بر پایه شار نوری<sup>۱۵</sup>، ناوبری تصویری بر اساس ظاهر<sup>۱۶</sup>، ناوبری تصویری بر اساس استخراج ویژگی‌های کیفی تصویر و تفاسیر آن‌ها<sup>۱۷</sup>، ناوبری تصویری بر پایه ردیابی ویژگی‌ها<sup>۱۸</sup> و ناوبری تصویری بر اساس ادمتری تصویری<sup>۱۹</sup> است. تقسیم‌بندی بر اساس محیط ناوبری به ناوبری در محیط فضای بسته<sup>۲۰</sup> و ناوبری در محیط فضای باز<sup>۲۱</sup> محدود می‌شود و ناوبری در محیط باز خود نیز به دو دسته: محیط ساختاریافته<sup>۲۲</sup> و محیط ساختار نیافته<sup>۲۳</sup> تفکیک می‌شود.

به‌طور کلی چهار نوع دوربین در روش‌های ناوبری تصویری استفاده شده است که عبارتند از: دوربین استاندارد تک جهت<sup>۲۴</sup>، دوربین استریو<sup>۲۵</sup>، دوربین سه جهت<sup>۲۶</sup> و دوربین همه جهت<sup>۲۷</sup>. در مقالات مختلف، ناوبری تصویری در سه دسته: وسایل زمینی، هوایی و دریایی استفاده شده است.

نقشه‌های توپولوژیکی شامل یکسری گره و لینک برای توصیف محیط اطراف می‌باشند، به‌طوری‌که گره‌ها نقاطی از محیط اطراف و لینک‌ها فاصله و زمان بین دو گره را مشخص می‌کنند. در استراتژی مبتنی بر نقشه بر اساس نمایش توپولوژیکی فضا<sup>۲۸</sup>، با استفاده از یکسری صفات (گوشه‌ها، محل اتصال گره‌ها، ارتباط بین گره‌ها و خطوط در تصویر) که توسط الگوریتم پردازش تصویر استخراج می‌شوند، تصویر حاصل معرف نقشه محیط پیرامون خواهد بود (ارتباط بین صفات بر روی تصویر باعث به صورت نقشه عمل می‌کند).

|                           |                                  |
|---------------------------|----------------------------------|
| فیلتر کالمن بی‌بو (خنثی)  | Unscented Kalman Filter (UKF)    |
| اجماع نمونه تصادفی (رنسک) | Random Sample Consensus (RANSAC) |
| آشکارساز حرکت ابتدایی     | Elementary Motion Detector (EMD) |
| دستگاه ترویج بار          | Charge Coupled Device (CCD)      |
| مجموع مربع تفاضلات        | Sum of Squared Differences (SSD) |

## مقدمه

طی سال‌های اخیر با توسعه بسترهای سخت‌افزاری و افزایش قابلیت‌های محاسباتی، استفاده از INS در کاربردهای مختلف بر روی متحرک‌های هوایی، زمینی و دریایی روزبه‌روز در حال افزایش است. لیکن به دلیل خطاهای اولیه<sup>۴</sup> و همچنین خطاهای اندازه‌گیری<sup>۵</sup>، تخمین موقعیت برآورد شده توسط INS نسبت به موقعیت واقعی دارای انحراف<sup>۶</sup> بوده و این خطا با افزایش فاصله زمانی از لحظه مقداردهی اولیه سامانه به‌صورت نمایی، افزایش می‌یابد. از این‌رو عموماً از GPS به‌عنوان سامانه کمک ناوبری برای ترکیب با INS استفاده می‌شود. لیکن در صورتی‌که نتوان از GPS استفاده نمود، مثلاً در هنگام قطع سیگنال، می‌بایست از سامانه‌های کمک ناوبری دیگری جهت افزایش یکپارچگی<sup>۷</sup>، صحت و دقت ناوبری بهره جست. استفاده از دوربین در زمان عدم دسترسی به GPS، می‌تواند رشد خطای INS را کاهش دهد و در صورت داشتن تصویر مرجع، خطای آن را حذف نماید. ترکیب اطلاعات INS و اطلاعات تصویری با نام سیستم ناوبری اینرسی به کمک تصویر<sup>۸</sup> در مقالات بیان شده است. هدف از ترکیب اطلاعات چندین حسگر به دست آوردن سیستمی است که کارایی آن از تک‌تک حسگرها بیشتر است.

ترکیب اطلاعات را می‌توان به سه صورت: ترکیب ضعیف<sup>۹</sup>، ترکیب قوی<sup>۱۰</sup> و ترکیب عمیق<sup>۱۱</sup> انجام داد. در ترکیب ضعیف هر حسگر به‌طور مجزا مسئله ناوبری را حل نموده و سپس خروجی حسگرها با هم ترکیب می‌شوند. در ترکیب قوی ترکیب اطلاعات حسگرها قبل از تخمین ناوبری انجام می‌شود و حسگرها به‌صورت مجموعه‌ای واحدی در نظر گرفته می‌شوند. در ترکیب عمیق هر حسگر به‌عنوان یک سیستم یکپارچه فرآیند ترکیب را در داخل خودش انجام می‌دهد.

4. Initial errors
5. Measurement errors
6. Drift
7. Integrity
8. Vision-aided Inertial Navigation
9. Loose-Coupling
10. Tight-Coupling
11. Deep-Coupling

12. Metric map
13. Topological map
14. Obstacles local map
15. Optical Flow-Based Navigation Systems
16. Appearance-based strategies
17. Extraction of image qualitative characteristics
18. Navigation Techniques Based on Feature Tracking
19. Visual Odometry
20. Indoor
21. Outdoor
22. Structured Environments
23. Unstructured Environments
24. Single standard camera
25. Stereo camera
26. Three directional camera
27. Omnidirectional camera
28. Map-based navigation

## ناوبری تصویری مبتنی بر استفاده از نقشه

در پرنده‌های بدون سرنشین، تصاویر ماهواره‌ای و یا هوایی زمین مرجع<sup>۲۹</sup> شده به‌عنوان تصویر مرجع و یا همان نقشه متریک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مواقع وجود تصویر مرجع، ناوبری با تطبیق تصویر لحظه‌ای که توسط دوربین متصل به وسیله گرفته شده با تصویر مرجع که در یک دستگاه مختصات مشخص، موقعیت دهی شده است، انجام می‌شود. تطبیق تصویر دوربین با تصویر مرجع، تطبیق صحنه نامیده می‌شود. پس از تطبیق با توجه به مشخص شدن مختصات تمامی نقاط تصویر در دستگاه مختصات و با توجه به ارتباط این نقاط تصویر و پارامترهای اپتیکی نسبت به وسیله، موقعیت وسیله به دست می‌آید. تطبیق تصاویر به دو روش انجام می‌شود: ۱- بر اساس استخراج و تطبیق ویژگی مثل: SIFT، SURF، PIFD و روش‌های مبتنی بر شکل و ۲- بر اساس تطبیق ناحیه (صحنه) که روش‌های مبتنی بر شباهت هستند مثل همبستگی<sup>۳۰</sup> در حوزه مکان و حوزه فرکانس.

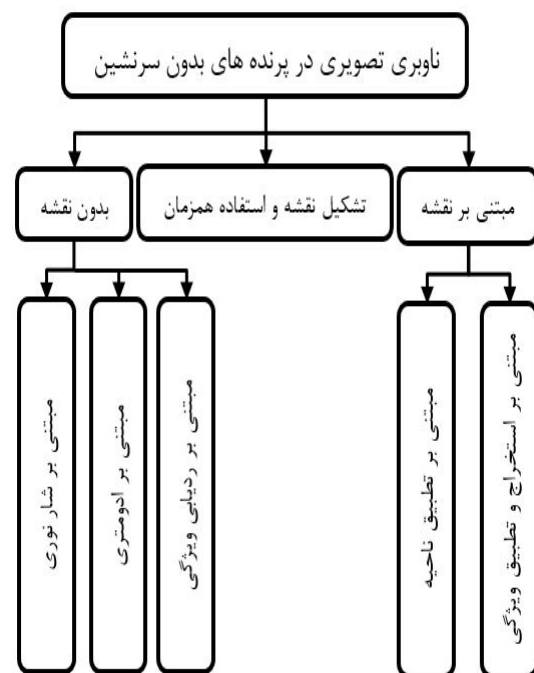
### تطبیق تصاویر براساس استخراج و تطبیق ویژگی

ویژگی به مشخصه‌ای از صحنه اطلاق می‌شود که در تصاویر مختلف از صحنه، قابل تشخیص است و در بسیاری از الگوریتم‌ها، ویژگی‌های استخراج شده نسبت به مقیاس، چرخش و تغییرات روشنایی تصویر، مقاوم می‌باشند. مهم‌ترین ویژگی‌ها در تصاویر عبارتند از: گوشه‌ها، خطوط، نمای کلی اشیاء یا نواحی خاص. تکنیک‌های مختلفی برای ردیابی ویژگی در تصاویر متوالی ویدیو برای ناوبری وجود دارند. در مرجع [۱] مروری بر روش‌های تطبیق تصاویر بر اساس استخراج ویژگی انجام شده است. آقای دیوید لو<sup>۳۱</sup> در سال ۲۰۰۴ ویژگی‌های مقاوم در برابر تغییرات روشنایی و تغییرات مقیاس را ارائه نمودند که با نام SIFT معروف است [۲]. الگوریتم SIFT بعدها مرجع بسیاری از کارهای تحقیقاتی در زمینه تطبیق تصاویر گردید. در مرجع [۳] الگوریتم SIFT بهبود داده شد و نقاط تطبیق اشتباه را به کمک موقعیت مکان‌های ثابت در تصویر تعریف از قبل نقاط کلیدی موقعیت‌های ثابت تصویر، حذف نمود. این الگوریتم با نام FSIFT معرفی شد. در مرجع [۴] به کمک ساختار گراف و با استفاده از ویژگی‌های SIFT سرعت و مقاومت الگوریتم SIFT را برای تطبیق تصاویر بهبود داد. مرجع [۵] با امتیازدهی به ویژگی‌هایی که به کمک الگوریتم SIFT استخراج شده‌اند و حذف ویژگی‌های غیر مرتبط، سرعت محاسباتی در تطبیق

تکنیک‌های مبتنی بر تطبیق ظواهر بر پایه ذخیره تصاویر قبلی استوار می‌باشند. این تصاویر ذخیره شده به‌عنوان الگو به کار می‌روند. ربات، تعیین موقعیت و ناوبری خود را بر اساس تطبیق تصویر فعلی با تصاویر الگو انجام می‌دهد. ناوبری تصویری بر اساس روش‌های: نقشه‌های توپولوژیکی، نقشه‌های محلی موانع، بر اساس ظاهر و بر اساس ویژگی‌ها کیفی تصویر و تفسیر آن‌ها، در انواع ربات‌های زمینی استفاده شده است. ناوبری در فضای باز در محیط پیرامون ساختاریافته به ردیابی جاده اطلاق می‌شود. ردیابی و یا تعقیب جاده قابلیت است که خطوط جاده را تشخیص و جهت ناوبری استفاده می‌کند. این تکنیک در خودروهای ربات استفاده شده است. در بخش‌های آتی سعی شده است کلیه تحقیقات شاخص در زمینه ناوبری تصویری پرنده‌های بدون سرنشین مورد بررسی قرار گرفته و به محققان کشورمان معرفی شوند.

## دسته‌بندی روش‌های ناوبری تصویری

در پرنده‌های بدون سرنشین، ناوبری تصویری بیشتر بر اساس تکنیک‌های: نقشه متریک، شار نوری، ردیابی مشخصه‌ها، ادمتری و سیستم‌های ناوبری تصویری مبتنی بر SLAM، انجام شده است. پیشینه ناوبری تصویری در پرنده‌های بدون سرنشین را می‌توان به‌صورت بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل (۱) دسته‌بندی کرد:



شکل ۱- دسته‌بندی روش‌های ناوبری تصویری در پرنده‌های بدون سرنشین

29. Georeference

30. Correlation

31. David Lowe

سال ۲۰۱۴ استیون دامبل<sup>۴۲</sup> ایده جالب استفاده از یک دوربین جهت مشاهده و استخراج عوارض روبرو را ارائه دادند [۱۴]. برای تطبیق عوارض استخراج‌شده توسط دوربین با نقشه عوارض زمین، ابتدا نقشه عوارض زمین (دید از بالا) به دید از روبرو تبدیل می‌شود و به کمک الگوریتم بهینه‌سازی تطبیق انجام می‌شود. ایشان در سال ۲۰۱۶ با استفاده از استخراج تقاطع راه‌ها از تصاویر هوایی و تطبیق آن‌ها با نقشه تقاطع راه‌ها، توانستند موقعیت و وضعیت INS را به کمک EKF، اصلاح کنند [۱۵].

### تطبیق تصاویر براساس تطبیق ناحیه

در سال ۱۹۸۰، مقاله‌ای توسط کار<sup>۴۳</sup> و سوبک<sup>۴۴</sup> ارائه‌شده و تطبیق صحنه به روش همبستگی را در موشک تام هاوک<sup>۴۵</sup> که یک موشک کروژ<sup>۴۶</sup> برد بلند است، بیان نموده. روش استفاده‌شده در این مقاله با نام DSMAC معروف است [۱۶]. امکان تلفیق INS و سیستم ناوبری تصویری در مرجع [۱۷] بررسی شده است. در این تحقیق از EKF برای ترکیب اطلاعات INS با حسگرهای ارزان قیمت و کیفیت پائین و سیستم ناوبری تصویری با فرض معلوم بودن موقعیت دقیق نقاط شاخص مسیر و روش‌های مختلف آن استفاده شده است. مقاله [۱۸] مروری بر روش‌های تطبیق تصاویر بر اساس تطبیق ناحیه (صحنه) انجام داده است. الگوریتم‌های مبتنی بر تطبیق ناحیه به چهار گروه عمده تقسیم می‌شوند که عبارتند از: ۱- روش‌های مبتنی بر همبستگی متقابل<sup>۴۷</sup> ۲- روش‌های مبتنی بر فوریه<sup>۴۸</sup> ۳- روش‌های مبتنی بر اطلاعات غیرمرتبط<sup>۴۹</sup> و ۴- روش‌های بهینه‌سازی<sup>۵۰</sup>. در مرجع [۱۹] برتیلسون<sup>۵۱</sup> تطبیق تصاویر را به روش همبستگی بین تبدیل فوریه تصاویر انجام داده است. تبدیل فوریه موجب مقاومت الگوریتم در مقابل چرخش می‌گردد. در مرجع [۲۰] روش ساده‌تر بر اساس همبستگی متقابل برای تطبیق تصاویر انجام شده است. در مرجع [۲۱] از SSD برای معیار شباهت بین تصاویر استفاده شده است. در مرجع [۲۲] پرات<sup>۵۲</sup>، الگوریتم همبستگی متقابل را به کمک فیلتر بهبود داده تا در تصاویر دارای نویز<sup>۵۳</sup> هم عملکرد مناسبی داشته باشد. در [۲۳] ون وی<sup>۵۴</sup> از

تصاویر را افزایش داد. بی<sup>۳۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۸ [۶] روشی جدید در تطبیق تصاویر ارائه داد که هم سرعت و هم دقت خوبی در تطبیق دارد. این الگوریتم با نام SURF در تطبیق تصاویر به کمک ویژگی بسیار کاربرد دارد.

