

کنترل موقعیت سه بعدی ربات‌ها بر پایه ناوبری تصویری توزیع شده بلادرنگ

مجدالدین نجفی^۱، استادیار؛ شهاب‌الدین رحمانیان^۲، استادیار؛ زهرا نادعلیان^۳، پژوهشگر؛ وحید غفاری نیا^۴، استادیار

۱- پژوهشکده اویونیک دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - majd_najafi@cc.iut.ac.ir

۲- پژوهشکده اویونیک دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران

۳- پژوهشکده اویونیک دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران

۴- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - ghafarinia@cc.iut.ac.ir

چکیده: ناوبری بلادرنگ ربات‌ها در محیط‌های بسته همیشه یک چالش مهم در کنترل و هدایت آن‌ها بوده است. یک راهکار برای این مسئله تعیین موقعیت ربات با پردازش تصویرهای آرایه‌ای از دوربین‌های نصب شده در محیط است. البته روش‌هایی که تاکنون ارائه شده‌اند از معایب مختلفی مانند متکی بودن به تصاویر همه دوربین‌ها رنج می‌برند. در این مقاله یک روش تعیین موقعیت بلادرنگ مبتنی بر تصویر برای کنترل ربات‌های پرنده پیشنهاد شده است. حصول دقت بالا، پردازش بلادرنگ، پوشش کامل محیط، کاهش هزینه دوربین‌ها، مقاوم بودن در برابر خرابی یک یا چند دوربین و رفع مشکل عدم هم‌زمانی تصاویر از جمله اهداف روش پیشنهادی هستند. در این روش فیلترینگ تصویر، تشخیص شی و تعیین موقعیت دوبعدی هدف در تصویر به صورت موازی برای هر دوربین انجام می‌شود. سپس اطلاعات حاصل از دوربین‌ها که لزوماً هم‌زمان نیستند با به کارگیری یک فیلتر کالمن توزیع شده باهم ترکیب می‌شوند تا موقعیت سه بعدی هدف به صورت بلادرنگ استخراج شود. اعتبارسنجی عملی روش پیشنهادی برای کنترل یک کوادروتور در اتاق نشان می‌دهد که این روش به خوبی اهداف موردنظر را برآورده می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ناوبری تصویری، تعیین موقعیت بلادرنگ سه بعدی، فیلتر کالمن توزیع شده.

3D Position Control of Robots Based on Distributed Real-time Vision Navigation System

M. Najafi¹, Assistant professor; S. Rahmanian², Assistant professor; Z. Nadealian³, Researcher; Vahid Ghafarinia⁴, Assistant professor

1- Research Institute of Avionics, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Email: majd_najafi@cc.iut.ac.ir

2- Research Institute of Avionics, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3- Research Institute of Avionics, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

4- Electrical & Computer Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Email: ghafarinia@cc.iut.ac.ir

Abstract: Indoor localization and navigation of mobile robots has remained as a challenging problem. Vision-based navigation systems have been utilized as a promising solution. But they come with deficiencies such as weak robustness against camera failures. In this paper a vision-based 3D localization and control method for aerial robots is proposed. This method addresses several key features such as higher precision, real-time processing, full area coverage, reduced camera costs and robustness against asynchronized images and camera failures. Most of the processes of the proposed method, including image preprocessing, object recognition and 2D target localization are carried out separately for each camera. Then the acquired data are fused by a distributed Kalman filter to estimate the 3D location of the robot. The method has been experimentally verified by controlling the indoor position of a small aerial robot.

Keywords: Vision navigation system, three-dimensional target pose estimation, distributed kalman filter.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۰۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۴ و ۱۳۹۶/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۶

نام نویسنده مسئول: مجدالدین نجفی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، پژوهشکده اویونیک دانشگاه صنعتی اصفهان.

