

بهبود دقت در الگوریتم مبتنی بر بینایی برای تعیین وضعیت یک بالگرد بدون سرنشین در فاز فرود

مریم رحمتی^۱، علی محمودی^۲، علیرضا عرفانیان^۳

۱. کارشناسی ارشد برق الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، Rahmati_maryam.1015@yahoo.com

۲. استادیار مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳. استادیار مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۱۹

چکیده

در این مقاله، روشی مبتنی بر بینایی برای افزایش دقت تخمین وضعیت بالگردهای بدون سرنشین در فاز فرود ارائه می‌شود. در الگوریتم پایه، با مقایسه یک تصویر مرجع از علامت فرود با تصاویر حاصل از دوربین نصب شده در بالگرد و با استفاده از تکنیک SIFT به انطباق ویژگی‌های متناظر در تصاویر پرداخته می‌شود و تخمین وضعیت بالگرد نسبت به علامت فرود بر مبنای تجزیه ماتریس هموگرافی صورت می‌گیرد. با ارزیابی حساسیت دقت تخمین وضعیت در این الگوریتم نسبت به عوامل مختلف، اهمیت تاثیر توزیع مکانی ویژگی‌ها نشان داده شده و بر همین اساس، تکنیکی برای انتخاب مناسبترین ویژگی‌ها در مرحله استخراج ماتریس هموگرافی پیشنهاد می‌شود. علاوه بر آن، شکل مناسبی برای علامت فرود طراحی شده که ویژگی‌های آن ذاتا دارای توزیع مکانی مناسب می‌باشند. تکنیک پیشنهادی در محیط مطلب پیاده‌سازی شده و برای ارزیابی آن، سناریوهای مختلفی در محیط VRML ایجاد شده و از تصاویر محیط واقعی نیز استفاده می‌شود. نتایج پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی بر روی تصاویر تولید شده از الگوهای مختلف فرود نشان‌دهنده بهبود خطای تخمین وضعیت تا ۳۰ درصد می‌باشد.

کلیدواژه

بالگرد بدون سرنشین، فرود خودکار، تخمین وضعیت، هموگرافی، SIFT

مقدمه

دست دادن سیگنال (GPS)، روش‌های مبتنی بر بینایی، کارآمدی خود را حفظ می‌کنند [۳].

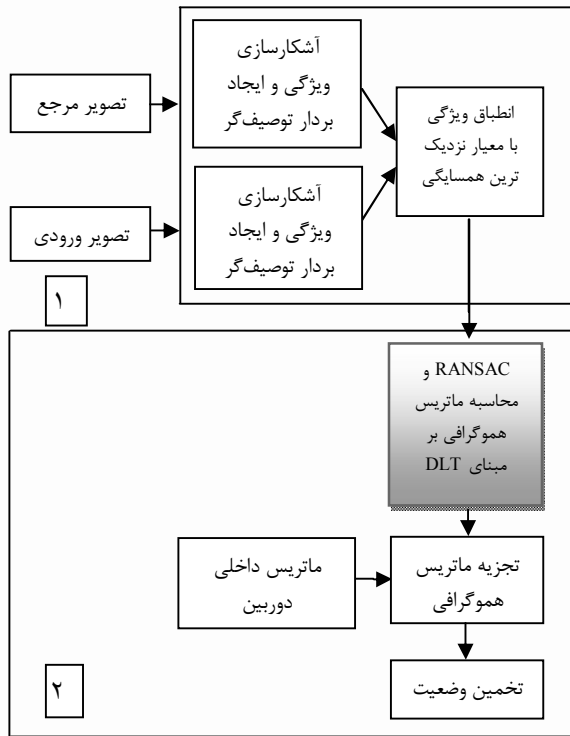
عموما فرود خودکار پرنده‌های بدون سرنشین در منطقه‌ای انجام می‌شود که علامت فرود شناخته‌شده‌ای در آن منطقه تعبیه شده باشد، اما در برخی از مراجع، مسئله فرود خودکار برای مناطق طبیعی نیز مطرح و بررسی شده است. برای نمونه در این زمینه می‌توان به [۴] اشاره کرد، که در آن، یک تصویر مرجع از منطقه مناسب فرود توسط کاربر در اختیار سیستم بینایی بالگرد قرار می‌گیرد و با بکارگیری الگوریتم SIFT برای انطباق تصویر مرجع و تصاویر دریافتی از دوربین بالگرد محل مورد نظر شناسایی می‌شود. در [۵] شناسایی محلی امن برای فرود بدون داشتن تصویری قبلی از آن منطقه توسط سیستم بینایی صورت می‌گیرد: شار نوری بر مبنای ویژگی‌های انطباق داده شده توسط SIFT در فریم‌های متوالی تصویر محاسبه شده و واریانس شار نوری به عنوان معیاری از صافی سطح برای تشخیص منطقه امن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کار بعدی، علاوه بر آن، ویژگی‌های بافت تصاویر نیز برای طبقه‌بندی سطح، به سطح امن و ناامن مورد استفاده قرار گرفته است [۶].

در این مقاله، فرود خودکار بالگرد بر روی علامت فرود از پیش تعیین شده، مورد نظر است. تاکنون کارهای متعددی در این زمینه

امروزه، پرنده‌های بدون سرنشین در حوزه‌های مختلف به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱]. بالگردهای کوچک بدون سرنشین، خانواده‌ای از این پرنده‌ها هستند که بدلیل قابلیت‌های منحصر به فرد پروازی آن‌ها، به طور خاص مورد توجه می‌باشند؛ از جمله اینکه قادر به اوج و فرود عمودی، مانور در ارتفاع کم و توقف در ارتفاعی مشخص هستند. از آنجایی که این بالگردها عمدتا برای پرواز در مسافت‌های دور از ایستگاه زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند، نیازمندی به تکنولوژی قابل اعتمادی جهت فرود خودکار آن‌ها رو به افزایش می‌باشد.

از اهداف مهم در فرود خودکار، شناسایی محل فرود و تعیین موقعیت و جهت بالگرد نسبت به محل فرود می‌باشد. تجهیزات موقعیت‌یابی کلاسیک مانند سیستم‌های ناوبری اینرسی (INS) و سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی (GPS) برای دستیابی به بخشی از این اهداف، مناسب هستند [۲]. اما از آنجا که پرنده‌های بدون-سرنشین برای انجام ماموریت‌های خود مجهز به دوربین تصویری می‌باشند، استفاده از سیستم‌های فرود خودکار بر مبنای بینایی با پردازش تصاویر حاصل از این دوربین‌ها امکانپذیر شده و نیازی به سیستم‌های اضافی نیست؛ علاوه بر آن، در مواقعی که بکارگیری سایر سیستم‌ها امکان‌پذیر نباشد (مانند اخلاص و از

می‌باشد شکل (۱). با بررسی حساسیت خطای تخمین وضعیت در الگوریتم پایه، یک تکنیک جدید در مرحله محاسبه ماتریس هموگرافی (بلوک برجسته شکل ۱) پیشنهاد شده که منجر به بهبود دقت تخمین وضعیت نسبت به الگوریتم پایه می‌شود. همچنین، الگوی مناسبی به عنوان علامت فرود طراحی شده است که با پیاده‌سازی الگوریتم پایه نیز بر روی این الگو، نسبت به سایر الگوهای مقالات مشابه در این زمینه، خطای تخمین وضعیت کاهش می‌یابد.