ارهارد<sup>۳۳</sup> و همکارانش در ۲۰۰۹ مکان‌یابی به کمک فقط دوربین و بدون دخالت GPS و IMU انجام دادند که نمونه عملی آن با استفاده از موبایل نوکیا N95 و پرنده چهار ملخه<sup>۳۴</sup> انجام شده است. ابتدا یک پرواز انجام شده و تصاویر این مسیر ذخیره می‌شود. در مرحله بعد و با کمک بازبینی آنلاین<sup>۳۵</sup> تصاویر متوالی و تطابق با نقشه، ناوبری بر روی همان مسیر انجام می‌شود [۷]. در مرجع [۸] از یک ویژگی زمین مرجع برای ناوبری تصویری مبتنی بر نقشه استفاده شده است. دانگ‌جین لی<sup>۳۶</sup> و همکارانش در ۲۰۱۳، سیستم تصویری با سیستم ناوبری مبتنی بر عوارض زمین را ترکیب کردند. اساس سیستم تصویری ردیابی مشخصه‌های تصویر و هموگرافی<sup>۳۷</sup> بوده و مشاهدات تصویر و عوارض زمین با PF تلفیق شده‌اند [۹]. مقاله ارائه‌شده توسط یو کیوفنگ<sup>۳۸</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۴ با عنوان اصلاح تمامی پارامترهای ناوبری بر پایه تطبیق صحنه برای یک هواپیما است. ایده اصلی این مقاله استفاده هم‌زمان از چندین نقطه مشخصه به‌جای یک نقطه در تطبیق صحنه و اصلاح تمامی پارامترهای ناوبری است [۱۰]. در صورتی که بیش از سه نقطه بین دو تصویر مرجع و تصویر اخذشده توسط دوربین نصب‌شده بر روی هواپیما، تطبیق داده شود به کمک الگوریتم‌های فتوگرامتری<sup>۳۹</sup> که به PNP<sup>۴۰</sup> مشهورند، می‌توان موقعیت سه‌بعدی و وضعیت دوربین را محاسبه کرد [۱۱، ۱۲]. در این تحقیق، ابتدا تطبیق صحنه بین تصویر لحظه‌ای و تصویر مرجع که داده‌های ارتفاع را نیز دارد انجام می‌شود در مرحله دوم به کمک چندین نقطه که از خروجی تطبیق به‌دست آمده و الگوریتم فتوگرامتری، موقعیت سه‌بعدی و وضعیت در دستگاه مختصات جغرافیایی محاسبه می‌شود. نهایتاً با استفاده از موقعیت‌ها و وضعیت‌های محاسبه‌شده فعلی و قبلی تصاویر متوالی و به کمک روش‌های فیلترکردن، سرعت‌های خطی و زاویه‌ای محاسبه‌شده و در صورت نیاز شتاب‌ها نیز محاسبه می‌گردند. جهت مدل پروجکشن<sup>۴۱</sup> در این مقاله از مرجع [۱۳] استفاده شده است. در

42. Steven Dumble

43. Carr

44. Sobek

45. Tomahawk

46. Cruise Missile

47. Cross-Correlation based

48. Fourier based

49. Mutual information based

50. Optimization methods

51. Berthilsson

52. Pratt

53. Noise

54. Van Wie

32. Bay

33. Erhard

34. Quadrotor

35. Online

36. Lee Dongjin

37. Hemography

38. Yu QiFeng

39. Photogrammetry

40. Perspectiv-n-point

41. Projection

همبستگی بین لبه‌های تصاویر استفاده نموده است. این روش در برابر تغییرات روشنایی مقاوم است. معمولاً از روش‌های همبستگی به خاطر پیاده‌سازی آسان در سخت‌افزار و به‌هنگام<sup>۵۵</sup> بودن بیشتر استفاده می‌شود. برای افزایش سرعت محاسبات و مقاومت در برابر نویز بیشتر روش‌های همبستگی مبتنی بر تبدیل فوریه به‌کار می‌روند. در مرجع [۲۴] روش SAD برای تصاویر رنگی ارائه شده است. مرجع [۲۵] روش ZNCC که از معیار شباهت همبستگی متقابل نرمالایز<sup>۵۶</sup> شده با میانگین استفاده می‌کند را ارائه نموده است. مرجع [۲۶] از یک روش ترکیبی استفاده نموده که ابتدا شباهت بین پنجره مدل<sup>۵۷</sup> و جستجوی آن در زیر تصاویر<sup>۵۸</sup> بر اساس معیار شباهت همبستگی متقابل نرمالایز شده را محاسبه و بیشینه را به‌عنوان منطقه تطبیق در نظر می‌گیرد.

همبستگی بین آن‌ها، توسط آقای اسمیت و همکارش [۳۳] و [۳۴]، مقالات زیادی در زمینه SLAM در ناوبری تصویری و ناوبری سونار، ارائه گردید. در منبع [۳۵] مروری بر روش‌های ترکیب اطلاعات دوربین و INS انجام شده است. در این مرجع ترکیب INS و دوربین با دو رویکرد تشکیل نقشه (SLAM) و بدون تشکیل نقشه بررسی شده است. داوین<sup>۶۸</sup> در سال ۲۰۰۴، SLAM سه‌بعدی را به روش تصویری انجام داد [۳۶]. کیم<sup>۶۹</sup> و سوکاریه<sup>۷۰</sup> سیستم SLAM را برای سیستم تلفیق GPS/INS و در محیط ناشناخته فضای باز بر روی یک پرند بدون سرنشین برای مواقعی که سیگنال GPS در دسترس نیست، به کمک مشاهدات زاویه‌ای دوربین تصویربرداری، پیاده‌سازی نمودند [۳۷]. در مرجع [۳۸] نتایج سیستم ناوبری تلفیقی GNNS/INS در کنار سیستم تصویر SLAM ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر دقت صحیح ناوبری به کمک سیستم کمک ناوبری SLAM در شرایط عدم دسترسی به GNSS و محیط‌های ناشناخته است. در مرجع [۳۹] الگوریتم SLAM با استفاده از یک دوربین تک‌چشمی، INS و SPKF، برای استخراج متغیرهای حالت پرند و موقعیت موانع زمینی پیاده‌سازی شده است. در سال ۲۰۰۷ کلین<sup>۷۱</sup> و همکارش، الگوریتم SLAM بر پایه رویکرد کی فریم<sup>۷۲</sup> را ارائه نمودند [۴۰]. در این روش، مقیاس به‌عنوان یک حالت به بردار حالت در فیلتر EKF ترکیب اطلاعات اندازه‌گیری‌های اینرسی و تصویر، اضافه شده است. اغلب از EKF و PF برای ترکیب اطلاعات تصویر با دیگر حسگرها استفاده شده است. تعیین موقعیت و نقشه هم‌زمان تصویری<sup>۷۳</sup> با اندازه‌گیری‌های اینرسی با استفاده از PF در مراجع [۴۱-۴۳] گزارش شده است. تورنکوویست<sup>۷۴</sup> و همکارانش در ۲۰۰۹ راهکار استفاده از PF در حل مسئله SLAM برای محیط فضای باز و بر روی یک پرند بدون سرنشین را ارائه نمودند. در این سیستم علاوه بر حسگرهای اینرسی و دوربین از بارومتر نیز استفاده شده است [۴۴]. آرتیدا<sup>۷۵</sup> و همکارانش سیستم SLAM فقط بر مبنای تصویر و بدون دخالت حسگرهای اینرسی و GPS را ارائه دادند. این سیستم برای محیط بیرون و ساختاریافته طراحی و بر روی پرند بدون سرنشین که یک دوربین سیاه‌وسفید تکی بر روی آن نصب شده، تست شده است [۴۵]. آئوف<sup>۷۶</sup> و همکارانش الگوریتم SLAM

روشنایی مقاوم است. معمولاً از روش‌های همبستگی به خاطر پیاده‌سازی آسان در سخت‌افزار و به‌هنگام<sup>۵۵</sup> بودن بیشتر استفاده می‌شود. برای افزایش سرعت محاسبات و مقاومت در برابر نویز بیشتر روش‌های همبستگی مبتنی بر تبدیل فوریه به‌کار می‌روند. در مرجع [۲۴] روش SAD برای تصاویر رنگی ارائه شده است. مرجع [۲۵] روش ZNCC که از معیار شباهت همبستگی متقابل نرمالایز<sup>۵۶</sup> شده با میانگین استفاده می‌کند را ارائه نموده است. مرجع [۲۶] از یک روش ترکیبی استفاده نموده که ابتدا شباهت بین پنجره مدل<sup>۵۷</sup> و جستجوی آن در زیر تصاویر<sup>۵۸</sup> بر اساس معیار شباهت همبستگی متقابل نرمالایز شده را محاسبه و بیشینه را به‌عنوان منطقه تطبیق در نظر می‌گیرد.

### ناوبری تصویری مبتنی بر SLAM

روش ناوبری SLAM در واقع ناوبری کاملاً خودمختار است که هدف از آن تهیه نقشه محیط، بدون داشتن هیچ دانش اولیه‌ای نسبت به آن و موقعیت‌یابی وسیله در همان نقشه به‌صورت هم‌زمان است. مزیت عمده این روش بر روش‌های تطبیق صحنه، این است که احتیاجی به نقشه‌های از پیش تعیین شده برای عمل انطباق نداشته و وسیله، بدون داشتن هیچ اطلاع قبلی از محیط می‌تواند مسیر و موقعیت خود را تشخیص دهد. مبانی SLAM و تاریخچه آن تا سال ۲۰۰۶ توسط تیم بیرلی<sup>۵۹</sup> و دورانت-وایت<sup>۶۰</sup> ارائه شده است [۲۷].

اولین بار مسئله SLAM در سال ۱۹۸۶ و در کنفرانس رباتیک و اتوماسیون مطرح شد. اسمیت<sup>۶۱</sup> و همکارش [۲۸] و دورانت-وایت [۲۹] مبانی احتمالاتی را برای روابط بین نقاط شاخص و عدم قطعیت آن‌ها ارائه دادند. آیچه<sup>۶۲</sup> و فایوگراس<sup>۶۳</sup> [۳۰] در ناوبری تصویری و کرولی<sup>۶۴</sup> [۳۱] و چاتیلا<sup>۶۵</sup> و لایوموند<sup>۶۶</sup> [۳۲] در ناوبری به کمک سونار<sup>۶۷</sup>، از الگوریتم‌های بر مبنای KF استفاده نمودند. بعد از ارائه مقاله ایجاد نقشه نقاط شاخص و محاسبه

55. Real Time  
 56. Normalize  
 57. Template window  
 58. Sub-windows  
 59. Bailey  
 60. Durrant-Whyte  
 61. Smith  
 62. Ayache  
 63. Faugeras  
 64. Crowley  
 65. Chatila  
 66. Laumond  
 67. Sonar

68. Davison  
 69. Kim  
 70. Sukkarieh  
 71. Klein  
 72. Keyframe  
 73. Visual SLAM  
 74. Törnqvist  
 75. Artieda  
 76. Aouf

## ناوبری تصویری مبتنی بر ردیابی ویژگی‌ها

مسئله ردیابی ویژگی در اکثر سیستم‌ها به دو زیر مسئله تقسیم می‌شود [۶۵]: اول، یافتن ویژگی برای ردیابی و دوم تطبیق ویژگی ردیابی شده در ناحیه‌ی مورد مشاهده. در سیستم کمک ناوبری تصویری مبتنی بر ردیابی ویژگی، همانند SLAM نقشه‌ای از قبل وجود ندارد و موقعیت نقاط شاخص به کمک INS و مشاهدات دوربین تخمین زده شده و در تصویر متوالی بعدی از آن‌ها استفاده می‌شود.

تصحیح خطای موقعیت، سرعت و وضعیت یک هواپیمای بدون سرنشین با استفاده از تصاویر متوالی در یک محیط ناشناخته در مراجع [۶۶، ۶۷] مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق از اطلاعات تصاویر متوالی اخذ شده توسط دوربینی که بر روی وسیله پرنده قرار گرفته به‌عنوان سیستم کمکی استفاده می‌شود. استفاده از اطلاعات سیستم بینایی به عنوان بردار مشاهده در EKF موجب افزایش دقت INS شده و شیب رشد خطای آن را کاهش می‌دهد. در مرجع [۶۸] انتخاب بهترین نقاط تطبیق در تصاویر متوالی برای تصحیح ناوبری هواپیمای بدون سرنشین ارائه شده است. در این تحقیق روشی جدید مبتنی بر تلفیق نقاط تطبیق بدست آمده از الگوریتم SIFT و نقاط استخراجی از پیشگویی براساس معادلات ناوبری وسیله پرنده ارائه می‌شود. روش پیشنهادی که براساس پیشگویی موقعیت نقاط تصویر دریافتی در تصویر مرجع و یا تصاویر فریم‌های بعدی است، موجب حذف نقاط تطبیقی اشتباه و نقاط خارج از محدوده می‌گردد. به کمک این روش نقاط ناشی از تطبیق اشتباه الگوریتم SIFT کاملاً حذف شده و فقط نقاط صحیح و دارای خطای کمتر از خطای ناوبری انتخاب می‌شوند. برخلاف SLAM نقشه‌ای از نقاط شاخص، تهیه نمی‌شود و در هر فریم تصویر، موقعیت نقاط با فریم یا فریم‌های چند مرحله قبل مقایسه می‌شود.