۱- مقدمه

دسترسی به موقعیت دقیق و بلادرنگ اهداف یا اشیاء، کاربردهای متنوعی در کنترل، رباتیک، صنایع نظامی و سیستم‌های حفاظتی دارد [۱]. تاکنون سیستم‌های بسیاری با ساختارهای متفاوت برای تخمین موقعیت سه بعدی اهداف پیشنهاد شده است. این سیستم‌ها می‌توانند از نظر کیفیت، پیکربندی و دقت عملکرد متفاوت باشند. برخی از این نوع سیستم‌ها متکی بر سامانه موقعیت یاب جهانی [۲]، سامانه شناسایی با امواج رادیویی، سیستم‌های بینایی ماشین [۳]، سیستم‌های مبتنی بر سیگنال‌های مغناطیسی هستند. در سال‌های اخیر شناسایی و ردیابی اهداف متحرک در فریم‌های متوالی از یک جریان ویدیویی مورد توجه محققین در این حوزه قرار گرفته است [۴-۶].

برخی از فناوری‌های سیستم‌های تعیین موقعیت در مقالات مختلفی همانند [۷-۹] مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان مثال در مرجع [۸]، ردیابی اهداف متحرک بر اساس الگوریتم فیلتر ذره انجام شده است. در این مقاله، مدل هدف با استفاده از تخمین چگالی کرنل گوسی و هیستوگرام وزن دار شده به دست می‌آید و با اعمال واریانس یک نویز تصادفی در محل هدف، موقعیت ذرات ناحیه مورد بررسی در فریم بعد پیشگویی می‌شوند.

مهم‌ترین پارامترهای مورد ارزیابی در چنین سیستم‌هایی، شامل دقت، چگونگی انجام پردازش‌ها به صورت بلادرنگ، استفاده از سیستم در داخل یا خارج ساختمان، محدوده عملکرد سیستم، حسگرهای مورد استفاده در سیستم، نوع الگوریتم مورد استفاده و هزینه سیستم است. به‌عنوان نمونه، ارزیابی بین سیستم‌های تعیین موقعیت در درون اتاق در مقاله کویانکو و همکارش [۹] در جدولی آورده شده است. با مطالعات انجام گرفته در این مقاله، سیستم‌های ناوبری مبتنی بر تکنیک‌های فراصوتی از مطلوب‌ترین سیستم‌ها معرفی شده است که مهم‌ترین پارامترهای مورد نظر در این انتخاب، هزینه و دقت عملکرد سیستم است.

با توجه به این‌که هر کدام از سیستم‌های ناوبری دارای محدودیت‌هایی نیز هستند، راه‌حل‌های جایگزینی با ترکیبی از الگوریتم‌ها و با بهره‌گیری از مزایای آن‌ها به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر معرفی شده است. در این راستا، روش‌هایی تحت عنوان سیستم‌های کمک ناوبری که به صورت موازی در کنار سیستم‌های ناوبری قابل استفاده هستند، توسعه یافتند. استفاده از چنین روش‌هایی باعث اصلاح پارامترهای ناوبری و در نتیجه موجب بهبود عملکرد سیستم ردیابی می‌شود.

به‌عنوان مثال، تعیین موقعیت بلادرنگ اهداف در سیستم‌های ناوبری اینرسی با استفاده از حسگرهای اینرسی و بدون نیاز به سیگنال‌های خارجی انجام می‌گیرد، ولی خطای آن به دلیل خطای اولیه و خطای حسگرهای اینرسی با گذشت زمان افزایش می‌یابد که این امر موجب انحراف زیاد از تشخیص موقعیت هدف می‌شود. برای