شکل ۱. نمودار بلوکی الگوریتم پایه

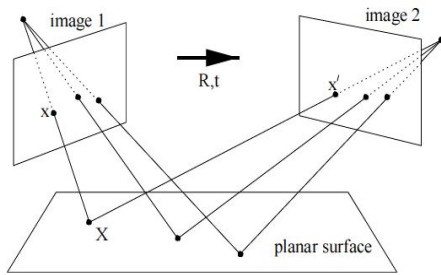
ساختار این مقاله بدین ترتیب است که در بخش دوم به انطباق الگوی فرود با تکنیک SIFT پرداخته می‌شود و در بخش سوم چگونگی تخمین وضعیت بالگرد بر مبنای هموگرافی مطرح می‌شود. در بخش چهارم تکنیک پیشنهادی برای بهبود دقت وضعیت، با توجه به بررسی حساسیت خطای الگوریتم پایه بیان می‌شود. در بخش پنجم نحوه پیاده‌سازی و ارزیابی الگوریتم مورد استفاده با کمک تصاویر محیط شبیه‌سازی سه‌بعدی VRML و نیز تصاویر محیط واقعی بیان می‌شود. همچنین، با ارزیابی الگوهای فرود مختلف و با توجه به نتایج آنالیز حساسیت خطای تخمین وضعیت، الگوی مناسبی برای فرود پیشنهاد می‌شود و نتایج ارائه می‌شود. در نهایت، در بخش ششم به جمع‌بندی پرداخته می‌شود.

ارائه شده که عموماً علاوه بر تشخیص علامت فرود، وضعیت پرنده نسبت به محل علامت فرود را نیز تخمین می‌زنند. از جمله روش‌های کارآمد برای تشخیص علامت فرود بکارگیری روش‌های انطباق مبتنی بر ویژگی می‌باشد. برای نمونه می‌توان به [۷] اشاره کرد. در این مرجع با ارائه یک الگوی علامت فرود متشکل از مربعات تو در تو، مرکز ثقل مربع‌های این الگو به عنوان ویژگی در نظر گرفته می‌شود و محل فرود بازنمایی می‌شود. سپس، با بکارگیری روش‌های هندسه چند منظری و محاسبه ماتریس پروژکتیو به تخمین وضعیت بالگرد می‌پردازد. مقایسه تصاویر ورودی از الگوی فرود با مدل سه‌بعدی الگوی فرود منجر به محاسبات پیچیده برای تخمین وضعیت و البته کاهش دقت می‌شود. در [۸] شناسایی الگوی فرودی مشابه با الگوی استاندارد علامت فرود بالگردها (علامت H) و تخمین وضعیت بالگرد نسبت به آن، با کمک ویژگی ممان‌های اینرسی H_u صورت می‌گیرد. روش بکار رفته در این مرجع، تنها قادر به محاسبه ۳ درجه آزادی (از ۶ درجه آزادی محاسبه جهت و موقعیت) می‌باشد. در [۹] از ممان‌های zernike به عنوان ویژگی استفاده شده تا نسبت به مرجع قبلی، پایداری بیشتری در تخمین چرخش حاصل شود. البته برای تخمین موقعیت در این مرجع، نیاز به داشتن ارتفاع بالگرد از زمین می‌باشد که با GPS سنجیده شده است. علاوه بر آن تخمین جهت چرخش در این مقاله تنها شامل زاویه عمود بر تصویر می‌باشد. در [۱۰] با فرض کردن وضعیت بالگرد، تنها به بازنمایی الگویی نامتقارن مشابه الگوی استاندارد علامت فرود می‌پردازد.

استخراج ماتریس هموگرافی برای تخمین وضعیت، توانایی روش‌های انطباق مبتنی بر ویژگی در تعیین تمامی پارامترهای وضعیت را افزایش داده و در نتیجه، تخمین وضعیت می‌تواند مستقل از سایر سنسورها صورت می‌گیرد. از جمله کارهای انجام شده با این روش‌ها [۱۱] است که پس از بازنمایی با استفاده از تکنیک خاص شار نوری هرمی^۱ ماتریس هموگرافی را محاسبه کرده و با تجزیه آن، به تخمین وضعیت سه‌بعدی بالگرد (با ۶ درجه آزادی) می‌پردازد. در [۱۲]، برای بازنمایی محل فرود تعبیه شده بر روی یک صفحه هوشمند، از روش انطباق مبتنی بر تکنیک SIFT و برای تخمین وضعیت، از محاسبه ماتریس هموگرافی استفاده شده است.

در مقاله حاضر، یک صفحه دوطرفه به عنوان الگوی فرود برای بالگرد در نظر گرفته شده و با مقایسه تصویر مرجع از این الگو با تصاویر دوربین بالگرد، وضعیت بالگرد نسبت به محل فرود محاسبه می‌شود. الگوریتم پایه مانند مرجع اخیر شامل دو مرحله انطباق الگوی فرود (بر مبنای تکنیک SIFT) و تخمین وضعیت (بر مبنای تخمین ماتریس هموگرافی با تکنیک RANSAC و تجزیه آن)

1. Pyramidal Lucas Kanade Optical Flow



شکل ۲. نمایش ایجاد یک نمایش ایجاد یک هموگرافی مسطح بین دو تصویر گرفته شده از نماهای مختلف از یک صفحه [۱۵]

عموماً مجموعه جفت نقاط (موقعیت ویژگی‌های) متناظر به دست آمده در مرحله انطباق بیشتر از چهار جفت است همچنین، به دلایل مختلفی نظیر خطا در تعیین جهت ویژگی‌ها و یا وجود ویژگی‌های مشابه، ممکن است شامل تعدادی انطباق اشتباه نیز باشد. در این مقاله، به منظور استفاده از تمام جفت نقاط متناظر و نیز حذف تناظرهای اشتباه، از الگوریتم نیرومند RANSAC استفاده می‌شود. این الگوریتم برای برآورد ماتریس هموگرافی به صورت زیر عمل می‌کند [۱۶]:

(۱) چهار جفت نقطه از میان مجموعه ویژگی‌های متناظر به صورت تصادفی انتخاب می‌شود.