در سال ۲۰۰۱ ترکیب اطلاعات INS، GPS و تصویر، با استفاده از EKF برای تخمین: موقعیت، سرعت و وضعیت یک هواپیما ارائه شده است [۶۹]. EKF خطاهای حالات ناوبری را با استفاده از مشاهدات GPS و اندازه‌گیری‌های تصویر، تخمین می‌زند. در این سامانه، سیستم تصویر یکسری اطلاعات مشاهده شده از ویژگی‌های ناشناخته را برای اصلاح ناوبری ردیابی می‌کند. در سال ۲۰۰۲ پارامترهای ناوبری یک هواپیمای بدون سرنشین شامل اطلاعات موقعیت و سرعت هواپیما با استفاده از تصاویر متوالی تخمین زده شد. به خاطر واگرایی این روش در بخش‌هایی از مسیر از تطبیق نقشه هم استفاده شده است [۷۰]. در مرجع [۷۱] نتایج به‌هنگام سیستم ناوبری تصویری مبتنی بر ردیابی ویژگی‌ها در کنار یک سیستم ناوبری تلفیقی GPS/INS برای یک پرنده بدون سرنشین ارائه شده است. عملکرد ردیابی ویژگی به‌شدت متأثر از

به کمک دوربین و IMU را بر روی یک پرنده بدون سرنشین و با استفاده از PF انجام داده و مقایسه با کارهای مشابه را نیز ارائه نمودند [۴۶]. کابالرو<sup>۷۷</sup> و همکارانش به کمک یک دوربین که با زاویه بر روی یک هلیکوپتر نصب شده و با روش ادمتری و هموگرافی و تلفیق با SLAM دقت مکان‌یابی را افزایش دادند. در این پروژه سیستم بر مبنای تصویر بوده و حسگرهای اینرسی بکار گرفته نشده‌اند [۴۷]. در سال ۲۰۱۱، ویس<sup>۷۸</sup> و همکارانش، یک سیستم SLAM با دوربین تکی و ترکیب با INS پیاده‌سازی کردند [۴۸-۵۱]. سیرتکایا<sup>۷۹</sup> در سال ۲۰۱۲ مقاله‌ای در زمینه تلفیق حسگرهای اینرسی و تصویری برای مدل‌کردن نقشه سه‌بعدی شهری ارائه داد [۵۲]. در مرجع [۵۳] نتایج سیستم SLAM برای یک پرنده بدون سرنشین در یک محیط آزاد ساختار نیافتده ارائه شده است. به کمک یک دوربین و استخراج ویژگی‌های سه‌بعدی محیط، حرکت شش درجه آزادی وسیله در یک EKF تخمین زده شده است. مرجع [۵۴] ترکیب GNSS با یک دوربین با رویکرد SLAM را ارائه نموده است. مگری<sup>۸۰</sup> در سال ۲۰۱۵ سیستم کمک ناوبری تصویری SLAM را با استفاده از BTEKF انجام دادند و به کمک این فیلتر پایداری تخمین را بالا برده‌اند [۵۵]. همچنین توانستند معیاری برحسب کواریانس<sup>۸۱</sup> برای انتخاب یا حذف نقاط ایجاد کنند. این الگوریتم بر روی یک هلیکوپتر و در محیط بیرونی محدود تست شد. اساس کار این تحقیق برگرفته از مقالات آقای دویژن<sup>۸۲</sup> که برای اولین بار توانست مسئله SLAM را به‌صورت عملی در سال ۲۰۰۳ تست کند [۳۶، ۵۶، ۵۷] و نیز فیلتر BTEKF [۵۸] است. آقای آتسگاه، تار شدگی تصاویر را به کمک اطلاعات دینامیک پرنده در یک سیستم MonoSLAM اصلاح کردند [۵۹، ۶۰]. در سال‌های اخیر مقالات زیادی در حوزه SLAM تصویری برای پرنده‌های بدون سرنشین ارائه شده است [۴۶، ۴۹، ۶۱-۶۴].

## ناوبری تصویری بدون نقشه

این دسته از سیستم‌های ناوبری تصویری شامل تمام رویکردهایی است که برای ناوبری نیازی به دانستن اطلاعات از محیط پیرامون نیست. در این نوع از ناوبری ربات با استفاده از مشاهدات محیط پیرامون خود و روش‌هایی که در این بخش به آن‌ها پرداخته خواهد شد، ناوبری وسیله را انجام می‌دهد.

77. Caballero

78. Weiss

79. Sirtkaya

80. Magree

81. Covariance

82. Davison

به یک سیستم تلفیقی GPS/INS و دوربین بود، به کمک ردیابی تصاویر متوالی و الگوریتم SIFT انجام شد. کالیبراسیون دوربین و IMU در این مقاله به خوبی ارائه شده است [۸۰]. در مرجع [۸۱] روش جدیدی بر مبنای مشاهده یک نقطه زمینی در سه وضعیت مختلف هندسی وسیله، در سیستم کمک ناوبری تصویر به کار برده شد. در این روش در مواقع قطع GPS، به کمک اطلاعات INS و به کمک یک دوربین، موقعیت نقاط زمینی بدون هیچ اطلاعات اولیه‌ای، تخمین زده شدند. این تخمین بر اساس سه تصویر ذخیره شده که همپوشانی داشته و در سه وضعیت مختلف ثبت شده بودند و به کمک تکنیک‌های پردازش تصویر استخراج حرکت، انجام شد. اطلاعات به دست آمده از تصویر، به کمک EKF با INS تلفیق شده و علاوه بر تصحیح موقعیت، سرعت و وسیله در سه راستا نیز تصحیح شد. در سال ۲۰۱۲ یک حل بسته برای تعیین مقیاس مطلق، سرعت و وضعیت، بر اساس تلفیق اطلاعات IMU و دوربین، بدون داشتن اطلاعات قبلی از نقاط شاخص زمینی ارائه شد [۸۲]. در مرجع [۸۳] با استفاده از مولد لیزر، ابهام مقیاس در سیستم کمک ناوبری تصویر با یک دوربین تکی، حل شده است. مشاهده‌پذیری سیستم کمک ناوبری تصویر در مرجع [۸۴] بررسی شد. در سال ۲۰۱۳ ناپایداری و مشاهده‌پذیری سیستم ناوبری اینرسی- تصویری در محیط واقعی بررسی و یک فیلتر مشاهده‌پذیر مقید پیاده‌سازی شده است [۸۵]. در مرجع [۸۶] علاوه بر بررسی مشاهده‌پذیری، حل بسته معادلات استخراج حرکت از مشاهدات دوربین تکی و IMU ارائه شده است. در این تحقیق حل بسته تعیین موقعیت با سه نقطه از تصویر برای یک پرنده بدون سرنشین کوچک با بهره‌گیری از الگوریتم RANSAC و با محاسباتی کم ارائه شد. در مرجع [۸۷] به توسعه سیستم کمک ناوبری اینرسی- تصویری که متغیرهای حالت و ویژگی‌های تصویر ناهمبسته هستند و از یک دوربین تک‌چشمی استفاده می‌کند، برای پرنده‌های بدون سرنشین پرداخته است. در این تحقیق بر توسعه یک پاسخ ناوبری دقیق و پایدار در شرایط واقعی مختلف تمرکز شده است. در نهایت سیستم ناوبری تلفیقی به کمک BTEKF تلفیق یافته است. سیستم تلفیق ارائه شده باعث بهبود دقت و ثبات اندازه‌گیری‌های ناوبری در شبیه‌سازی و تست پروازی نسبت به نتایج ناوبری سیستم تلفیق با یک EKF معمولی می‌گردد. در مرجع [۸۸] ارتباط بین مشخصه‌های مشاهده‌پذیری سیستم و تناقض تخمین‌گر برای سیستم کمک ناوبری اینرسی- تصویری بررسی شده است. با استفاده از این موضوع تخمین‌گر خطی شده مورد استفاده در سیستم تلفیق دارای دقت و ثبات مطلوب‌تری نسبت به سیستم تلفیق متعارف دارد. نتایج بهبود بر روی داده‌های واقعی تست شده و نتایج ناوبری همچنان مطلوب بوده است. در مرجع [۸۹] به بررسی تناقض

دقت سیستم ناوبری است. در سال ۲۰۰۵ یک هدف زمینی در حین پرواز، به کمک دوربین مشاهده شده و از آنجاکه اطلاعاتی از قبیل اندازه و موقعیت هدف از قبل معلوم بودند، با تلفیق مشاهدات در EKF سیستم ناوبری اینرسی اصلاح شده و کنترل پرواز انجام شد [۷۲]. در سال ۲۰۰۶ آقای میخائیل وت<sup>۸۳</sup> رساله دکتری خود را در زمینه ترکیب اطلاعات تصویر با حسگرهای اینرسی به منظور بهبود INS انجام دادند [۷۳]. در این رساله ترکیب اطلاعات دوربین و INS به کمک EKF انجام شده است. استخراج موقعیت عمودی نقاط شاخص به سه روش: استفاده از عوارض، دوربین استریو و ردیابی زمانی مشخصه‌های تصاویر انجام شده است. لانگلان<sup>۸۴</sup> رساله دکتری خود را در زمینه تخمین متغیرهای حالت INS به کمک مشاهدات تصویر انجام داده و از این سیستم ناوبری برای پرواز خودکار یک پرنده بدون سرنشین در یک محیط با موانع استفاده کرده است [۷۴]. در سال ۲۰۰۷ الگوریتم تلفیقی سیستم تصویری با INS ارائه شد که در بخشی از مسیر اطلاعات شار نوری و در بخشی دیگر اطلاعات تصویر مرجع به همراه نقشه عوارض زمین را استفاده می‌کرد. این الگوریتم بر روی داده‌های آنلاین<sup>۸۵</sup> تست پروازی یک راکت تست شد [۷۵]. در مرجع [۷۶] از UKF برای سیستم کمک ناوبری تصویری استفاده و با EKF مقایسه شد. UKF از لحاظ پایداری و دقت از EKF عملکرد بهتری در شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی داشته است. در مرجع [۷۷] یک رویکرد متفاوت تخمین موقعیت، سرعت و وضعیت بر پایه تخمین خطای حالت ناوبری به صورت به‌هنگام ارائه شد. در این تحقیق مدل مشاهده بر پایه قیود هندسی بوده که این قیود ارتباط بین یک ویژگی در تصاویر مختلف (موقعیت‌های مختلف) دوربین است. این مدل مشاهده نیازی به اضافه کردن موقعیت سه‌بعدی ویژگی در بردار حالت ندارد. در سال ۲۰۰۹ از ترکیب اطلاعات INS، بارومتر و دوربین برای ناوبری هلیکوپتر استفاده شد. اطلاعات ادمتری و تطبیق صحنه در یک PF ترکیب شده و موقعیت به دست آمده توسط یک EKF با INS و بارومتر ترکیب می‌شود [۷۸]. در سال ۲۰۱۰ به کمک تصاویر متوالی و ردیابی مشخصه‌ها در تصاویر متوالی، نقشه سه‌بعدی به صورت آنلاین استخراج شده و سپس توسط الگوریتم تطبیق کانتور زنجیره‌ای<sup>۸۶</sup>، موقعیت بر روی نقشه به صورت آنلاین استخراج می‌شود [۷۹]. برای یافتن نقشه سه‌بعدی از روی تصاویر متوالی از الگوریتم RANSAC استفاده شده است. در سال ۲۰۱۱ موقعیت اهداف متحرک، توسط یک پرنده بدون سرنشین که مجهز

83. Michael Veth

84. Langelan

85. Offline

86. Terrain Contour Matching



نرگس صادق زاده و همکارانش از دو تخمین گر KF و PF به صورت متوالی در تلفیق اطلاعات تصویر و IMU استفاده کردند و به کمک آن دریافت ژيروسکوپ‌ها و وضعیت وسیله را تخمین زدند [۹۷]. در سال ۲۰۱۵ مرجع [۹۸] روش‌های مختلفی برای ناوبری تصویری با محاسبات کم برای پرنده‌های کوچک ارائه کرد. در سال ۲۰۱۶ الگوریتم تلفیق دوربین و IMU برای یک پرنده چهار ملخه ارائه شد که در آن الگوریتم، اطلاعات هموگرافی استخراجی از تصویر، به‌عنوان بردار مشاهده در EKF استفاده شد [۹۹]. در این روش با فرض زمین مسطح، وضعیت، سرعت و بایاس<sup>۹۰</sup> حسگرهای اینرسی تخمین زده شد و موقعیت هم برای بازه‌های زمانی کوتاه قطع GPS معتبر شد. برای استخراج سمت از مگنتومتر<sup>۹۱</sup> و برای یافتن ارتفاع از بارومتر در این تحقیق استفاده شده است.

### ناوبری تصویری مبتنی بر ادومتری

ادومتری تصویری فرآیند تخمین تغییر موقعیت<sup>۹۲</sup> یک وسیله به کمک ورودی یک یا چند دوربین که روی وسیله قرار می‌گیرند، است. حوزه کاربری این سیستم شامل رباتیک، واقعیت افزوده<sup>۹۳</sup> و خودرو است.

واژه ادومتری تصویری در سال ۲۰۰۴ توسط نیستر<sup>۹۴</sup> ارائه شد [۱۰۰]. به‌واسطه شباهتی که ادومتری تصویری با ادومتری چرخ<sup>۹۵</sup> (که به‌طور تدریجی حرکت وسیله را با تلفیق تعداد دور چرخ‌ها در یک بازه زمانی تخمین می‌زند) دارد، این واژه انتخاب شده است. به همین ترتیب ادومتری تصویری به کمک بررسی تغییرات حرکت از روی تصاویر به‌دست‌آمده از دوربین، موقعیت وسیله را به صورت تدریجی تخمین می‌زند.