رفع این مشکل می‌توان از حسگرهایی با دقت زیاد استفاده کرد که این امر به دلیل افزایش هزینه سیستم مقرون به صرفه نیست. راه‌حل جایگزینی دیگر می‌تواند تلفیق این سیستم با سیستم کمکی دیگری باشد. ترکیب سیستم موقعیت یاب جهانی و سیستم ناوبری اینرسی از مشهورترین سیستم‌های تلفیقی است که این امر موجب بهبود عملکرد و کاهش خطای سیستم ناوبری اینرسی می‌شود. در این راستا در مقاله کراسدیس [۱۰] و مقاله عبدالکریم و همکارانش [۱۱]، تلفیق داده‌های این دو سیستم با استفاده از فیلتر کالمن، فیلتر کالمن توسعه یافته و دیگر رویکردهای فیلترینگ انجام گرفته است. در هنگام حضور سیستم موقعیت یاب جهانی، خطای سیستم ناوبری اینرسی قابل تخمین است. از این رو، اگر حسگرهای ناوبری اینرسی دقت کافی داشته باشند، در زمان قطع شدن سیستم موقعیت یاب جهانی، سیستم ناوبری اینرسی اصلاح شده می‌تواند همچنان به عملکرد خود همانند قبل ادامه دهد.

در محیط‌های بسته که معمولاً حسگرهای کمک ناوبری قابل استفاده نیستند، سیستم‌های ناوبری مبتنی بر الگوریتم‌های پردازش تصویر می‌توانند گزینه مناسبی باشند. اولین بار سیستم ناوبری مبتنی بر الگوریتم‌های پردازش تصویر توسط آکی و همکارانش معرفی شد [۱۲]. آن‌ها از یک دوربین با زاویه دید ۳۶۰ درجه برای تهیه تصاویر و یک کامپیوتر برای پردازش تصاویر استفاده کردند. این الگوریتم دارای زمان پردازش زیادی (چند صد ثانیه برای هر فریم) است و در نتیجه استفاده از آن برای کاربردهای بلادرنگ امکان پذیر نیست.

پس از آن در زمینه سیستم‌های ناوبری مبتنی بر پردازش تصویر، مقالات بسیاری معرفی و توسعه یافتند. در برخی از این مقالات، علاوه بر سیستم مبتنی بر بینایی از سیستم‌های کمکی دیگری به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تر استفاده شده است. به‌عنوان مثال، در مقاله ارمنان و همکارش [۱۳] از ترکیب فناوری مبتنی بر بینایی و حسگرهای اینرسی استفاده شده است. همچنین در مقاله ساکاگامی و همکارش [۱۴] از ترکیب سیستم مبتنی بر بینایی و حسگرهای مغناطیسی و اینرسی و در الگوریتم ردیابی معرفی شده در مقاله ساتو و همکارانش [۱۵] از ژيروسکوپ در کنار سیستم مبتنی بر بینایی استفاده شده است. به علاوه در برخی از روش‌ها برای کاهش هزینه‌های سیستم، چند حسگر معمولی جایگزین یک حسگر گران قیمت شده است [۱۶].

در مقاله لی و همکارانش [۱۷]، از ترکیب فناوری مبتنی بر بینایی و حسگرهای اینرسی برای تخمین موقعیت هدف استفاده شده است. در این روش با استفاده از حسگرهای اینرسی، سیستم قادر به تخمین موقعیت هدف توسط دو دوربین (استریو) و یا یک دوربین است. اندازه‌گیری‌های به دست آمده از هر دو روش مبتنی بر بینایی و حسگرهای اینرسی تحت چهارچوب فیلتر کالمن توسعه یافته (زیرنویس) با یکدیگر ترکیب شده و در نتیجه موقعیت هدف محاسبه می‌شود. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که این سیستم

بلادرنگ با بهره‌بردن از پردازش موازی انجام می‌گیرد. الگوریتم پیشنهادی به‌صورت هم‌زمان بر روی چندین هسته از یک پردازنده به‌منظور دستیابی به سرعت بیشتر اجرا می‌شود که این امر موجب کاهش زمان اجرای الگوریتم می‌شود. مهم‌ترین تمایز پژوهش انجام‌شده در این مقاله با موارد مشابه قبلی در به‌کارگیری فیلتر کالمن توزیع‌شده به‌منظور ترکیب اطلاعات حاصل از پردازش تصاویر دوربین‌ها و استخراج مختصات سه‌بعدی اهداف است. با استفاده از این روش، نیازی به هم‌زمان‌سازی اطلاعات حاصل از پردازش تصویر دوربین‌ها نیست و مزایایی از جمله افزایش تعداد نمونه‌های مشاهده، امکان پیاده‌سازی موازی بر روی پردازشگر، کاهش مرتبه فیلتر کالمن، افزایش دقت محاسبه و عدم نیاز به مشاهده هدف از طریق تمامی دوربین‌ها نیز حاصل می‌شود.