(۲) با استفاده از چهار جفت تناظر انتخاب شده، پارامترهای مجهول هموگرافی به روش تبدیل DLT محاسبه می‌شوند.

(۳) سازگاری جفت تناظرهای باقیمانده با مدل هموگرافی، محاسبه شده و تعداد جفت تناظرهایی که با این مدل سازگار هستند، K ، با در نظر گرفتن یک حد آستانه برای سازگاری، تعیین می‌شوند.

(۴) اگر K به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد هموگرافی صحیح بوده و الگوریتم پایان می‌یابد، در غیر این صورت عملیات دوباره از مرحله ۱ تکرار می‌شود.

بعد از انجام تعداد تکرارهای لازم که معمولاً توسط کاربر تعیین می‌شود، الگوریتم پایان می‌پذیرد.

تجزیه ماتریس هموگرافی

پس از محاسبه ماتریس هموگرافی بین تصاویر، برای محاسبه میزان چرخش و جابجایی دوربین نسبت به وضعیت مرجع لازم است این ماتریس به مولفه‌های آن تجزیه شود. رابطه ۱، رابطه بین ماتریس هموگرافی و ماتریس چرخش و جابجایی را نشان می‌دهد [۱۵].

$$H = K(R + t)K^{-1} \quad (1)$$

در این رابطه، R ماتریس چرخش، t بردار جابجایی، m بردار نرمال صفحه فرود (در تصویر مرجع) بوده و K ماتریس داخلی دوربین می‌باشد. در این مقاله برای تجزیه ماتریس هموگرافی به بردار جابجایی و ماتریس چرخش از الگوریتم [۱۷] استفاده شده است.

انطباق الگوی فرود

عناوین برای شناسایی الگوی فرود در تصاویر اخذ شده از دوربین بالگرد، از روش SIFT استفاده می‌شود که روشی پایدار بویژه در برابر تغییر مقیاس، چرخش و تغییر زاویه دید دوربین می‌باشد: ابتدا نقاط کلیدی در تصویر به‌عنوان ویژگی آشکار شده و سپس یک بردار توصیف‌گر برای هر ویژگی تشکیل می‌شود و با بررسی انطباق بین بردارهای توصیف‌گر ویژگی، ویژگی‌های متناظر بین تصویر دریافتی و تصویر مرجع مورد نظر، استخراج می‌شوند (مرحله ۱ در شکل ۱).

در مرحله انطباق بردارهای توصیف‌گر، از معیار نزدیکترین همسایه از نظر کمترین میزان فاصله اقلیدسی مابین توصیفگرها استفاده شده است. به‌منظور افزایش اطمینان در صحت فرآیند انطباق، نسبت میان کمترین فاصله و دومین کمترین فاصله، برای هر جفت ویژگی متناظر، باید از یک مقدار آستانه، 0.8 کمتر باشد [۱۳].

تخمین وضعیت

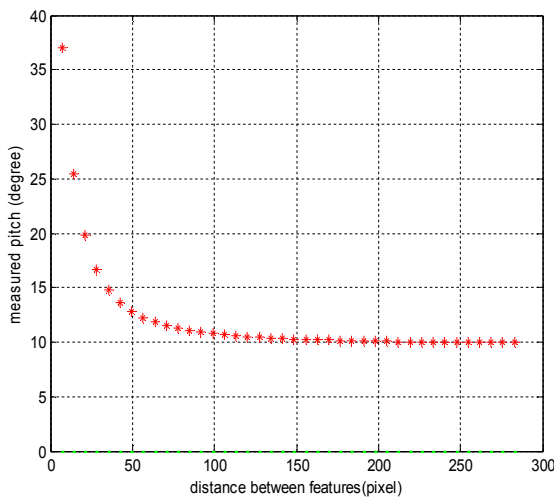
در مرحله بعدی الگوریتم، با فرض برقراری رابطه هموگرافی هندسی بین موقعیت جفت ویژگی‌های متناظر در تصویر دریافتی از دوربین بالگرد و تصویر مرجع علامت فرود، ماتریس هموگرافی استخراج شده و با تجزیه آن به ماتریس‌های چرخش و جابجایی، جهت و موقعیت سه بعدی دوربین نسبت به محل فرود (و یا همان وضعیت بالگرد) تعیین می‌شود (مرحله ۲ در شکل ۱).

استخراج ماتریس هموگرافی

در شکل (۲) چند نقطه دلخواه در فضا و تصاویر اخذ شده از آنها در دو موقعیت متفاوت دوربین نشان داده شده است: تصویر شماره ۲ پس از چرخش و انتقال دوربین نسبت به وضعیت اولیه آن هنگام اخذ تصویر شماره ۱ حاصل شده است. هموگرافی، یک نگاشت خطی بین موقعیت تصاویر این نقاط، در دو تصویر است که با یک ماتریس 3×3 نمایش داده می‌شود و تبدیلی است که اثرات پرسپکتیو را شامل می‌شود [۱۴]. بدین ترتیب، موقعیت نقاط متناظر در دو تصویر با معادله $x' = Hx$ به یکدیگر نگاشت می‌شوند، که H همان ماتریس هموگرافی است (موقعیت نقاط توسط مختصات همگن بیان می‌شوند).

برای هر جفت نقطه متناظر، دو معادله خطی مبتنی بر المان‌های H می‌توان ایجاد کرد، بنابراین چهار انطباق برای تعیین المان‌های ماتریس هموگرافی کافی است. در این مقاله، برای حل این معادلات از الگوریتم DLT استفاده شده است [۱۴].

شده تا اثر پراکندگی موقعیت ویژگی‌های متناظر در تصویر نمایان شود (آشکارسازی ویژگی‌ها و انطباق آن‌ها به صورت دستی انجام شده است). به‌عنوان مثال، نمودار شکل (۳) برای یک الگوی فرود نوعی، نشان می‌دهد که با بیشتر شدن میانگین فاصله ویژگی‌ها از یکدیگر در تصویر، دقت تخمین زاویه افزایش یافته و با رسیدن به آستانه حدود ۱۵۰ پیکسل، مقدار بهبود اندازه‌گیری تثبیت می‌شود. بدین ترتیب صرفاً با تغییر موقعیت ویژگی‌ها دقت تخمین وضعیت تغییر می‌کند. در این مقاله سعی شده از این نکته استفاده شود و تکنیکی در مرحله محاسبه ماتریس هموگرافی ارائه شود تا خطای تخمین وضعیت حداقل شود.