برای اینکه ادومتری تصویری به‌طور کارا عمل کند، بایستی شروط روشنایی کافی محیط و صحنه ایستا برآورده گردد. علاوه بر این، فریم‌های متوالی، می‌بایست همپوشانی کافی صحنه را دارا باشند. مزیت ادومتری تصویری نسبت به ادومتری چرخ این است که ادومتری تصویری تحت تأثیر سرش چرخ در زمین‌های ناهموار یا شرایط نامطلوب دیگر قرار نمی‌گیرد.

مسئله تعیین وضعیت نسبی دوربین و ایجاد ساختار سه‌بعدی از مجموعه تصاویر دوربین (کالیبره یا غیرکالیبره)، در مبحث بینایی ماشین، با عنوان ایجاد ساختار از حرکت (ساختار حرکت)<sup>۹۶</sup> شناخته می‌شوند [۱۰۱، ۱۰۲]. ادومتری تصویری یک حالت خاصی از

تخمین گر مورد استفاده در سیستم کمک ناوبری اینرسی-تصویری از نقطه نظر مشاهده‌پذیری پرداخته شده است. فرض شده که علت اصلی تناقض‌ها، مشاهده‌پذیر نبودن برخی اطلاعات است که بر عدم قطعیت‌های کوچک، خطاهای تخمین بزرگ‌تر و واگرایی تأثیر دارد. در این تحقیق یک سیستم کمک ناوبری اینرسی-تصویری مقید شده مشاهده‌پذیر ارائه شده است که به‌طور صریح مسیرهای غیرقابل مشاهده سیستم را شناسایی می‌کند. این چارچوب برای سیستم‌های تصویر مبتنی بر ادومتری و SLAM نیز مورد استفاده خواهد بود. در مرجع [۹۰] مسئله تخمین حالات وسیله متحرک در سه بعد با استفاده از اندازه‌گیری‌های اینرسی و مشاهدات مشخصه‌های تصویر که به صورت خط هستند ارائه شده است. در این تحقیق مشخصه‌های مشاهده‌پذیری سیستم کمک ناوبری اینرسی-تصویری بررسی شده و درجه آزادی مشاهده‌ناپذیری شناسایی شده است. علاوه بر این، از این نتایج برای بهبود ثبات تخمین گر EKF استفاده شده است. در نهایت الگوریتم ارائه‌شده مورد تست و ارزیابی قرار گرفته است. شایان ذکر است الگوریتم ارائه‌شده در سیستم‌های تصویری ادومتری و SLAM نیز نتایج مطلوبی دارد. تلفیق INS، دوربین و رادار ارتفاع‌سنج با به‌کارگیری فیلتر جرم- نقطه<sup>۸۷</sup> در مرجع [۹۱] انجام شد. در این تحقیق با استفاده از الگوریتم هموگرافی بین تصاویر متوالی، سرعت استخراج شده و به کمک سرعت به‌دست‌آمده، الگوریتم ناوبری مبتنی بر عوارض زمین در یک PF انجام می‌شود. در مرجع [۹۲] از تکنیک ردیابی مشخصه‌ها و تلفیق با INS به کمک KF برای تشخیص هاورینگ<sup>۸۸</sup> و حرکت یک پرنده چهار ملخه استفاده شد. همچنین در این مرجع مشاهده‌پذیری و مقاوم بودن فیلتر ارائه‌شده بررسی شده است. در مرجع [۹۳] اثرات تأخیر ایجادشده ناشی از تهیه تصویر و ردیابی ویژگی‌های تصویر در فیلتر تخمین گر بررسی شده و به کمک آنالیز مونت‌کارلو<sup>۸۹</sup> فرمولاسیون مناسب ارائه شده است. در سال ۲۰۱۴ ایده جالب استفاده از دوربین جلونگر و مشاهده و استخراج عوارض برای ناوبری تصویری پرنده‌های بدون سرنشین ارائه شد [۹۴]. تحلیل پایداری و بهبود INS به کمک سیستم بینایی در مرجع [۹۵] ارائه شده است. در این مقاله، ناپایداری تخمین گر در سیستم‌های کمک ناوبری تصویری از دیدگاه مشاهده‌پذیری مورد مطالعه قرار داده شده و یک سیستم مشاهده‌پذیر مقید اینرسی-تصویری که ناپایداری را نیز کاهش داده است، ارائه شده است. خانم غزاله پناهنده رساله دکتری خود را در زمینه مشاهده‌پذیری و کالیبراسیون سیستم کمک ناوبری تصویری انجام دادند [۹۶].

90. Bias

91. Magnetometer

92. Egomotion

93. Augmented Reality

94. Nister

95. Wheel Odometry

96. Structure From Motion

87. Point-Mass Filter

88. Hovering

89. Monte Carlo

ساختار حرکت است. ساختار حرکت در حالت کلی مربوط به مسئله ساخت صفحه سه‌بعدی از تصاویر دوربین در موقعیت‌های مختلف و متوالی مرتبط و نامرتب است. استخراج ساختار نهایی معمولاً به کمک بهینه‌سازی آفلاین صورت می‌گیرد که با افزایش تعداد تصاویر، بار محاسباتی آن افزایش می‌یابد [۱۰۳]. برخلاف ساختار حرکت، ادومتری تصویری بر تخمین حرکت سه‌بعدی دوربین به‌طور متوالی و به‌هنگام تمرکز دارد. مسئله تخمین تغییر موقعیت وسیله از روی تصاویر از سال ۱۹۸۰ شروع و توسط موراوک<sup>۹۷</sup> در [۱۰۴] ارائه شده است. بیشتر تحقیقاتی که از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ در زمینه ادومتری تصویری انجام شده [۱۰۴-۱۰۸] برای سیاره نوردها و بر روی برنامه ماه نورد ناسا صورت گرفته است. کار موراوک نه تنها برای ارائه اولین تخمین حرکت از تصاویر، بلکه برای توصیف یکی از اولین آشکارسازهای گوشه (که توسط هانا<sup>۹۸</sup> در سال ۱۹۷۴ ارائه شده است [۱۰۹]) که به‌عنوان آشکارساز گوشه موراوک [۱۱۰] شناخته می‌شود، برجسته شده است. آشکارساز گوشه ارائه‌شده توسط هانا قبل از موراوک به‌وسیله فرسترن<sup>۹۹</sup> [۱۱۱]، هاریس<sup>۱۰۰</sup> و استیفنز<sup>۱۰۱</sup> در مراجع [۱۰۱، ۱۱۲، ۱۱۳] استفاده شده است. بیشتر تحقیقات انجام‌شده در ادومتری تصویری به‌واسطه دوربین‌های استریو انجام شده است. ساختار کار موراوک، متیس<sup>۱۰۲</sup> و شفر<sup>۱۰۳</sup> [۱۰۶، ۱۰۷] بر اساس این نوع از دوربین است. دوربین‌های استریو در فواصل طولانی کارایی خوبی ندارند و به همین دلیل در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ بر روی تک دوربین برای مسافت‌های بالای یک کیلومتر تحقیق شد و با استفاده از دوربین‌های همه‌جهته و پرسپکتیو<sup>۱۰۴</sup> [۱۱۴-۱۲۰] نتایج مطلوبی به‌دست آمد. کارهای مرتبط در این زمینه در سه بخش تقسیم‌بندی می‌شوند: روش‌های مبتنی بر ویژگی، روش‌های مبتنی بر ظاهر و روش‌های ترکیبی. روش‌های مبتنی بر ویژگی بر ویژگی‌های تکرارپذیر که در فریم‌های مختلف ردیابی می‌شوند، استوار است [۱۰۰، ۱۱۴، ۱۱۶، ۱۱۹، ۱۲۱-۱۲۳]. روش‌های مبتنی بر ظاهر از شدت اطلاعات تمامی پیکسل‌ها در تصویر یا بخشی از آن استفاده می‌کنند و روش‌های ترکیبی، ترکیبی از دو حالت فوق هستند. در مرجع [۱۰۰] از یک تک دوربین به‌صورت به‌هنگام استفاده شده است. در این تحقیق از الگوریتم RANSAC برای حذف داده‌های خارج از محدوده<sup>۱۰۵</sup> و تخمین

موقعیت سه‌بعدی به دوبردی برای محاسبه موقعیت جدید دوربین استفاده شده است. برجستگی این تحقیق به استفاده از روش تحلیلی کمینه ۵ نقطه [۱۲۴] برای محاسبه حرکت است. پس از این مقاله استفاده از RANSAC ۵ نقطه به‌شدت مورد توجه قرار گرفت به‌طوری‌که [۱۱۶، ۱۱۸، ۱۱۹] بیانگر این موضوع هستند. در [۱۱۴] رویکردی برای ادومتری تصویری تک دوربین بر اساس تصویربرداری همه‌جهته از یک دوربین و شار نوری فراهم شد. در [۱۲۱] رویکردی بر پایه پنجره‌های محدود مجاور محلی<sup>۱۰۶</sup> برای مشخص کردن حرکت و نقشه سه‌بعدی ارائه شده است. در این مرجع ارتباط نقاط بر روی تصویر و نقاط متناظر آن‌ها در فضای بیرون به کمک مدل‌های ریاضی بیان می‌شود. در مرجع [۱۲۵] به کمک الگوریتم شبیه‌سازی تیرید<sup>۱۰۷</sup>، پارامترهای UKF استفاده شده در فرآیند تلفیق دو سیستم INS و ادومتری تصویری بهینه‌سازی شده‌اند. در این تحقیق خطای موقعیت، وضعیت و ریشه میانگین مربعات خطا در سیستم بهینه‌سازی شده نسبت به سیستم متعارف کاهش یافته است. در مرجع [۱۲۶] الگوریتم RANSAC ارائه شده است. نویسنده با استفاده از حداقل ۴ نقطه شاخص از فضای پیرامون و موقعیت این نقاط بر روی صفحه تصویر، مدل ریاضی را استخراج نموده است. از این الگوریتم در بسیاری از تحقیقات بعدی استفاده شده است. در سال ۲۰۰۲ با تخمین موقعیت مطلق و نسبی نقاط شاخص در تصاویر اخذشده توسط دوربین، خطای یک سیستم ناوبری اینرسی ارزان‌قیمت در مواقع کوتاه قطع GPS، تصحیح شده است [۱۲۷]. در این مقاله، مختصات نقاط شاخص با روش کمترین مربعات و از روی چندین تصویر به‌دست‌آمده است. در این تحقیق خط دید نقطه شاخص مشاهده‌شده، میزان اختلاف بین تخمین موقعیت نقطه شاخص و موقعیت مشاهده‌شده نقطه شاخص را اندازه‌گیری می‌کند. این اختلاف اندازه‌گیری شده ناشی از: خطا در موقعیت‌های نقاط شاخص، خطا در موقعیت دوربین (خطای موقعیت ناوبری) و خطا در تخمین وضعیت دوربین (خطای حل معادلات وضعیت) است. این مشاهده‌پذیری کلید فرآیند تخمین توسط تصاویر بوده و باعث می‌شود تا بتوان خطاهای موقعیت هدف و خطاهای ناوبری را به کمک تلفیق داده‌های تصویر و INS تخمین زد. در سال ۲۰۰۹، تعیین موقعیت یک پرند بدون سرنشین به کمک تصاویر متوالی و حذف خطای انباشتگی به کمک تشکیل هم‌زمان موزاییک تصاویر ارائه شد [۱۲۸]. موزاییک‌سازی بر مبنای ماتریس هم‌گرافی بین تصاویر متوالی انجام شده است. در مرجع [۱۲۹] به روش هم‌گرافی و الگوریتم SIFT حرکت پرند بدون سرنشین استخراج شده و اطلاعات حاصله با اطلاعات INS در یک EKF

97. Moravec
98. Hannah
99. Forstner
100. Forstner
101. Stephens
102. Matthies
103. Shafer
104. Perspective Camera
105. Outlier

106. Adjustment window-bundle local  
107. Simulated Annealing

تلفیق داده شد. از دیگر نکات مهم این کار مدل تأخیر مشاهدات در تخمین‌گر است.

در مرجع [۱۳۰] الگوریتم RANSAC دو نقطه و در مرجع [۱۳۱] ترکیب ضعیف GPS و ادومتری تصویری ارائه شده است. در مرجع [۱۳۲] با بررسی سیستم تلفیق INS و ادومتری تصویری که با یک UKF تلفیق یافته است، از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای UKF استفاده شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی سیستم ناوبری اولیه و بهینه‌شده بیانگر بهبود خطای موقعیت، سرعت و وضعیت سیستم تلفیق بهینه‌شده بالاخص خطای نهایی پارامترهای ناوبری است.

### ناوبری تصویری مبتنی بر شار نوری

بردار سرعت سه‌بعدی شی که به صفحه تصویر دوبعدی منعکس شده است را شار نوری گویند. در تعریف کامل‌تری از شار نوری گفته شده که شار نوری بردار سرعتی در تصویر است که تصویر اول را به تصویر بعدی در تصاویر متوالی از یک مکان انتقال می‌دهد. به بیان ساده‌تر در مواردی که یک سلسله از تصاویر زمانی متوالی داده شده و تعیین مقدار جابه‌جایی اشیا خواسته می‌شود، برای تخمین جابه‌جایی پیکسل‌ها در یک تصویر، می‌توان از میدان شار نوری کمک گرفت. اطلاعات قابل استخراج از شار نوری مبنای بسیاری از کاربردهای عملی در حوزه ردیابی و ناوبری قرار گرفته است.