در ادامه این مقاله، ابتدا به شرح الگوریتم پیشنهادی پرداخته و پس از توضیح مختصری در مورد روش پردازش تصویر، به شرح روش ترکیب اطلاعات از طریق فیلتر کالمن توزیع‌شده پرداخته می‌شود. نهایتاً، نتایج پیاده‌سازی واقعی روش پیشنهادی در یک محیط آزمایشگاهی جهت کنترل حلقه بسته یک کوآدرتور ارائه شده است.

۲- الگوریتم پیشنهادی

شکل ۱ طرح کلی از الگوریتم پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد. در این الگوریتم، با استفاده از ویژگی‌های استخراج‌شده از تصویر، هدف مورد شناسایی قرار گرفته و موقعیت دوبعدی آن در تصویر هر یک از دوربین‌ها تعیین می‌شود. سپس، موقعیت سه‌بعدی هدف به‌صورت بلادرنگ با بهره‌بردن از اطلاعات غیر هم‌زمان به‌دست‌آمده از هر دوربین در هر لحظه و با به‌کارگیری فیلتر کالمن توزیع‌شده محاسبه می‌شود. در ادامه، به توضیح هر یک از مراحل این الگوریتم می‌پردازیم.

۲-۱- دریافت تصاویر از هر دوربین

یک سیستم ردیابی مبتنی بر بینایی متشکل از دوربین و پردازنده است. هرچقدر دقت دوربین مورد استفاده بالاتر باشد، دقت الگوریتم ردیابی نیز بالاتر خواهد بود. به‌علاوه هرچقدر تعداد دوربین‌های مورد استفاده بیشتر باشد، میدان دید برای شناسایی اهداف متحرک بیشتر می‌شود. با رشد روزافزون پردازشگرها و کامپیوترها، استفاده از چندین دوربین در سیستم‌های ردیابی به‌سرعت افزایش یافته است [۱].

در این مقاله از چندین دوربین برای تخمین موقعیت سه‌بعدی هدف در حال حرکت در یک محیط بسته استفاده شده است. هر چه تعداد دوربین‌های مورد استفاده در محیط بیشتر باشد، میدان دید گسترده‌ای از اهداف ایجاد می‌شود. این امر باعث افزایش فضای تحت پوشش، افزایش دقت و صحت الگوریتم، بهبود کیفیت ردیابی، افزایش قدرت تشخیص، افزایش قدرت تفکیک اهداف، کاهش ابهام و احتمال خطا و همچنین بهبود توانایی سیستم در دنبال کردن اهداف مانوردهنده می‌شود. از طرف دیگر، در چنین سیستم‌هایی استفاده از چندین

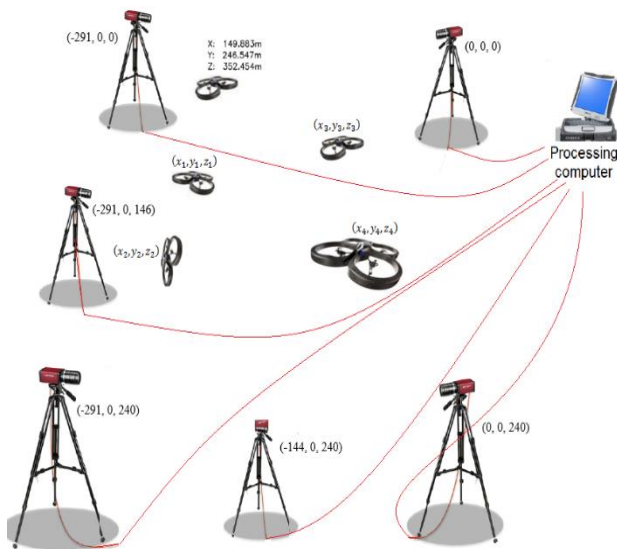
با استفاده از حس‌گرهای کم‌هزینه قادر به شناسایی دقیق هدف و به‌صورت بلادرنگ است. در این سیستم به‌طور متوسط، موقعیت هدف با نرخ ۱۰ فریم در ثانیه به‌روزرسانی می‌شود.