شکل ۳. تاثیر افزایش فاصله ویژگی‌ها بر اندازه‌گیری زاویه پیچ هنگامی که دوربین به مقدار ۱۰ درجه در پیچ چرخیده است (محور افقی میانگین فاصله جفت ویژگی‌های متناظر برای محاسبه ماتریس هموگرافی بر حسب پیکسل و محور عمودی زاویه پیچ اندازه‌گیری شده را بر حسب درجه نشان می‌دهد).

علاوه بر آن، در بخش پیاده‌سازی نشان داده می‌شود که با تغییر الگوی فرود نیز می‌توان موقعیت ویژگی‌ها را تغییر داد و بر اساس نکته فوق، خطای تخمین وضعیت را کاهش داد.

بدین ترتیب، روش جدید با اعمال تغییری در محاسبه ماتریس هموگرافی از الگوریتم پایه پیشنهاد می‌شود: در مرحله انتخاب تصادفی جفت ویژگی‌های متناظر برای الگوریتم RANSAC، فاصله چهار ویژگی انتخابی از یکدیگر محاسبه شده و در صورت بیشتر بودن از یک سطح آستانه، هموگرافی محاسبه می‌شود و در غیر این صورت، مجدداً چهار جفت نقطه دیگر بصورت تصادفی انتخاب می‌شود.

با استفاده از بردار جابجایی t موقعیت بالگرد نسبت به محل فرود تعیین می‌شود. اما برای استخراج جهت بالگرد نسبت به محل فرود (زوایای یاو و پیچ و رول)، ماتریس چرخش R باید تجزیه شود. برای این کار از ترتیب چرخش Tait-Bryan استفاده شده است. در این مدل، ψ زاویه چرخش حول محور z (یاو)، θ زاویه چرخش حول y (پیچ) و φ زاویه چرخش حول محور x (رول) می‌باشد [۱۱]. ماتریس تبدیل در این مدل بر اساس ترکیب ماتریس‌های چرخش به صورت زیر بدست می‌آید:

$$R_{TaitBryan} = R_x R_y R_z \quad (2)$$

با برابر قرار دادن این ماتریس و ماتریس چرخش محاسبه شده از تجزیه ماتریس هموگرافی (R)، زاویه‌های چرخش مطابق با معادلات (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند:

$$R_{TaitBryan} = R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\theta = -\arcsin(r_{13}), \quad \psi = \arcsin\left(\frac{r_{12}}{\cos \theta}\right), \quad (4)$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{r_{23}}{\cos \theta}\right)$$

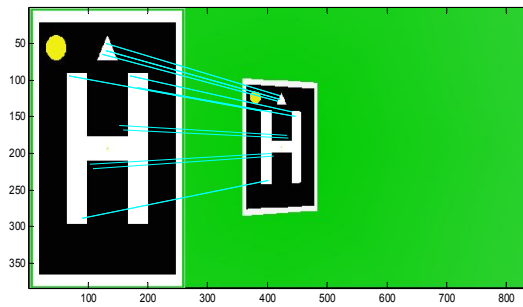
در این مقاله، محور عمود بر تصاویر محور z و راستای افقی در تصویر محور y و راستای عمودی در تصویر محور x در نظر گرفته شده است.

تکنیک بهبود دقت تخمین وضعیت

در الگوریتم‌های انطباق مرسوم است که کارآمدی الگوریتم، برحسب دقت حاصل در انطباق (اختلاف بین موقعیت دقیق نقاطی شناخته شده در تصویر ورودی با موقعیت همان نقاط براساس اعمال ماتریس هموگرافی به موقعیت آن‌ها در تصویر مرجع) بیان می‌شود، حال آنکه در موضوع مورد نظر این مقاله، باید نتیجه مطلوب را به دقت استخراج وضعیت بالگرد (اختلاف بین موقعیت و زوایای حاصل از تجزیه ماتریس هموگرافی با موقعیت و زوایای واقعی بالگرد) نسبت داد. با بررسی‌های انجام شده این نتیجه حاصل گردید که موقعیت و توزیع مکانی ویژگی‌های متناظر به‌کار گرفته شده برای محاسبه ماتریس هموگرافی، تاثیر قابل توجهی در دقت تخمین وضعیت دارد: چنانچه ویژگی‌ها در تصویر پراکنده باشند، خطای تخمین وضعیت کاهش می‌یابد. در این بررسی‌ها، سایر عوامل ایجاد کننده خطا از جمله خطای تعیین موقعیت ویژگی‌ها و خطای انطباق ویژگی‌ها به صورت تصادفی با توزیع یکنواخت و مستقل از موقعیت با دامنه ۰.۵ پیکسل در نظر گرفته

پیاده‌سازی

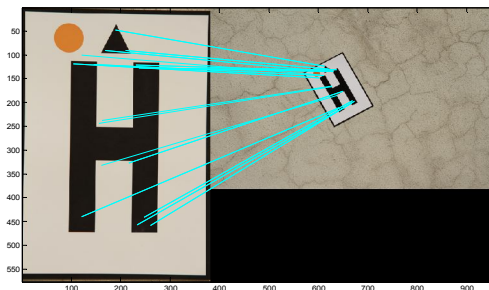
در این بخش ابتدا سناریوهای طراحی شده جهت ارزیابی الگوریتم مورد استفاده برای تخمین وضعیت معرفی می‌شود و مقایسه‌ای بین نتایج پیاده‌سازی الگوریتم جدید در این سناریوها با الگوریتم پایه صورت می‌گیرد، سپس الگوهای فرود متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته و الگوریتم جدید تخمین وضعیت در شرایط گوناگون روی آن‌ها پیاده‌سازی می‌شود تا یک الگوی فرود مناسب پیشنهاد شود. این الگو نه فقط مناسب تلفیق با الگوریتم پیشنهادی است، بلکه بکارگیری آن با الگوریتم پایه نیز منجر به کاهش خطای تعیین وضعیت (نسبت به سایر الگوهای بررسی شده) خواهد شد.



شکل ۵. انطباقات حاصله در مرحله بکارگیری الگوریتم RANSAC در زاویه رول ۱۵ درجه

سناریوی محیط واقعی

جهت ارزیابی شرایطی واقعی، تصویری از الگوی فرود تهیه شده و در فاصله ۶ متری مقابل یک دوربین قرار داده شده تا تصاویری واقعی در وضعیت‌های گوناگون دوربین نسبت به آن تصویر تهیه شده است. دوربین مورد استفاده از نوع Canon مدل EOS 7D و دارای فاصله کانونی ۴۵ میلی‌متر می‌باشد. ابعاد تصاویر مورد استفاده مشابه تصاویر محیط مجازی بوده و فاصله کانونی دوربین برحسب پیکسل ۱۲۰۶,۳۸ می‌باشد. برای نمونه نتیجه پیاده‌سازی الگوریتم پایه پس از بکارگیری الگوریتم RANSAC برای تصویری با زاویه چرخش ۳۰ درجه حول محور Z (باو) در شکل (۶) آورده شده است.