اطلاعاتی که می‌توان از شار نوری استخراج کرد عبارت‌اند از زمان رسیدن، عمق، پارامترهای حرکت، تخمین تغییر موقعیت و قطعه‌بندی تصویر. از این اطلاعات خام در تولید سیستم‌های پیچیده عملی استفاده می‌شود. بردار شار نوری را می‌توان برای تمامی پیکسل‌های تصویر محاسبه کرد ولی در بیشتر موارد، جهت کاهش زمان اجرا و محاسبات، ابتدا برخی ویژگی‌ها با روش‌هایی مثل گوشه‌ها و لبه‌ها استخراج [۱۱۳، ۱۳۳] و سپس شار نوری فقط برای این ویژگی‌ها انجام می‌شود. الگوریتم SIFT در سال ۲۰۰۴ توسط آقای دیوید لوو [۱۳۴] برای استخراج و تطبیق ویژگی‌های دو تصویر ارائه شد که این الگوریتم نسبت به تغییرات روشنایی تصویر، تغییرات مقیاس و زاویه دید مقاوم بوده و جهت ردیابی الگوریتم مناسبی است. در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵، مکان‌یابی بر اساس تصویر [۱۳۵] و SLAM تصویری [۱۳۶] را به کمک مشخصه‌های مقاوم در برابر تغییرات روشنایی، مقیاس و زاویه دید نیز انجام شد. در مرجع [۱۳۷] سامانه ناوبری تصویری مبتنی بر محاسبات شار نوری، با استفاده از یک حسگر بینایی، بر روی یک پرند چهار ملخه پیاده‌سازی شده است. از نتایج حاصل از پردازش آنلاین تصاویر که

توسط حسگر انجام می‌شود، سرعت و موقعیت پرند به صورت آنلاین محاسبه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق، حاکی از امکان استفاده عملی از این روش در تخمین موقعیت و سرعت ربات‌های پرند است. در سال ۲۰۰۸، مقایسه چندین الگوریتم شار نوری جهت مقاصد هدایت و ناوبری پرند بدون سرنشین با تصاویر واقعی ارائه شد [۱۳۸]. الگوریتم ردیابی ویژگی‌های تصویر به همراه GPS جهت کنترل خودکار هلیکوپتر آواتار<sup>۱۰۸</sup> در مرجع [۱۳۹] انجام شده است. مرجع [۱۴۰] یک پرند بدون سرنشین با یک دوربین که معادل‌سازی شده چشم مرکب یک حشره است را بکار برد. این دوربین چشم مانند، از یک آرایه گیرنده نوری<sup>۱۰۹</sup> که هر یک، به یک EMD متصل هستند، ساخته شده که قادر است تا شار نوری محلی را محاسبه نماید. با محاسبه شدت شار نوری، وجود موانع تشخیص داده می‌شود. در [۱۴۱] نیز یک پرند بدون سرنشین و دوربین چشم مانند با تکنولوژی EMD به کار برده شد. اطلاعات دریافتی از مجموعه EMDها برای تعیین موانع به کار می‌رود. هنگامی که هواپیما در ارتفاع پایین، سرعت بالا یا در فاز فرود است، حتی اگر دوربین دقیقاً موازی با زمین باشد، تخمین شار نوری دقت کمی دارد. در [۱۴۲] یک سیستم جدید برای افزایش دقت در تخمین شار نوری بر مبنای حشرات برای سیستم کنترل پرواز ارائه شد. در این سیستم یک آینه کروی جلوی دوربین نصب شد که بجای نشانه‌روی به طرف زمین به سمت جلو تنظیم شده بود. سطح آینه سرعت حرکت را کاهش داده و اعوجاجات پرسپکتیو را حذف می‌نماید. از لحاظ تئوری، وجود سرعت کم یا ثابت، باعث سادگی محاسبات شار نوری و افزایش دقت می‌شود. در نتیجه، دامنه سرعت پرند و حالاتی که پرند می‌تواند پروازی مطمئن داشته باشد، افزایش یافتند. به‌طور ویژه این کار توسط گرین<sup>۱۱۰</sup> در [۱۴۳] توسعه داده شد. در این مرجع سیستم شار نوری بر مبنای الهام از حشرات در یک پرند چهار ملخه که در فضای بین ساختمان‌ها حرکت کرده و قادر به نشستن نیز بود، استفاده شد. بعدها گرین دوباره سیستمی با تأکید بر استراتژی ناوبری بر پایه حشرات، برای یک پرند بدون سرنشین برای پرواز نزدیک زمین مثل تونل‌ها، غارها، بین ساختمان‌ها و یا درختان طراحی نمود [۱۴۴]. اصول ناوبری استفاده شده در [۱۴۳، ۱۴۴] بر این اصل استوار است که شار نوری موانع نزدیک بزرگ‌تر از شار نوری موانع دور است؛ بنابراین اندازه شار نوری برای موانعی که عمود بر راستای حرکت هستند، بیشینه است. در مرجع [۱۴۲] مروری بر کارهای انجام‌شده در زمینه ناوبری بر اساس الهام از حشرات در حالات مختلف، ارائه شده است. با بررسی

108. Avatar

109. Photoreceptor

110. Green

رهیافت‌هایی با صفحه تصویر روزنه‌ای<sup>۱۱۹</sup> و رهیافت‌هایی با صفحه تصویر کروی می‌باشند. در رهیافت اول فرض می‌شود که صفحه تصویر تخت است که این مقوله برای اکثر حسگرهای CCD صادق است که در این مورد شارهای نوری به دو صورت عریض و باریک مدل می‌شوند [۱۳۸, ۱۵۵-۱۵۷]. در رهیافت دوم فرض می‌شود صفحه تصویر کروی است [۱۳۸, ۱۵۸] که شباهت زیادی به ساختار چشم مرکب در حشرات دارد. در این مورد شار نوری می‌تواند توسط چندین تراشه با رزولوشن<sup>۱۲۰</sup> پایین و از زوایای دید مختلف محاسبه شود [۱۵۹].

الگوریتم‌های شار نوری استفاده‌شده توسط پرند‌های بدون سرنشین را می‌توان به صورت زیر تقسیم کرد:

روش لوکاس- کند: یکی از روش‌های محاسبه شار نوری است که از بهینه‌سازی انرژی محلی استفاده می‌کند [۱۴۸]. روش‌های دیفرانسیلی از مشتقات مکانی- زمانی شدت روشنایی یا تصویر فیلتر شده برای محاسبه شار نوری استفاده می‌کنند [۱۶۰]. الگوریتم لوکاس- کند، در مقابل نویز مقاوم است، ولی ممکن است شار چگال تولید نکند [۱۶۰].

روش هورن- شاک: یک روش دیفرانسیلی برای محاسبه شار نوری است که از روش کمینه‌سازی انرژی کل استفاده می‌کند [۱۴۹]. این روش حساسیت بیشتری به نویز دارد، ولی می‌تواند میدان‌های شار چگال‌تری تولید کند [۱۶۰].

روش درون‌یابی تصویر که توسط آقای سرویاسان<sup>۱۲۱</sup> برای کاربردهایی با تعداد محاسبات پایین مانند پرند‌های بدون سرنشین کوچک طراحی شده است [۱۵۰]. این روش نیاز به ردیابی ویژگی‌ها یا محاسبه سرعت تصویر در مکان‌های مختلف ندارد [۱۶۱].

الگوریتم تطبیق بلوکی: که شامل روش‌هایی برای کمینه‌سازی SSD یا SAD است. روش تطبیق بلوکی SAD می‌تواند با اندازه‌گیری‌های حاصل از INS برای تخمین دقیق‌تر شار نوری در پرند‌های بدون سرنشین کوچک ترکیب شود [۱۶۲].

روش‌های مبتنی بر ویژگی: در این روش از ویژگی‌ها به جای مقادیر خام شدت روشنایی برای محاسبه شار نوری استفاده می‌شود. الگوریتم‌های استخراج ویژگی مانند SIFT می‌توانند برای استخراج ویژگی‌ها استفاده شوند. ویژگی‌های شناسایی‌شده در ادامه با جابه‌جایی‌های پیکسل‌ها که نشان‌دهنده شار نوری است، همبسته می‌شوند [۲].

در سال‌های اخیر، مجموعه داده‌های تست مختلفی توسط پژوهشگران بینایی ماشین جمع‌آوری و در دسترس عموم قرار داده

خط سیر تحقیقات، کورنال<sup>۱۱۱</sup> و ایگان<sup>۱۱۲</sup> اولین نتایج در زمینه آنالیز الگوهای شار نوری را ارائه داده‌اند. در تحقیق آن‌ها، تصاویر در حین پرواز پرند‌های بدون سرنشین جهت ذخیره و تحلیل به ایستگاه زمینی، ارسال می‌شدند. استخراج پارامترهایی چون: انتقال، غلت<sup>۱۱۳</sup>، گشتاور<sup>۱۱۴</sup> و گردش<sup>۱۱۵</sup> از شار نوری تصاویر، به صورت آفلاین انجام و نتایج در [۱۴۵] گزارش شده است.

به دلیل اینکه در مأموریت‌های شهری، پرواز پرند بدون سرنشین معمولاً بین ساختمان‌ها و در ارتفاع پایین انجام می‌شود، در [۱۴۶] یک روش جدید برای هدایت پرند بدون سرنشین در حال پرواز در این مناطق ارائه شد. در این کار از دوربین استریو جلونگر و دو دوربین پهلوگر برای هدایت و کنترل پایدار استفاده شده است. در مرجع [۱۴۷] مروری بر ادبیات در مورد تکنیک‌های استفاده از شار نوری در کاربردهای هدایت کنترل و ناوبری برای پرند‌های بدون سرنشین انجام شده است. انواع مختلفی از الگوریتم‌های محاسبه شار نوری توسط متخصصین بینایی ماشین و زیست‌شناسان ارائه شده که شامل رهیافت‌های گرادیان پایه (از قبیل روش [۱۴۸] لوکاس- کند<sup>۱۱۶</sup> و [۱۴۹] هورن- شانک<sup>۱۱۷</sup>)، روش‌های بر پایه ویژگی (مانند [۲] SIFT) و تکنیک‌های درون‌یابی [۱۵۰] است. این الگوریتم‌ها معمولاً دارای دقتی در حد پیکسل هستند. توسعه تکنیک‌های محاسبه شار نوری کمک زیادی در هدایت، کنترل و ناوبری پرند بدون سرنشین علی‌الخصوص در مسئله پرهیز از برخورد با موانع داشته است. کارهای زیادی در استفاده از شار نوری به صورت تنها و یا همراه با حسگرهای اینرسی، انجام شده که از آن جمله می‌توان به: مسئله تخمین فاصله [۱۵۱]، حفظ ارتفاع و پرهیز از برخورد با موانع [۱۵۲]، تخمین سرعت و ارتفاع با کمک حسگرهای اینرسی و شار نوری [۱۵۳]، فرود عمودی [۱۵۴] و غیره اشاره کرد. با در استفاده از شار نوری محاسبه‌شده توسط الگوریتم‌های بینایی ماشین، مدل‌سازی میدان‌های شار نوری برای اهداف ناوبری موردنیاز است. اطلاعات معینی از حرکت مانند سرعت زاویه‌ای، سرعت انتقالی و اطلاعات عوارض زمین می‌تواند هر یک به صورت جداگانه از ترکیب شار نوری با داده‌های اینرسی و داده‌های فاصله<sup>۱۱۸</sup> به دست بیاید. به‌طور کلی مدل‌های پیشنهادشده برای میدان‌های شار نوری به دو گروه بزرگ تقسیم می‌شوند که شامل

111. Cornall

112. Egan

113. Roll

114. Pitch

115. Yaw

116. Lucas-Kanade

117. Horn- Shunck

118. Range Data

119. Pin-Hole

120. Resolution

121. Srinivasan

**تخمین فاصله:** محققان دانشگاه بریگهام یانگ<sup>۱۲۲</sup>، پرنده بدون سرنشین کوچکی از نوع بال- پرواز<sup>۱۲۳</sup> با هدف پرواز در مسیرهای تنگ و باریک مانند دره‌های کوهستانی طراحی کرده‌اند. این پرنده با استفاده از یکسری حسگرهای نوری که در زوایای مختلف نصب شده‌اند، قابلیت تشخیص موانع را دارد [۱۶۹].

**حفظ ارتفاع و جلوگیری از برخورد با موانع:** محققانی از دانشگاه پلی‌تکنیک فدرال لوزان<sup>۱۲۴</sup> و دانشگاه مریلند<sup>۱۲۵</sup> از شار نوری به‌صورت یک فیذبک مستقیم در پرنده‌های بدون سرنشین بسیار کوچک برای ثابت نگه‌داشتن وضعیت و کنترل سمت باهدف پرهیز از برخورد با موانع استفاده کرده‌اند.

**تخمین سرعت و ارتفاع با کمک گرفتن از حسگرهای اینرسی:** ترکیب شار نوری با مقادیر به‌دست آمده حسگرهای اینرسی می‌تواند یک تخمین دقیق از سرعت زمینی و ارتفاع پروازی را در مواقعی که اطلاعات GPS در دسترس نیست، فراهم کند [۱۵۳].

**هاورینگ و دنبال کردن پستی و بلندی‌های زمین:** شار نوری برای تخمین سرعت افقی نسبت به زمین استفاده می‌شود. سرعت‌های به دست آمده و مکان‌های جمع شده می‌تواند برای کنترل هاورینگ استفاده شود [۱۷۰-۱۷۳].

**فرود:** شار نوری می‌تواند به‌صورت مستقیم به‌عنوان یک بازخورد در فرود پرنده‌های بدون سرنشین عمود پرواز استفاده شود. این ایده از نحوه فرود و نشست زنبورعسل بر روی گل‌ها الهام گرفته شده است. محققان نشان داده‌اند که با استفاده از شار نوری می‌توان امکان فرود بر روی سکوی متحرک را محقق ساخت که کاربردهای زیادی در بخش‌های نظامی و دریایی دارد [۱۵۴، ۱۷۴]. در سال ۲۰۰۹ هدایت، کنترل و ناوبری یک پرنده بدون سرنشین به کمک دوربین و GPS انجام شده که فاز فرود آن به کمک دوربین و الگوریتم‌های شار نوری انجام گرفته است [۱۷۵]. در سال ۲۰۱۲ راهکار تلفیق اطلاعات دو دوربین پرسپکتیو و چشم ماهی<sup>۱۲۶</sup> استفاده شد و تمامی پارامترهای ناوبری از جمله وضعیت، ارتفاع و حرکت استخراج شد. کاربرد عمده این روش برای فاز فرود و برخاست بوده و در این راهکار از حسگرهای دیگری استفاده نشده است [۱۷۶].