در مقاله [۱۸] یک سیستم تعیین موقعیت بلادرنگ مبتنی بر چندین حس‌گر معرفی شده است. در این سیستم از دوربین‌های گیگا اترنت استفاده شده که هر یک از چهار دوربین در گوشه‌ای از محیط نصب شده‌اند. برای شناسایی هدف موردنظر از روش تطبیق الگو استفاده شده به‌گونه‌ای که الگویی بر روی هدف موردنظر قرار داده می‌شود و بر اساس ضرایب همبستگی به‌دست آمده از هدف و ناحیه مورد ردیابی، هدف مورد شناسایی و ردیابی قرار می‌گیرد. در این سیستم، سرعت پردازش الگوریتم برابر با ۱۰ فریم در ثانیه است.

با توجه به فناوری سال‌های اخیر و توسعه الگوریتم‌های جدید، دقت سیستم‌های شناسایی اهداف مبتنی بر الگوریتم‌های پردازش تصویر در برخی از موارد با توجه به نوع هدف و به‌صورت غیر بلادرنگ، می‌تواند به ۹۹٪ نیز افزایش یابد [۱۹]. خطا و دقت در چنین سیستم‌هایی در مطالعات زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [۲۱-۱۹]. به‌عنوان نمونه، تیزر و همکارش در مقاله [۲۱]، چهار الگوریتم ردیابی را مورد مقایسه قرار دادند. این الگوریتم‌ها شامل ردیابی توسط کانتور فعال، کانتور بیزین، نمودار برش و متوسط تغییرات است که در این میان الگوریتم ردیابی توسط کانتور بیزین دارای کمترین مقدار خطا است [۲۲]. در این سیستم‌ها، تغییرات روشنایی و رنگ پس‌زمینه می‌تواند بر روی دقت و صحت الگوریتم اثرگذار باشند به‌گونه‌ای که هرچه محیط مورد استفاده پویاتر باشد، دقت سیستم نیز کاهش می‌یابد [۲۳]. در مقالات [۲۴، ۲۵]، پاراک و همکارانش ردیابی اهداف را تحت شرایط مختلفی از جمله تغییرات روشنایی، انسداد و غیره مورد بررسی قرار داده‌اند.

باین‌حال، در سیستم‌های ناوبری مبتنی بر پردازش تصویر، هنوز چالش‌هایی همانند دستیابی به دقت بالا، سادگی الگوریتم، پردازش بلادرنگ، پوشش کامل محیط و مشکلاتی مانند هزینه بالای دوربین‌ها، حجم بالای داده و نیاز به هم‌زمان‌سازی تصاویر، مانع از دستیابی به پاسخ مطلوب می‌شود [۱۷]. به‌عنوان مثال در مقاله کویانکو و همکارش، استفاده از دوربین‌های متعدد برای افزایش فضای تحت پوشش از معایب سیستم معرفی شده است زیرا باعث افزایش هزینه سیستم ردیابی می‌شود. در این مقاله راه‌حل مناسبی برای برطرف کردن چالش‌های ذکرشده، ارائه شده است.