شکل ۶. پیاده‌سازی الگوریتم فرود در مرحله بکارگیری الگوریتم RANSAC برای تصویری با زاویه چرخش ۳۰ درجه حول محور z

نتایج ارزیابی

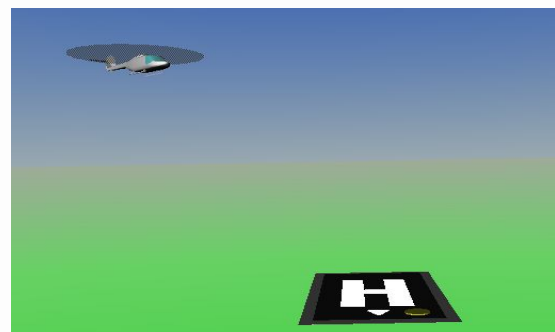
نتیجه اجرای الگوریتم جدید با این روش پیشنهادی روی وضعیت‌های مختلف دوربین برای الگوهای متفاوت نیز نشان می‌دهد که خطای تخمین وضعیت کاهش می‌یابد. برای نمونه در شکل (۷) و شکل (۸) کاهش خطای تخمین وضعیت با بکارگیری الگوریتم جدید (نمودار قرمز) نسبت به الگوریتم پایه (نمودار آبی) در محاسبه زوایای رول و پیچ برای یک الگوی فرود خاص (نمایش داده شده در شکل ۱۵) نشان داده شده است.

سناریوی‌های ارزیابی

در محیط شبیه‌سازی سه بعدی VRML و همچنین محیط واقعی، تصویری با وضعیت‌های گوناگون دوربین تهیه شده است که در ادامه نمونه‌ای از آنها بیان می‌شود.

سناریوی محیط مجازی

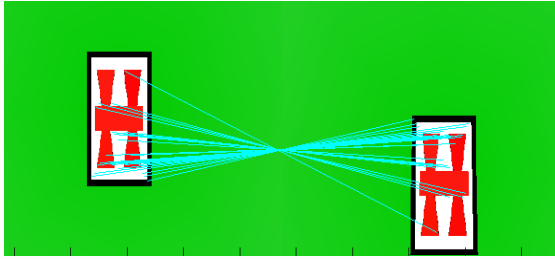
در ابتدا یک بالگرد مجهز به دوربین، متناسب با کاربرد مورد نظر و مطابق با فرض‌های پیاده‌سازی، در محیط VRML تعریف شده و یک الگوی فرود نیز در این محیط طراحی می‌شود. سپس، با برنامه‌های نوشته شده و با توجه به قابلیت‌های این محیط در سناریوهای گوناگون وضعیت بالگرد تغییر داده شده و دوربین بالگرد از صحنه روی زمین تصویر می‌گیرد. شکل (۴) این شرایط را برای یک الگوی فرود نوعی نشان می‌دهد.



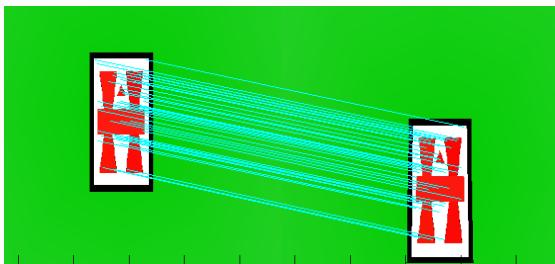
شکل ۴. سناریوی محیط VRML

تصاویر تولید شده در این محیط دارای ابعاد ۵۷۶*۳۸۰ بوده که در وضعیت‌های متفاوت بالگرد از پرواز آن در ارتفاع ۶ متری گرفته شده است (فاصله کانونی دوربین بالگرد معادل ۴۸۷,۱۷ پیکسل می‌باشد). نمونه‌ای از تصویر تولید شده از یک الگوی فرود نوعی در شرایط رول ۱۵ درجه‌ای بالگرد و نیز انطباقات حاصل پس از اعمال الگوریتم پایه در شکل (۵) نشان داده شده است.

الگو نسبت به محور افقی تصویر نامتقارن باشد تا از بروز ۱۸۰ درجه خطا در محاسبه زاویه یاو جلوگیری شود (شکل ۹).

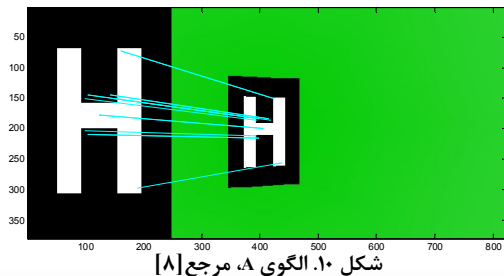


شکل ۹. الف - مرحله انطباق ویژگی برای یک نمونه الگوی فرود متقارن (ایجاد ۱۸۰ درجه خطا در انطباق ویژگی‌ها و در نتیجه در محاسبه زاویه یاو)

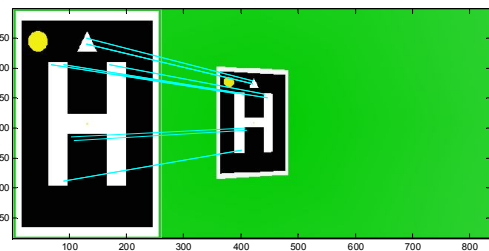


شکل ۹. ب - ایجاد عدم تقارن در الگوی فرود و رفع خطای ناشی از تقارن

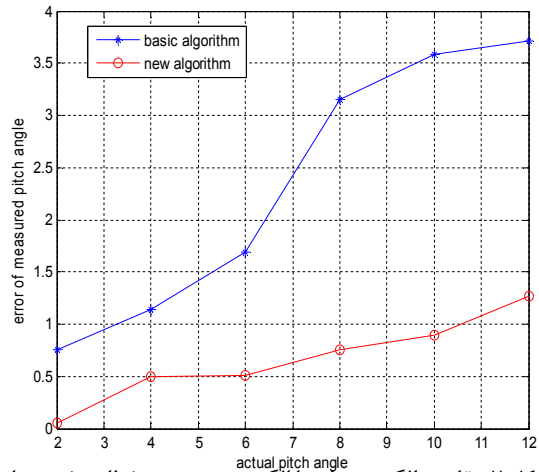
الگوهای مختلف بررسی شده در مرحله بکارگیری الگوریتم RANSAC، از مجموعه مراحل اجرای الگوریتم تخمین وضعیت در شرایطی که بالگرد دارای زاویه رول ۱۵ درجه می‌باشد (سمت راست) نسبت به تصویر مرجع از الگوی فرود (سمت چپ)، در شکل‌های (۱۰) تا (۱۵) نشان داده شده است. برای نمونه الگوی نشان داده شده در شکل (۱۰) الگوی مورد استفاده در مرجع [۸] می‌باشد و الگوهای شکل (۱۴) و شکل (۱۵) الگوهای طراحی شده می‌باشند.