## نتیجه‌گیری

توسعه پرنده‌های بدون سرنشین به‌سرعت در حال انجام است و کاربردهای آن‌ها روزبه‌روز در حال افزایش است. از این‌رو ناوبری

شده است [۱۶۳]. این مجموعه داده‌ها شامل جابه‌جایی‌های مختلف اعم از صلب و غیرصلب و جابه‌جایی‌های گسسته و پیوسته و غیره هستند. با مقایسه نتایج بسیاری از الگوریتم‌های شار نوری با داده‌های واقعیت زمینی مشخص شده که این الگوریتم‌ها دارای دقت زیر پیکسل هستند [۱۶۳]. البته لازم به ذکر است داده‌های تست اشاره‌شده دارای جابه‌جایی‌های کمتری در مقایسه با داده به دست آمده از پرواز یک پرنده بدون سرنشین معمولی هستند.

مدل‌های تخمین میدان‌های شار نوری در مقالات زیادی بررسی شده است. این مدل‌ها را به‌صورت تصویر حرکت نسبی در فضای سه‌بعدی بر روی صفحه تصویر در فضای دوبعدی تعریف می‌کنند. در حالت ایده‌آل جابه‌جایی ناشی از این مدل‌ها باید با جابه‌جایی به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های پردازش تصویری شار نوری برابر باشد. با جابه‌جایی‌های حاصل از مدل‌ها، به‌صورت یک داده مرجع مانند واقعیت زمینی در بینایی ماشین برخورد می‌شود [۱۶۳]. اطلاعات ناوبری موجود در شار نوری شامل سرعت‌های زاویه‌ای، سرعت‌های انتقالی و اطلاعات عوارض زمین (پستی و بلندی‌ها)، همگی در دستگاه بدنی دوربین لحاظ شده است. در مراجع [۱۳۸، ۱۵۵، ۱۵۶، ۱۶۴، ۱۶۵]، معادلات محاسبه شار نوری برای مدل صفحه تخت پیشنهاد شده است؛ که در کارهای تحقیقاتی دیگری برای ناوبری تصویری از آن‌ها استفاده شده است. به‌عنوان مثال از معادلات مشابه برای تلفیق شار نوری و GPS/INS برای ناوبری پرنده بدون سرنشین استفاده شده است [۱۵۳]. در روش صفحه تصویر کروی به‌جای در نظر گرفتن یک صفحه تصویر تخت، شار نوری می‌تواند همانند ساختاری که در چشم‌های مرکب موجودات وجود دارد، با استفاده از صفحه تصویر کروی مدل شود. در اینجا، یکسری تبدیلات از صفحه تصویر تخت به شبکه کروی نیاز است [۱۶۶]. در مقالات [۱۵۱، ۱۵۲، ۱۶۷، ۱۶۸] از مدل صفحه تصویر کروی استفاده شده است.

الگوریتم‌های زیادی تاکنون برای محاسبه بردارهای شار نوری معرفی شده‌اند که اکثر آن‌ها بر فرض‌های زیر استوار است: ثابت بودن شدت روشنایی یا ویژگی: تنها جابه‌جایی شی نسبت به دوربین می‌تواند باعث تغییرات شدت روشنایی یا ویژگی‌ها شود.

هموارشدگی مکانی: جابه‌جایی در یک همسایگی کوچک از پیکسل، یکپارچه و یکسان است.

جابه‌جایی کوچک: فرکانس نمونه‌برداری ویدیو به اندازه کافی بالاست تا جابه‌جایی در تصویر را به‌تدریج در طول زمان نشان دهد. مراجع [۱۶۰، ۱۶۳] به‌صورت جامع به بررسی و مقایسه الگوریتم‌های شار نوری مختلف پرداخته‌اند. به‌طورکلی تاکنون در موضوعات متعددی از شار نوری و سیستم‌های بینایی مرتبط با آن برای پرنده‌های بدون سرنشین استفاده شده که شامل موارد زیر است:

122. Brigham Young University
123. Flying-Wing
124. École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)
125. Maryland University
126. Fish Eye

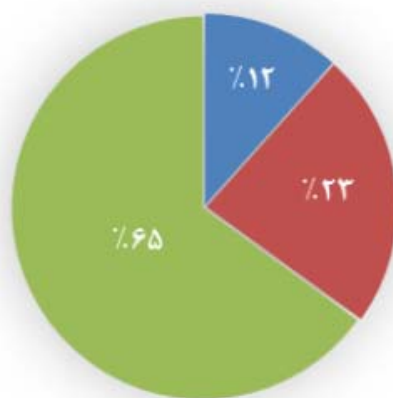
جمع‌شونده آن‌هاست که مدت زمان استفاده از آن‌ها را محدود می‌کند و لذا برای استفاده در زمان‌های طولانی باید به کمک روش‌های دیگر در بازه‌های زمانی مناسب، این خطا برطرف شود. روش‌های مبتنی بر SLAM برای فضاهای محدود مناسب هستند و در صورتی که منطقه پروازی وسیع بوده یا به صورت یک مسیر تکراری نباشد، مناسب نیستند. این روش‌ها از آن‌جا که حجم نقشه‌ها به مرور زمان بزرگ می‌شوند، از لحاظ عملی با مشکل مواجه هستند. کاربرد این نوع روش‌ها در فضاهای محدود یا برای مأموریت‌های مثل بازدید یک منطقه مشخص و محدود بسیار مناسب است. حجم محاسبات در این روش‌ها متوسط است. مهم‌ترین مزیت روش‌های مبتنی بر نقشه تصحیح دقیق پارامترهای ناوبری است و مانند سیستم‌های ماهواره‌ای خطای ناوبری را در یک محدوده مشخص نگه می‌دارند؛ اما عیب آن عدم پرواز پرند در منطقه‌ای است که نقشه آن را ندارد؛ و مشکل دیگر آن حجم بالای محاسبات است، به طوری که پیاده‌سازی این روش‌ها در پرنده‌های کوچک دارای چالش‌های فراوانی است.

با توجه به بررسی انجام شده، در حال حاضر تمرکز محققان بر روی روش‌های ناوبری تصویری بدون نقشه بیشتر است زیرا پیاده‌سازی در کاربردهای عملی یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در بحث کاربردی نمودن ناوبری تصویری در انواع پرنده‌های بدون سرنشین می‌باشد اما با توجه به روند کوچک سازی پرنده‌های بدون سرنشین، این تحقیقات همچنان به رشد خود ادامه خواهند داد. روش‌های مبتنی بر SLAM و نیز روش‌های مبتنی بر نقشه که هم اکنون با مشکل پیاده‌سازی به خصوص در پرنده‌های کوچک، روبرو هستند در آینده با پیشرفت روزافزون پردازنده‌های پر قدرت، مورد توجه بیشتری نسبت به قبل قرار خواهند گرفت. پیش‌بینی می‌شود، ترکیب انواع روش‌های ناوبری تصویری برحسب کاربرد و ترکیب با سایر حسگرها و یا سامانه‌های ناوبری در آینده مورد توجه جدی محققان قرار بگیرد.

## مراجع

- [1] Krishnan, R. and AR, A., "A Survey On Image Matching Methods." *International Journal of Latest Research in Engineering and Technology (IJLRET)*, Vol. 2, Issue 1, 2016, pp. 58-61.
- [2] Lowe, D.G., "Distinctive Image Features from Scale-invariant Keypoints," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, 2004, pp. 91-110.
- [3] Križaj, J., Štruc, V. and Pavešić, N., "Adaptation of SIFT Features for Robust Face Recognition," *International Conference Image Analysis and Recognition*, 2010, pp. 394-404.
- [4] Kisku, D.R. Rattani, A. Grosso, E. and Tistarelli, M., "Face Identification by SIFT-based Complete Graph

سبک و ارزان قیمت آن‌ها به طوری که در تمامی مکان‌ها امکان استفاده داشته باشد به شدت مورد توجه محققان است. ناوبری تصویری به عنوان یکی از روش‌های ناوبری و کمک ناوبری در کنار INS در پرنده‌های بدون سرنشین به دلیل سبک بودن، ارزان بودن و قابلیت استفاده در انواع مکان‌ها مورد تحقیق محققان بسیاری بوده و روش‌های زیادی در این زمینه ابداع شده است. در این مقاله علاوه بر معرفی انواع روش‌های ناوبری تصویری، سعی شد تا تمامی روش‌های استفاده شده در حوزه ناوبری تصویری برای پرنده‌های بدون سرنشین بررسی شده و دسته‌بندی مناسبی از آن‌ها صورت گیرد. ناوبری تصویری برای پرنده‌های بدون سرنشین شامل سه گروه اصلی: ۱- بدون نقشه، ۲- مبتنی بر نقشه و ۳- SLAM، است. در این تحقیق مهم‌ترین مقالات برای کاربردهای ناوبری در پرنده‌های بدون سرنشین در این سه دسته، بررسی شده‌اند. از لحاظ آماری همانطور که از شکل (۲) مشخص است، در مقالات بسیار زیاد و متنوعی بر روی روش‌های بدون نقشه کار شده است. در این نمونه آماری بررسی شده سهم مقالات کار شده در حوزه ناوبری تصویری بدون نقشه ۶۵ درصد و روش‌های SLAM ۲۳ درصد و روش‌های مبتنی بر نقشه ۱۲ درصد است.



شکل ۲- مقایسه آماری تحقیقات انجام شده بر روی روش‌های ناوبری تصویری در پرنده‌های بدون سرنشین (بدون نقشه ۶۵ درصد، مبتنی بر SLAM ۲۳ درصد و مبتنی بر نقشه ۱۲ درصد)

یکی از مهم‌ترین مزایای روش‌های ناوبری تصویری بدون نقشه، حجم کم محاسبات آن‌ها و قابلیت پیاده‌سازی در سخت‌افزار علی‌الخصوص در پرنده‌های بدون سرنشین کوچک است. مزیت دیگر این روش‌ها عدم وابستگی به داشتن نقشه است لذا امکان پرواز در هر منطقه‌ای را دارا بوده و محدود به فقط مناطقی که نقشه آنجا را دارد، نیست. از این رو مقالات زیادی به روش‌های بدون نقشه پرداخته‌اند. عیب روش‌های بدون نقشه، خطای ناوبری

- [20] Simper, A., "Correcting general band-to-band misregistrations," *International Conference on Image Processing, 1996. Proceedings.*, 1996, pp. 597-600.
- [21] G. Wolberg and S. Zokai, "Image Registration for Perspective Deformation recovery, " in *AeroSense 2000*, 2000, pp. 259-270.
- [22] W. K. Pratt, "Correlation techniques of image registration, " *IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, pp. 353-358.
- [23] P. Van Wie and M. Stein, "A landsat digital image rectification system, " *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, Vol. 15, 1977, pp. 130-137.
- [24] K. Mühlmann, D. Maier, J. Hesser, and R. Männer, "Calculating dense disparity maps from color stereo images, an efficient implementation, " *International Journal of Computer Vision*, Vol. 47, pp. 79-88, 2002.
- [25] P. H. Torr and A. Criminisi, "Dense stereo using pivoted dynamic programming, " *Image and Vision Computing*, Vol. 22, 2004, pp. 795-806.
- [26] J. Joglekar, S. S. Gedam, and I. CSRE, "Area Based Stereo Image Matching Technique Using Hausdorff Distance and Texture Analysis, " *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 3822, 2011, pp. 109-114.
- [27] H. Durrant-Whyte and T. Bailey, *Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I The Essential Algorithms*, 2006.
- [28] R. C. Smith and P. Cheeseman, "On the representation and estimation of spatial uncertainty, " *The international journal of Robotics Research*, Vol. 5, 1986, pp. 56-68.
- [29] H. F. Durrant-Whyte, "Uncertain geometry in robotics, " *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Vol. 4, , 1988, pp. 23-31.
- [30] N. Ayache and O. D. Faugeras, "Building, registering, and fusing noisy visual maps, " *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 7, , 1988, pp. 45-65.
- [31] J. L. Crowley, "World modeling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging, " in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1989, pp. 674-680.
- [32] R. Chatila and J.-P. Laumond, "Position referencing and consistent world modeling for mobile robots, " in *IEEE International Conference on Robotics and Automation.*, 1985, pp. 138-145.
- [33] R. Smith, M. Self, and P. Cheeseman, "Estimating uncertain spatial relationships in robotics, " in *Autonomous robot vehicles*, ed: Springer, 1990, pp. 167-193.
- [34] J. J. Leonard and H. F. Durrant-Whyte, "Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot, " in *IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, IROS'91.*, 1991, pp. 1442-1447.
- [35] T. Viéville, Faugeras, O.D., "Cooperation of the inertial and visual systems, " 1990.
- [36] A. J. Davison, Y. G. Cid, and N. Kita, "Real-time 3D SLAM with wide-angle vision, " in *Proc. IFAC/EURON Symp. Intelligent Autonomous Vehicles*, 2004, pp. 31-33.
- [37] J. Kim and S. Sukkarieh, "SLAM aided GPS/INS navigation in GPS denied and unknown environments, Topology," *IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies*, 2007, pp. 63-68.
- [5] Majumdar, A. and Ward, R.K., "Discriminative SIFT Features for face Recognition," *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE'09.*, 2009, pp. 27-30.
- [6] Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T. and Van Gool, L., "Speeded-up Robust Features (SURF)," *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 110, No.3, 2008, pp. 346-359.
- [7] Erhard, S., Wenzel, K. E. and Zell, A. "Flyphone: Visual Self-Localisation Using a Mobile Phone as on board Image Processor on a Quadrocopter," in *Selected Papers from the 2<sup>nd</sup> International Symposium on UAVs*, Reno, Nevada, USA, 2009, 2009, pp. 451-465.
- [8] Bryson, M., Johnson-Roberson, M. and S. Sukkarieh, "Airborne smoothing and mapping using Vision and Inertial Sensors," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'09.*, Kobe, Japan, 2009, pp. 2037-2042.
- [9] Lee, D., Kim, Y. and Bang, H., "Vision-Based Terrain Referenced Navigation for Unmanned Aerial Vehicles using Homography Relationship," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 69, 2013, pp. 489-497.
- [10] Yu, Q., Shang, Y., Liu, X., Lei, Z., Li, X., Zhu, X. and et al., "Full-Parameter Vision Navigation Based on Scene Matching for Aircrafts," *Science China Information Sciences*, Vol. 57, 2014, pp. 1-10.
- [11] Xu, D., Li, Y. F. and Tan, M., "A General Recursive Linear Method and Unique Solution Pattern Design for the Perspective-n-Point Problem," *Image and Vision Computing*, Vol. 26, 2008, pp. 740-750.
- [12] Yu, Q. and Shang, Y., "Videometrics: Principles and Researches," *Science Process Bei-jing*, China, 2009, pp. 71-71.
- [13] Fischler, M. A. and Bolles, R. C., "A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography (Reprinted in Readings in Computer Vision, ed. MA Fischler," *Comm. ACM*, Vol. 24, 1981, pp. 381-395.
- [14] Gibbens, S. J. D. P. W. "Efficient Terrain-Aided Visual Horizon Based Attitude Estimation and Localization," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 78, Issue 2, 2014, pp. 205-221.
- [15] Dumble, S. J. and Gibbens, P. W., "Airborne Vision-Aided Navigation Using Road Intersection Features," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 78, 2015, pp. 185-204.
- [16] Carr, J. R. and Sobek, J. S., "Digital Scene Matching Area Correlator (DSMAC)," in *24<sup>th</sup> Annual Technical Symposium*, 1980, pp. 36-41.
- [17] Abaszadeh, A., ghanbarpour asl, H. and Yaghmai, Kh., "Data Fusion of Inertial Navigation System and Visual Navigation System, 13<sup>th</sup> Iranian Conference on Electrical Engineering, Iran, Zanjan, Zanjan University, 2005, (In Persian)
- [18] Joglekar, J. and Gedam, S.S. "Area Based Image Matching Methods-A Survey," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 2, Issue 1, 2012, pp. 130-136.
- [19] Berthilsson, R. "Affine Correlation," in *Proceedings. Fourteenth International Conference on Pattern Recognition*, 1998, pp. 1458-1460.