در این مقاله روشی برای تعیین موقعیت سه‌بعدی یک ربات پرنده در درون اتاق با استفاده از حس‌گرهای تصویر توزیع‌شده ارائه می‌شود. این روش تنها با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر قادر به شناسایی، ردیابی و تخمین موقعیت سه‌بعدی هدف داخل اتاق به‌صورت بلادرنگ است. حس‌گرهای مورد انتخاب در این سیستم، دوربین‌هایی کم‌هزینه و با کیفیت متوسط هستند و بنابراین سیستم مذکور کاملاً مقرون‌به‌صرفه است. اجرای این الگوریتم به‌صورت



شکل ۲: نمایشی شماتیک از آرایش دوربین‌ها در محیط

با پردازش روی اطلاعات غیر هم‌زمان تعدادی از دوربین‌ها عمل شناسایی، ردیابی و تخمین موقعیت سه بعدی هدف صورت می‌گیرد که هر کدام در قسمت‌های بعد توضیح داده شده‌اند.

۲-۲- استخراج ویژگی

هدف در الگوریتم‌های پردازش تصویر معمولاً توسط بافت، رنگ و ویژگی‌های شکلی مشخص می‌شود. از این‌رو با انتخاب ویژگی‌های مناسب، الگوریتم پیشنهادی بایستی هدف را به خوبی از پس‌زمینه شناسایی کند و برای استفاده در کاربردهای بلادرنگ دارای زمان پاسخ خوبی باشد.

اولین قدم در مرحله شناسایی، تمایز هدف از پس‌زمینه است. در الگوریتم‌های ردیابی ویژگی‌های قابل انطباقی از اهداف باید به گونه‌ای انتخاب شوند تا بتوان اهداف را توسط هر یک از دوربین‌ها شناسایی و سپس دنبال نمود. الگوریتم‌های انتخابی و اجرایی باید به گونه‌ای عمل نمایند که علاوه بر مقاوم‌بودن نسبت به مقیاس، زاویه دید و چرخش، کارایی‌شان را نیز در برابر شرایط محیطی (نویز، تغییرات روشنایی) حفظ نمایند.

الگوریتم‌های شناسایی هدف مبتنی بر رنگ، ساده و سریع هستند که می‌توانند به صورت بلادرنگ اجرا شوند، به هیچ‌گونه حسگری به جز دوربین نیازی ندارند، وابسته به شکل هدف نیستند، قابلیت بهبود دارند، دارای بار محاسباتی کم و مستقل از چرخش و تغییر مدل هدف هستند و در چنین الگوریتمی نیاز به یادگیری هدف نیست.

بنابراین در الگوریتم مورد استفاده در این مقاله از ویژگی‌های رنگ و حرکت برای شناسایی هدف مورد نظر استفاده شده که این موضوع در شکل ۲ مشخص است. با تخصیص یک رنگ متمایز به مرکز هدف و در نظر گرفتن آستانه‌ای مشخص در فضای رنگ HSV، می‌توان هدف را از پس‌زمینه شناسایی و سپس مورد ردیابی قرار داد.

دوربین می‌تواند باعث افزایش هزینه سیستم و حجم داده مورد پردازش شود که خود از معایب این روش به‌شمار می‌رود.

بنابراین انتخاب دوربین مناسب یکی دیگر از موارد مهم در این سیستم‌ها است. دوربین انتخاب‌شده باید دارای قیمت مناسب، کیفیت رنگ و میدان دید خوبی باشد. دوربین مورد انتخاب در پیاده‌سازی انجام‌شده در این مقاله از نوع Microsoft LifeCam HD-3000 HD Webcam با سرعت فیلم‌برداری ۳۰ فریم بر ثانیه و زاویه دید ۶۰ درجه می‌باشد. آرایش دوربین‌ها در محیط باید به صورتی باشد که هدف توسط حداقل سه دوربین قابل مشاهده باشد (شکل ۲).