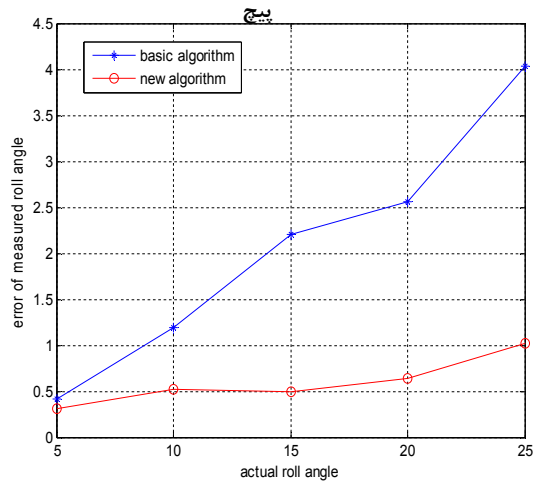
شکل ۱۰. الگوی A، مرجع [۸]



شکل ۱۱. الگوی B، الگوی بهبود یافته مرجع [۱۰]



شکل ۷. مقایسه الگوریتم پایه با الگوریتم جدید در خطای تخمین زاویه



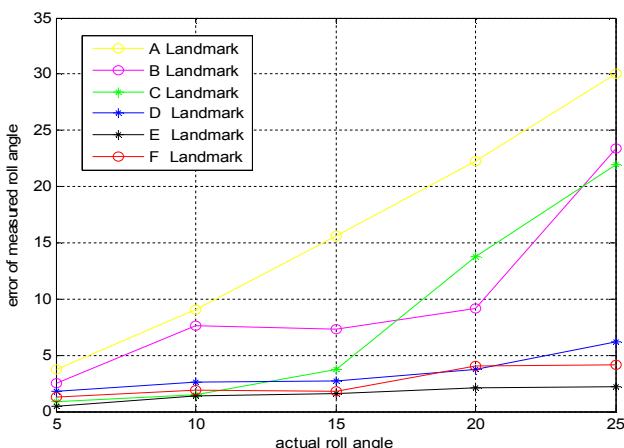
شکل ۸. مقایسه الگوریتم پایه با الگوریتم جدید در خطای تخمین زاویه رول

با توجه به نتایج بدست آمده خطای تخمین زاویه حدود ۳۰ درصد در وضعیت‌های گوناگون کاهش می‌یابد.

انتخاب الگوی فرود مناسب برای بالگرد

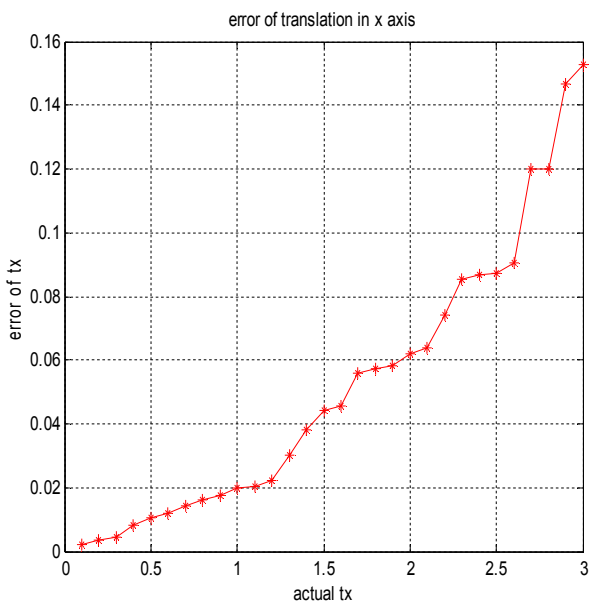
نتایج حاصل از آنالیز حساسیت، نشان داد که خطای تخمین وضعیت با میزان پراکندگی موقعیت ویژگی‌ها نسبت معکوس دارد. بر همین اساس، در این مقاله الگوهای گوناگونی طراحی شده و در سناریوهای مختلف، بررسی و ارزیابی شده‌اند. برخی از این الگوها، مشابه الگوهای بکار گرفته شده در سایر مقالات می‌باشند و سایر الگوها با توجه به مسئله پراکندگی ویژگی‌ها طراحی شده است. در طراحی الگوها موضوع سادگی الگوی فرود در حین داشتن تعداد مناسبی از ویژگی‌ها برای محاسبه ماتریس هموگرافی در نظر گرفته شده است؛ علاوه بر آن، این نکته نیز مورد توجه بوده، که

در این شکل نتیجه اجرای الگوریتم جدید روی الگوی پیشنهادی با رنگ سیاه نشان داده شده که دارای حداقل خطا نسبت به سایر الگوها می باشد.

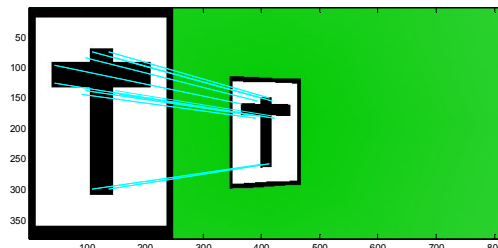


شکل ۱۶. نتایج پیاده سازی الگوریتم جدید روی الگوهای متفاوت فرود

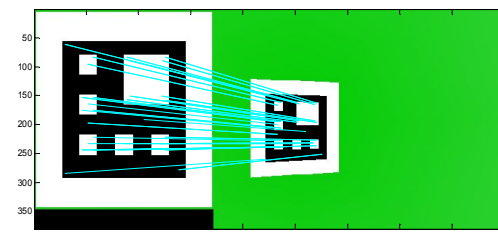
با وجود اینکه الگوهای مشابه الگوی F دارای تعداد ویژگی متناظر بیشتری در مرحله انطباق نسبت به الگوی E می باشند ولی خطای تخمین وضعیت در آنها بیشتر می باشد. علاوه بر این الگوی E ساده تر بوده و از این نظر برای پیاده سازی مناسب تر می باشد. در ادامه، نتایج پیاده سازی الگوریتم جدید بر روی الگوی پیشنهادی و وضعیت اندازه گیری شده در سناریوی محیط VRML، برای خطای جابجایی در راستای محورهای X و Y در شکل (۱۷) و شکل (۱۸) نشان داده شده است. در این شکل ها محور افقی، مقدار واقعی و محور عمودی، مقدار خطای اندازه گیری شده را نشان می دهد.