- [53] M. Bryson and S. Sukkarieh, "Bearing-only SLAM for an airborne vehicle," in *Australasian Conference on Robotics and Automation*, 2005, p. 18.
- [54] M. Lhuillier, "Incremental Fusion of Structure-from-Motion and GPS using constrained Bundle Adjustments," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 34, no. 12, 2012, pp. 2489-2495.
- [55] D. Magree and E. N. Johnson, "A Monocular Vision-aided Inertial Navigation System with Improved Numerical Stability," in *Proceedings of the AIAA Guidance Navigation and Control Conference*, Kissimmee, Florida, 2015, pp. 6.2015-0097.
- [56] A. Davison, "Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera," oct. 2003.
- [57] I. R. A. Davison, N. Molton, and O. Stasse, "Monoslam: Real-time single camera slam," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 29(6), 2007, pp.1052-1067.
- [58] C. T. a. G. Bierman, "Givens transformation techniques for kalman\_ ltering," *Acta Astronautica*, Vol. 4, no.78 ,1977, pp.847-863.
- [59] M. A. Atashgah, P. Gholampour, and S. Malaek, "Integration of image de-blurring in an aerial Mono-SLAM," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 228, 2014, pp. 1348-1362.
- [60] M. A. Atashgah and S. Malaek, "Prediction of aerial-image motion blurs due to the flying vehicle dynamics and camera characteristics in a virtual environment," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of aerospace engineering*, Vol. 227, No.7, 2012, pp.1055-1067.
- [61] J. Yang, *Vision based estimation, localization, and mapping for autonomous vehicles*, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015.
- [62] R. Munguía, S. Urzua, Y. Bolea, and A. Grau, "Vision-Based SLAM System for Unmanned Aerial Vehicles," *Sensors*, Vol. 16, 2016, p. 372.
- [63] J. Park, S. Im, K.-H. Lee, and J.-O. Lee, "Vision-based SLAM system for small UAVs in GPS-denied environments," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 25, 2011, pp. 519-529.
- [64] T. Lemaire, C. Berger, I.-K. Jung, and S. Lacroix, "Vision-based slam: Stereo and monocular approaches," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 74, 2007, pp. 343-364.
- [65] E. Trucco and K. Plakas, "Video tracking: a concise survey," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 31, 2006, pp. 520-529.
- [66] M. V. Arbabmir, H. Ghanbarpour Asl, H. Dehghani, "Correction of INS's Error with Sequential images and without path map," *10th Conference of Iranian Aerospace Society*, Iran, Tehran, Tarbiat Modares University, 2011. (In Persian)
- [67] M. V. Arbabmir, H. Ghanbarpour Asl, H. Dehghani, "Correction of position, velocity and orientation Errors of a UAV with use of Sequential images in an unknown environment," *19th Iranian Conference on Electrical Engineering*, Iran, Tehran, Amirkabir University of Technology, 2011. (In Persian)
- [68] M. V. Arbabmir, H. Ghanbarpour Asl, H. Dehghani, "Use the best matched point of Sequential images for correction of UAV navigation," *7th Conference of*  
" in *The 2004 International Symposium on GNSS/GPS*, 2004.
- [38] J. Kim and S. Sukkarieh, "6DoF SLAM aided GNSS/INS navigation in GNSS denied and unknown environments," *Positioning*, Vol. 1, p. 0, 2005.
- [39] J. W. Langelaan, "State estimation for autonomous flight in cluttered environments," *Journal of Guidance Control and Dynamics*, Vol. 30, , 2007, p. 1414.
- [40] G. Klein, Murray, D., "Parallel tracking and mapping for small AR workspaces," 2007.
- [41] T. B. Schon, Karlsson, R., Tornqvist, D., Gustafsson, F., "A Framework For Simultaneous Localization and Mapping Utilizing Model Structure," *In 10th International Conference on Information Fusion*, 2007, pp. 1-8.
- [42] R. Karlsson, Schon, T., Tornqvist, D., Conte, G., Gustafsson, F., "Utilizing model structure for efficient simultaneous localization and mapping for a UAV application," *In Aerospace Conference*, 2008 IEEE, pp. 1-10.
- [43] G. Bleser, Strickery, D., "Using the marginalised particle filter for real-time visual-inertial sensor fusion," *In 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2008.*, pp. 3-12.
- [44] D. Törnqvist, T. B. Schön, R. Karlsson, and F. Gustafsson, "Particle filter SLAM with high dimensional vehicle model," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 55, 2009, pp. 249-266.
- [45] J. Artieda, J. M. Sebastian, P. Campoy, J. F. Correa, I. F. Mondragón, C. Martínez, et al., "Visual 3-d slam from uavs," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 55, 2009, pp. 299-321.
- [46] N. Aouf, A. Ollero, and J. Z. Sasiadek, "Special Issue on: Airborne Simultaneous Localisation and Map Building (A-SLAM)," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 55, 2009, pp. 247-248.
- [47] 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, 2009, pp. 137-161.
- [48] S. Weiss and R. Siegwart, "Real-time metric state estimation for modular vision-inertial systems," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011, pp. 4531-4537.
- [49] S. Weiss, D. Scaramuzza, and R. Siegwart, "Monocular-SLAM-based navigation for autonomous micro helicopters in GPS-denied environments," *Journal of Field Robotics*, Vol. 28, 2011, pp. 854-874.
- [50] G. Nützi, S. Weiss, D. Scaramuzza, and R. Siegwart, "Fusion of IMU and vision for absolute scale estimation in monocular SLAM," *Journal of intelligent & robotic systems*, Vol. 61, 2011, pp. 287-299.
- [51] L. Kneip, S. Weiss, and R. Siegwart, "Deterministic initialization of metric state estimation filters for loosely-coupled monocular vision-inertial systems," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2011, pp. 2235-2241.
- [52] S. Sirtkaya and A. A. Alatan, "3D modeling of urban areas using plane hypotheses," in *2012 20th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2012, pp. 1-4.



- [83] A. Martinelli and C. Troiani, *Vision-Aided Inertial Navigation Using Virtual Features*, PhD diss, INRIA, 2012.
- [84] J. A. Hesch, D. G. Kottas, S. L. Bowman, and S. I. Roumeliotis, *Observability-constrained vision-aided inertial navigation*, University of Minnesota, Dept. of Comp. Sci. & Eng., MARS Lab, Tech. Rep, Vol. 1, 2012.
- [85] J. A. Hesch, D. G. Kottas, S. L. Bowman, and S. I. Roumeliotis, "Towards consistent vision-aided inertial navigation," in *Algorithmic Foundations of Robotics X*, ed: Springer, 2013, pp. 559-574.
- [86] C. Troiani, A. Martinelli, C. Laugier, and D. Scaramuzza, "1-point-based monocular motion estimation for computationally-limited micro aerial vehicles," in *European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, 2013, pp. 13-18.
- [87] D.P. Magree, *Monocular vision-aided inertial navigation for unmanned aerial vehicles*, Georgia Institute of Technology, 2015.
- [88] J. A. Hesch, D. G. Kottas, S. L. Bowman, and S. I. Roumeliotis, "Camera-IMU-based localization: Observability analysis and consistency improvement," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 33, 2014, pp. 182-201.
- [89] J. A. Hesch, D. G. Kottas, S. L. Bowman, and S. I. Roumeliotis, "Consistency analysis and improvement of vision-aided inertial navigation," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 30, pp. 158-176, 2014.
- [90] D. G. Kottas and S. I. Roumeliotis, "Efficient and consistent vision-aided inertial navigation using line observations," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013, pp. 1540-1547.
- [91] Y. K. Dongjin Lee, Hyochoong Bang, "Vision-based Terrain Referenced Navigation for Unmanned Aerial Vehicles using Homography Relationship," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. Vol. 69, 2013, 489-497.
- [92] D. G. Kottas, K. J. Wu, and S. I. Roumeliotis, "Detecting and dealing with hovering maneuvers in vision-aided inertial navigation systems," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2013, pp. 3172-3179.
- [93] E. Asadi and C. L. Bottasso, "Delayed fusion for real-time vision-aided inertial navigation," *Journal of Real-Time Image Processing*, Vol. 10, 2015, pp. 633-646.
- [94] S. J. Dumble and P. W. Gibbens, "Efficient terrain-aided visual horizon based attitude estimation and localization," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 78, 2015, pp. 205-221.
- [95] J. A. Hesch, D. G. Kottas, S. L. Bowman, and S. I. Roumeliotis, "Consistency analysis and improvement of vision-aided inertial navigation," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 30, pp. 158-176, 2014.
- [96] G. Panahandeh, *Selected Topics in Inertial and Visual Sensor Fusion: Calibration, Observability Analysis and Applications*, 2014.
- [97] N. Nargess Sadaghzadeh, J. Poshtan, A. Wagner, E. Nordheimer, and E. Badreddin, "Cascaded Kalman and particle filters for photogrammetry based gyroscope drift and robot attitude estimation," *ISA transactions*, Vol. 53, No. 2, 2014, pp. 524-32.
- [69] J. F. Raquet, Giebner, M., "Navigation Using Optical Measurements of Objects at Unknown Locations," *In Proceedings of the 59th Annual Meeting of The Institute of Navigation and CIGTF 22nd Guidance Test Symposium*, 2001, pp. 282-290.
- [70] 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, 2002, pp. 1-18.
- [71] J. Kim, M. Ridley, S. Sukkarieh, and E. Nettleton, "Real-time experiment of feature tracking/mapping using a low-cost vision and GPS/INS system on an UAV platform," *Positioning*, Vol. 1, 2004, p.p. 167-172.
- [72] A. D. Wu, E. N. Johnson, and A. A. Proctor, "Vision-aided inertial navigation for flight control," *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, Vol. 2, 2005, pp. 348-360.
- [73] M. J. Veth, "Fusion of imaging and inertial sensors for navigation," DTIC Document 2006.
- [74] J. W. Langelaan, "State estimation for autonomous flight in cluttered environments," *Journal of guidance, control, and dynamics*, Vol. 30, 2007, pp. 1414-1426.
- [75] A. E. Johnson, A. Ansar, L. H. Matthies, N. Trawny, A. I. Mourikis, and S. I. Roumeliotis, "A general approach to terrain relative navigation for planetary landing," in *AIAA Aerospace@ Infotech Conf.*, Rohnert Park, CA, 2007.
- [76] S. Ebcin and M. Veth, *Tightly-coupled image-aided inertial navigation using the unscented Kalman filter*, AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH, 2007.
- [77] A. I. Mourikis, Roumeliotis, S.I., "A Multi-State Constraint Kalman Filter for Vision-aided Inertial Navigation," *In IEEE international conference on Robotics and automation*, 2007, pp. 3565-3572.
- [78] G. Conte and P. Doherty, "Vision-based unmanned aerial vehicle navigation using geo-referenced information," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2009, No. 10, 2009.
- [79] L. Li, Q. Yu, Y. Shang, Y. Yuan, H. Lu, and X. Liu, "A new navigation approach of terrain contour matching based on 3-D terrain reconstruction from onboard image sequence," *Science China Technological Sciences*, Vol. 53, 2010, pp. 1176-1183.
- [80] K. M. Han and G. N. DeSouza, "Geolocation of multiple targets from airborne video without terrain data," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 62, 2011, pp. 159-183.
- [81] V. Indelman, P. Gurfil, E. Rivlin, and H. Rotstein, "Real-time vision-aided localization and navigation based on three-view geometry," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, Vol. 48, 2012, pp. 2239-2259.
- [82] A. Martinelli and R. Siegwart, "Vision and IMU Data Fusion: Closed-Form Determination of the Absolute Scale, Speed, and Attitude," in *Handbook of Intelligent Vehicles*, ed: Springer, 2012, pp. 1335-1354.