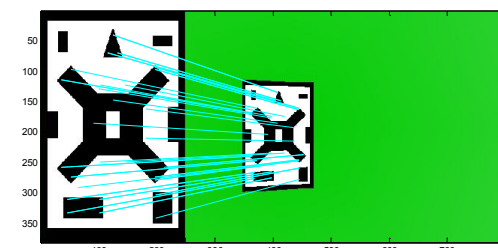
شکل ۱۷. خطای جابجایی در راستای محور X (بر حسب متر)



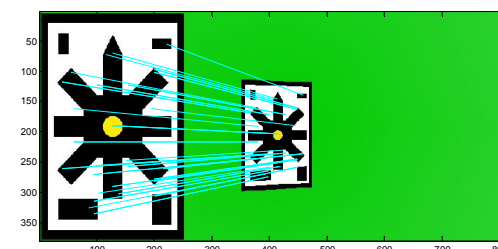
شکل ۱۲. الگوی C، الگوی مرجع [۱۲]



شکل ۱۳. الگوی D، الگوی مرجع [۱۳]

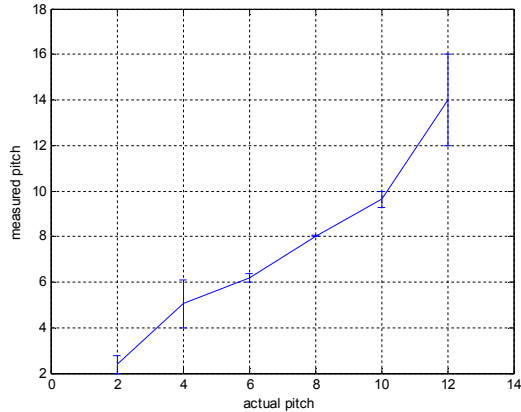


شکل ۱۴. الگوی E، الگوی طراحی شده

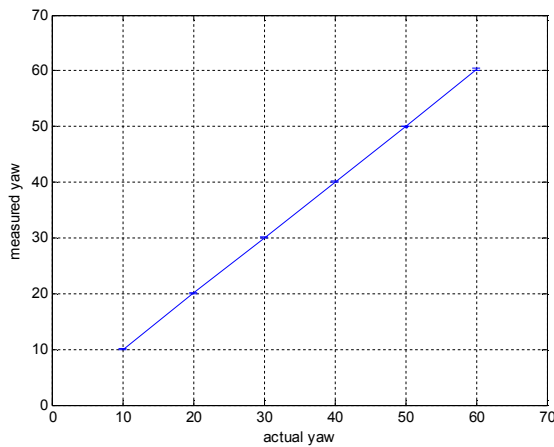


شکل ۱۵. الگوی F، الگوی طراحی شده

بر اساس نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم تخمین وضعیت در شرایط متفاوت روی الگوهای گوناگون فرود، الگوی E شکل (۱۴) دارای حداقل خطا می باشد. این الگو نامتقارن بوده و از پراکندگی خوبی در موقعیت ویژگی ها برخوردار است. همچنین، وجود اشکال ۴ ضلعی در ساختار آن سبب می شود که خطای کمتری در برابر اعوجاجات ناشی از اثر پروژکتیو در تغییر نمای دوربین بوجود آید. بدین ترتیب الگوی پیشنهادی برای فرود بالگرد در این مقاله الگوی E می باشد. برای نمونه از بیان نتایج متعدد در انتخاب الگوی E، در شکل (۱۶) خطای اندازه گیری زاویه رول آورده شده است.



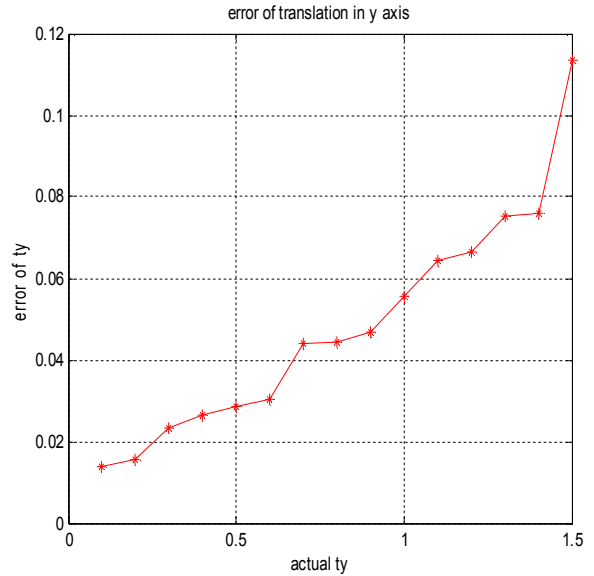
شکل ۲۰. تخمین جهت بالگرد برای زاویه پیچ (بر حسب درجه)



شکل ۲۱. تخمین جهت بالگرد برای زاویه یاو (بر حسب درجه)

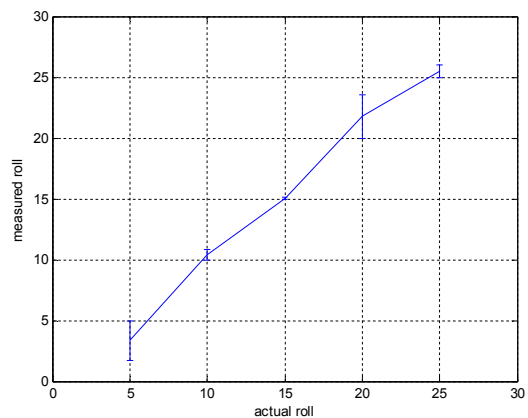
نتیجه‌گیری

در این مقاله به پیاده‌سازی الگوریتمی بر مبنای بینایی برای تخمین وضعیت بالگردهای بدون سرنشین در فاز فرود هم بر روی تصاویر محیط VRML و هم تصاویر محیط واقعی پرداخته شده است. این الگوریتم پایه بر اساس انطباق با روش SIFT و تخمین وضعیت بر مبنای ماتریس همگرافی عمل می‌کند. با توجه به نتایج بررسی حساسیت خطای تخمین وضعیت نسبت به موقعیت ویژگی‌های متناظر تصاویر، در این مقاله روشی برای کاهش خطای تخمین وضعیت در مرحله محاسبه ماتریس همگرافی ارائه شده است و نتایج بدست آمده از پیاده‌سازی الگوریتم جدید، افزایش دقت تخمین وضعیت را نسبت به الگوریتم پایه نشان می‌دهد. علاوه بر آن، در این مقاله الگوهای فرود گوناگونی برای اجرای الگوریتم ارائه شده، مورد ارزیابی قرار گرفته است و در نهایت الگویی که دارای حداقل خطای تخمین وضعیت در شرایط مختلف بوده به عنوان الگوی مناسب فرود پیشنهاد گردیده است. به طور میانگین خطای محاسبه شده در پیاده‌سازی الگوریتم جدید بر روی الگوی فرود پیشنهادی، برای زاویه یاو کمتر از 0.5° درجه و برای زوایای رول و پیچ 1.5° درجه می‌باشد و به‌عنوان نمونه در تخمین موقعیت، خطا



شکل ۱۸. خطای جابجایی در راستای محور y (بر حسب متر)

در شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) نتایج پیاده‌سازی الگوریتم جدید بر روی الگوی پیشنهادی برای تخمین جهت بالگرد نشان داده شده است، محور افقی میزان زاویه واقعی و محور عمودی میزان زاویه اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها حداکثر میزان انحراف از مقدار واقعی زوایا در اجراهای متعدد نیز نشان شده است. چنانچه مشاهده می‌شود تخمین زاویه یاو نسبت به دو زاویه دیگر بسیار دقیق‌تر صورت گرفته است که علت اصلی آن وجود اعوجاجات ناشی از اثر پروژکتیو در تغییر نمای دوربین در تخمین زوایای رول و پیچ می‌باشد.



شکل ۱۹. تخمین جهت بالگرد برای زاویه رول (بر حسب درجه)

- [7]C. S. Sharp, O. Shakernia and S. Sastry, "A Vision System for Landing an Unmanned Aerial Vehicle," IEEE International Conference on Robotics & Automation Seoul, Korea, 2001.
- [8]S. Saripalli, J. E. Montgomery and G. S. Sukhatme, "Vision-based Autonomous Landing of an Unmanned Aerial Vehicle," International Conference on Robotics Automation, Washington, DC, 2002.
- [9]Y. Fan, S. Haiqing, W. Hong, "A Vision-Based Algorithm for Landing Unmanned Aerial Vehicles," Proceedings of IEEE International Conference on Computer Science and Software Engineering, China, 2008.
- [10]Z. Fucen, S. Haiqing, W. Hong, "The Object Recognition and Adaptive Threshold Selection in the Vision System for Landing an Unmanned Aerial Vehicle," Proceedings of IEEE International Conference on Information and Automation, Zhuhai/Macau, China, 2009.
- [11]I.F. Mondragón, P. Campoy, C. Martínez, M. A. Olivares-Méndez, "3D pose estimation based on planar object tracking for UAVs control," IEEE International Conference on Robotics and Automation Anchorage Convention District, Anchorage, Alaska, USA, 2010.
- [12]M. H. Mahoor, R. Godzanker, K. Dalamagkidis, K. P. Valavanis, "Vision-Based Landing of Light Weight Unmanned Helicopters on a Smart Landing Platform," J. Intell Robot Syst 61, 2011, pp.251-265.
- [13]D. G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale Invariant Keypoints," Cascade Filtering Approach. Int. J. Comput. Vis, 2004, vol. 60, pp. 91-110.
- [14]D. E. Dubrofsky, "Homography Estimation," A Thesis for the degree of master of science, the university of British Columbia Vancouver, 2009.
- [15]R. Hartley and Zisserman. A, "Multiple View Geometry in Computer Vision," 2nd ed. Cambridge University Press, 2004.
- [16]M. Fischler, and R. Bolles "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Communications of the ACM, 1996, vol. 24, no. 6, pp. 381-395.
- [17]O. Faugeras and F. Lustman "Motion and structure from motion in a piecewise planar environment," International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1988, vol. 2, pp. 485-508.

به ازای ۱ متر جابجایی در راستای افقی تصویر، حدود ۵/۵ سانتی‌متر و در راستای عمودی حدود ۲ سانتی‌متر برای پرواز در ارتفاع ۶ متر می‌باشد و بدین ترتیب بدون نیاز به اطلاعات دقیق سیستم‌های موقعیت‌یابی و سنسورهای متعدد که بکارگیری آن‌ها مستلزم صرف هزینه و افزایش وزن بالگرد است می‌توان وضعیت بالگرد را نسبت به محل فرود تخمین زد. همچنین بر اساس الگوریتم مورد استفاده، بدون نیاز به داشتن موقعیت اولیه بالگرد در فاز فرود موقعیت و جهت سه‌بعدی بالگرد تخمین زده می‌شود. با روش ارائه شده و الگوی پیشنهادی دقت تخمین وضعیت در الگوریتم بینایی نسبت به کارهای مشابه در این حوزه بهبود یافته است. علاوه بر آن روش پیشنهادی برای افزایش دقت تخمین وضعیت را می‌توان در سایر تکنیک‌های انطباق مبتنی بر ویژگی مورد استفاده قرار داد، این روش‌ها معمولاً بدنال حداقل کردن خطای انطباق می‌باشند که (با توجه به بررسی‌های انجام شده در این مقاله) این لزوماً به کمترین خطای تخمین وضعیت منجر نخواهد شد. همچنین روش پیشنهادی قابل بکارگیری در سایر کاربردهای تخمین وضعیت به روش بینایی نیز می‌باشد.

مرجع‌ها

- [1]D. Jeon, K. Cho, D. Kim, "Vision-based Autonomous Landing for Small-scale Unmanned Rotorcraft," 14th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops, 2011.
- [2]A. Conte, and G. Doherty, "An integrated UAV navigation system based on aerial image matching," In: IEEE Aerospace Conference, 2008, pp. 1-10.
- [3]P. Luo, and H. Pei, "An autonomous helicopter with vision based navigation," In: IEEE International Conference on Control and Automation, 2007.
- [4]A. Cesetti, E. Frontoni, A. Mancini, P. Zingaretti, and S. Longhi, "Vision-based Autonomous Navigation and Landing of an Unmanned Aerial Vehicle using Natural Landmarks," 17th Mediterranean Conference on Control & Automation Makedonia Palace, Thessaloniki, Greece, 2009.
- [5]A. Cesetti, E. Frontoni, A. Mancini, P. Zingaretti, S. Longhi, "A Vision-Based Guidance System for UAV Navigation and Safe Landing using Natural Landmarks," J. Intell Robot Syst, 2010, no 57, pp.233-257.
- [6]A. Cesetti, E. Frontoni, A. Mancini, P. Zingaretti, and S. Longhi, "Autonomous Safe Landing of a Vision Guided Helicopter," IEEE, 2010.