- [116] M. Lhuillier, "Automatic structure and motion using a catadioptric camera," in *Proceedings of the 6th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-Classical Cameras*, 2005.
- [117] M. J. Milford and G. F. Wyeth, "Single camera vision-only SLAM on a suburban road network," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2008.*, 2008, pp. 3684-3689.
- [118] D. Nistér, O. Naroditsky, and J. Bergen, "Visual odometry for ground vehicle applications," *Journal of Field Robotics*, Vol. 23, pp. 3-20, 2006.
- [119] J.-P. Tardif, Y. Pavlidis, and K. Daniilidis, "Monocular visual odometry in urban environments using an omnidirectional camera," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp. 2531-2538.
- [120] D. Scaramuzza, *Omnidirectional vision: from calibration to robot motion estimation*, ETH Zurich, PhD Thesis. 2008 Feb 22;17635.
- [121] E. Mouragnon, M. Lhuillier, M. Dhome, F. Dekeyser, and P. Sayd, "Real time localization and 3d reconstruction," in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*, 2006, pp. 363-370.
- [122] A. Pretto, E. Menegatti, and E. Pagello, "Omnidirectional dense large-scale mapping and navigation based on meaningful triangulation," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011, pp. 3289-3296.
- [123] D. Scaramuzza, F. Fraundorfer, and R. Siegwart, "Real-time monocular visual odometry for on-road vehicles with 1-point ransac," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA'09.*, 2009, pp. 4293-4299.
- [124] D. Nistér, "An efficient solution to the five-point relative pose problem," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 26, 2004, pp. 756-770.
- [125] M. Norouz, M. Ebrahimi, and M. Arbabmir, "Improvement of position and attitude of integrated VO/INS system," in *1st international and 2nd Iranian Navigation Conference*, 2016. (In persian)
- [126] 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, 1981, pp. 381-395.
- [127] A. Brown and D. Sullivan, "Inertial navigation electro-optical aiding during gps dropouts," in *Proceedings of the Joint Navigation Conference*, 2002.
- [128] F. Caballero, L. Merino, J. Ferruz, and A. Ollero, "Unmanned aerial vehicle localization based on monocular vision and online mosaicking," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 55, 2009, pp. 323-343.
- [129] T. Wang, C. Wang, J. Liang, Y. Chen, and Y. Zhang, "Vision-aided inertial navigation for small unmanned aerial vehicles in GPS-denied environments," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10, 2013.
- [130] C. Troiani, A. Martinelli, C. Laugier, and D. Scaramuzza, "2-point-based outlier rejection for camera-imu systems with applications to micro aerial vehicles," in *IEEE International Conference on*
- [98] C. Troiani, A. Martinelli, C. Laugier, and D. Scaramuzza, "Low computational-complexity algorithms for vision-aided inertial navigation of micro aerial vehicles," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 69, 2015, pp. 80-97, 2015.
- [99] S. Zhao, F. Lin, K. Peng, X. Dong, B. M. Chen, and T. H. Lee, "Vision-aided estimation of attitude, velocity, and inertial measurement bias for UAV stabilization," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 81, 2016, pp. 531-549.
- [100] D. Nistér, O. Naroditsky, and J. Bergen, "Visual odometry," in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR*, Vol. 1, 2004, pp. I-652-I-659.
- [101] C. G. Harris and J. Pike, "3D positional integration from image sequences," *Image and Vision Computing*, Vol. 6, 1988, pp. 87-90.
- [102] H. C. Longuet-Higgins, "A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections," *Readings in Computer Vision: Issues, Problems, Principles, and Paradigms*, pp. 61-62, 1987.
- [103] J.-M. Frahm, P. Fite-Georgel, D. Gallup, T. Johnson, R. Raguram, C. Wu, et al., "Building rome on a cloudless day," in *European Conference on Computer Vision*, 2010, pp. 368-381.
- [104] H. P. Moravec, *Obstacle avoidance and navigation in the real world by a seeing robot rover*, STANFORD UNIV CA DEPT OF COMPUTER SCIENCE; 1980 Sep.
- [105] S. Lacroix, A. Mallet, R. Chatila, and L. Gallo, "Rover self localization in planetary-like environments," in *Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, 1999, p. 433.
- [106] L. Matthies and S. Shafer, "Error modeling in stereo navigation," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Vol. 3, 1987, pp. 239-248.
- [107] L. H. Matthies, "Dynamic stereo vision," 1989.
- [108] C. F. Olson, L. H. Matthies, H. Schoppers, and M. W. Maimone, "Robust stereo ego-motion for long distance navigation," in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2000, pp. 453-458.
- [109] M. J. Hannah, *Computer matching of areas in stereo images*, DTIC Document 1974.
- [110] H. P. Moravec, "Towards automatic visual obstacle avoidance," in *International Conference on Artificial Intelligence (5th: 1977: Massachusetts Institute of Technology)*, 1977.
- [111] W. Förstner, "A feature based correspondence algorithm for image matching," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 26, 1986, pp. 150-166.
- [112] J. Abascal, E. Lazkano, and B. Sierra, "Behavior-based indoor navigation," in *Ambient Intelligence for Scientific Discovery*, ed: Springer, 2005, pp. 263-285.
- [113] C. Harris and M. Stephens, "A combined corner and edge detector," in *Alvey vision conference*, 1988, p. 50.
- [114] P. Corke, D. Strelow, and S. Singh, "Omnidirectional visual odometry for a planetary rover," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*. 2004, pp. 4007-4012.
- [115] R. Goecke, A. Asthana, N. Pettersson, and L. Pettersson, "Visual vehicle egomotion estimation using the fourier-mellin transform," in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2007, pp. 450-455.

- Conference on Robotics and Automation*, 2004, pp. 2347-2352.
- [145] T. Cornall and G. Egan, "Optic flow methods applied to unmanned air vehicles," in *Academic Research Forum*, 2003.
- [146] S. Hrabar, G. S. Sukhatme, P. Corke, K. Usher, and J. Roberts, "Combined optic-flow and stereo-based navigation of urban canyons for a UAV," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005)*, 2005, pp. 3309-3316.
- [147] H. Chao, Y. Gu, and M. Napolitano, "A survey of optical flow techniques for UAV navigation applications," in *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2013, pp. 710-716.
- [148] B. D. Lucas and T. Kanade, "An iterative image registration technique with an application to stereo vision," in *IJCAI*, 1981, pp. 674-679.
- [149] B. K. Horn and B. G. Schunck, "Determining optical flow," in *Technical symposium east*, 1981, pp. 319-331.
- [150] M. V. Srinivasan, "An image-interpolation technique for the computation of optic flow and egomotion," *Biological Cybernetics*, Vol. 71, pp. 401-415, 1994.
- [151] S. Griffiths, J. Saunders, A. Curtis, B. Barber, T. McLain, and R. Beard, "Maximizing miniature aerial vehicles," *Robotics & Automation Magazine*, IEEE, Vol. 13, 2006, pp. 34-43.
- [152] J.-C. Zufferey and D. Floreano, "Toward 30-gram autonomous indoor aircraft: Vision-based obstacle avoidance and altitude control," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (ICRA 2005). 2005, pp. 2594-2599.
- [153] W. Ding, J. Wang, S. Han, A. Almagbile, M. A. Garratt, A. Lambert, et al., "Adding Optical Flow into the GPS/INS Integration for UAV navigation," in *Proc. of International Global Navigation Satellite Systems Society Symposium*, 2009, pp. 1-13.
- [154] B. Herissé, T. Hamel, R. Mahony, and F.-X. Russotto, "Landing a VTOL unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 28, 2012, pp. 77-89.
- [155] A. Arvai, J. Kehoe, and R. Lind, "Vision-based navigation using multi-rate feedback from optic flow and scene reconstruction," *Aeronautical Journal*, Vol. 115, 2011, pp. 411-420.
- [156] H. Chao, Y. Gu, J. Gross, G. Guo, M. L. Fravolini, and M. R. Napolitano, "A comparative study of optical flow and traditional sensors in UAV navigation," in *American Control Conference (ACC)*, 2013, pp. 3858-3863.
- [157] J. J. Koenderink and A. J. van Doorn, "Facts on optic flow," *Biological cybernetics*, Vol. 56, 1987, pp. 247-254.
- [158] J.-C. Zufferey, A. Beyeler, and D. Floreano, "Autonomous flight at low altitude using light sensors and little computational power," *International Journal of Micro Air Vehicles*, Vol. 2, pp. 107-117, 2010.
- [159] S. Roth and M. J. Black, "On the spatial statistics of optical flow," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 74, pp. 33-50, 2007.
- [160] J. L. Barron, D. J. Fleet, and S. S. Beauchemin, "Performance of optical flow techniques," *Robotics and Automation (ICRA)*, 2014, pp. 5530-5536.
- [131] D. Dusha, Mejias, L., "Attitude observability of a loosely-coupled GPS/Visual Odometry Integrated Navigation Filter," 2010.
- [132] M. Norouz, M. Ebrahimi, and M. Arbabmir, "Modified Unscented Kalman Filter for improving the integrated visual navigation system," in *Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2017, pp. 753-758.
- [133] J. Shi and C. Tomasi, "Good features to track," in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR'94.*, 1994, pp. 593-600.
- [134] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," in *The proceedings of the seventh IEEE international conference on Computer vision*, 1999, pp. 1150-1157.
- [135] S. Se, D. G. Lowe, and J. J. Little, "Vision-based global localization and mapping for mobile robots," in *IEEE Transactions on Robotic*, Vol. 21, 2005, pp. 364-375.
- [136] S. Se, D. Lowe, and J. Little, "Mobile robot localization and mapping with uncertainty using scale-invariant visual landmarks," *The international Journal of robotics Research*, Vol. 21, 2002, pp. 735-758.
- [137] A. Aminzadeh, M. A. Amiri Atashgh. "The practical implementation of vision navigation with Optical Flow sensor for a air vehicle robot," *2nd National Congress Research in Computer Engineering*, Iran, Tehran, 2015. (In Persian)
- [138] M. M. G. Campa, M. L. Fravolini, Y. Gu, B. Seanor, and M. R. Napolitano, "A comparison of optical flow algorithms for real time aircraft guidance and navigation," 2008.
- [139] S. Saripalli, G. S. Sukhatme, L. O. Mejías, and P. C. Cervera, "Detection and tracking of external features in an urban environment using an autonomous helicopter," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, ICRA 2005, 2005, pp. 3972-3977.
- [140] S. van der Zwaan and J. Santos-Victor, "An insect inspired visual sensor for the autonomous navigation of a mobile robot," *Proc. of the Seventh International Symposium on Intelligent Robotic Systems (SIRS)*, 1999.
- [141] T. Netter and N. Francheschini, "A robotic aircraft that follows terrain using a neuromorphic eye," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002, pp. 129-134.
- [142] M. Srinivasan, S. Zhang, J. Chahl, G. Stange, and M. Garratt, "An overview of insect-inspired guidance for application in ground and airborne platforms," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 218, 2004, pp. 375-388.
- [143] W. E. Green, P. Y. Oh, K. Sevcik, and G. Barrows, "Autonomous landing for indoor flying robots using optic flow," in *ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2003, pp. 1347-1352.
- [144] W. E. Green, P. Y. Oh, and G. Barrows, "Flying insect inspired vision for autonomous aerial robot maneuvers in near-earth environments," in *IEEE International*

- guidance, control, and dynamics*, Vol. 33, 2010, pp. 147-159.
- [169] M. Srinivasan, M. Lehrer, W. Kirchner, and S. Zhang, "Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees," *Visual neuroscience*, Vol. 6, 1991, pp. 519-535.
- [170] H. Romero, S. Salazar, and R. Lozano, "Real-time stabilization of an eight-rotor UAV using optical flow," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 25, 2009, pp. 809-817.
- [171] M. A. Garratt and J. S. Chahl, "Vision-based terrain following for an unmanned rotorcraft," *Journal of Field Robotics*, Vol. 25, 2008, pp. 284-301.
- [172] F. Ruffier and N. Franceschini, "Optic flow regulation: the key to aircraft automatic guidance," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 50, 2005, pp. 177-194.
- [173] J. S. Humbert, R. M. Murray, and M. H. Dickinson, "Pitch-altitude control and terrain following based on bio-inspired visuomotor convergence," in *AIAA conference on guidance, navigation and control*, 2005.
- [174] B. Herisse, F.-X. Russotto, T. Hamel, and R. Mahony, "Hovering flight and vertical landing control of a VTOL unmanned aerial vehicle using optical flow," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2008.*, 2008, pp. 801-806.
- [175] A. Cesetti, E. Frontoni, A. Mancini, P. Zingaretti, and S. Longhi, "A vision-based guidance system for UAV navigation and safe landing using natural landmarks," in *Selected papers from the 2nd International Symposium on UAVs*, Reno, Nevada, USA June 8-10, 2009, pp. 233-257.
- [176] D. Eynard, P. Vasseur, C. Demonceaux, and V. Frémont, "Real time UAV altitude, attitude and motion estimation from hybrid stereovision," *Autonomous Robots*, Vol. 33, 2012, pp. 157-172.
- International journal of computer vision*, Vol. 12, pp. 43-77, 1994.
- [161] J.-C. Zufferey and D. Floreano, "Optic-flow-based steering and altitude control for ultra-light indoor aircraft," 2004.
- [162] F. Kendoul, I. Fantoni, and K. Nonami, "Optic flow-based vision system for autonomous 3D localization and control of small aerial vehicles," *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 57, 2009, pp. 591-602.
- [163] S. Baker, D. Scharstein, J. Lewis, S. Roth, M. J. Black, and R. Szeliski, "A database and evaluation methodology for optical flow," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 92, 2011, pp. 1-31.
- [164] M. Mammarella, G. Campa, M. L. Fravolini, and M. R. Napolitano, "Comparing optical flow algorithms using 6-dof motion of real-world rigid objects," *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, IEEE Transactions on, Vol. 42, 2012, pp. 1752-1762.
- [165] J. J. Kehoe, A. S. Watkins, R. S. Causey, and R. Lind, "State estimation using optical flow from parallax-weighted feature tracking," in *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2006.
- [166] R. F. Vassallo, J. Santos-Victor, and H. J. Schneebeli, "A general approach for egomotion estimation with omnidirectional images," in *Omnidirectional Vision*, 2002. Proceedings. Third Workshop on, 2002, pp. 97-103.
- [167] J. Kim and G. Brambley, "Dual optic-flow integrated navigation for small-scale flying robots," in *Proc. of Australasian Conference on Robotics and Automation*, Brisbane, Australia, 2007.
- [168] A. M. Hyslop and J. S. Humbert, "Autonomous navigation in three-dimensional urban environments using wide-field integration of optic flow," *Journal of*