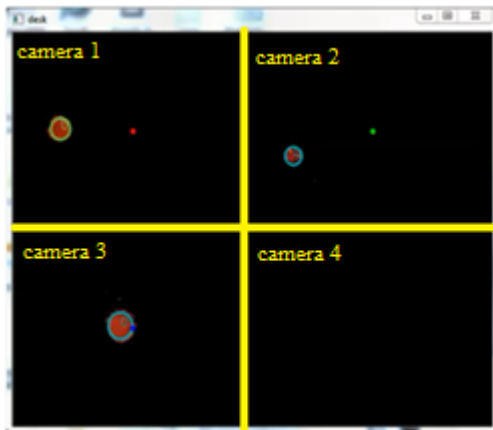
مدل دوربین شامل پارامترهای داخلی و خارجی است که عمل کالیبراسیون به منظور تخمین چنین پارامترهایی انجام می‌گیرد. در این مقاله از مدل دوربین حفره سوزنی استفاده شده است. با در نظر گرفتن مدل حفره سوزنی برای دوربین، رابطه میان مکان یک نقطه در مختصات سه بعدی فضا (P_w) و مختصات دوبعدی آن بر روی صفحه تصویر (P_f) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\lambda \begin{bmatrix} P_f \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} P_w \\ 1 \end{bmatrix} = K [R_{wc} \quad t_{wc}] \begin{bmatrix} P_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

در رابطه بالا، λ فاکتور مقیاس و M یک ماتریس تصویرسازی است. پارامترهای خارجی شامل یک ماتریس 3×3 که معرف جهت دوربین (R_{wc}) و بردار انتقال (t_{wc}) است. پارامترهای داخلی نیز شامل فاصله کانونی دوربین (f) و مرکز نوری تصویر (C_x, C_y) است. روش‌های بسیاری برای انجام عمل کالیبراسیون معرفی شده که هر کدام با توجه به دقت، سرعت، محیط تصویربرداری و نوع نیاز سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند. پارامترهای مذکور توسط نرم‌افزار Visual Studio، OpenCV و جعبه‌ابزار کالیبراسیون محاسبه شده‌اند. در مسئله کالیبراسیون، پارامترهای مذکور با استفاده از روابط بین مختصات سه بعدی فضا، دوربین و تصویر محاسبه می‌شوند.



شکل ۱: طرح کلی از الگوریتم پیشنهادی



شکل ۳: موقعیت هدف در تصویر سه دوربین توسط دایره‌هایی نشان داده شده است

سرعت و وضعیت هدف موردنظر، نیاز است دستگاه‌های مختصات مشخص شوند. در شکل ۴، چند سیستم مختصات مورد نیاز معرفی شده است. سیستم مختصات مرجع یک سیستم ثابت است که به‌عنوان مرجعی برای تعیین موقعیت سرتاسری هدف استفاده می‌شود. سیستم مختصات هر دوربین یک سیستم مختصات دکارتی در دستگاه آن دوربین و همچنین سیستم مختصات فریم که یک مختصات دوبعدی از هدف در تصویر آن دوربین بر اساس واحد پیکسل می‌باشد. برای هر دوربین، میان دستگاه مختصات مرجع و دستگاه مختصات دوربین بر اساس محل استقرار دوربین و میزان چرخش آن نسبت به دستگاه مرجع، روابط زیر برقرار است [۱۷]:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = A_{xi} \times A_{yi} \times A_{zi} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_{xi} \\ T_{yi} \\ T_{zi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_{xi} = \begin{bmatrix} \cos^{-1} \varphi_i & \sin^{-1} \varphi_i & 0 \\ -\sin^{-1} \varphi_i & \cos^{-1} \varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_{yi} = \begin{bmatrix} \cos^{-1} \theta_i & 0 & -\sin^{-1} \theta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin^{-1} \theta_i & 0 & \cos^{-1} \theta_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_{zi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^{-1} \psi_i & \sin^{-1} \psi_i \\ 0 & -\sin^{-1} \psi_i & \cos^{-1} \psi_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

الگوریتم‌هایی که مبتنی بر رنگ می‌باشند، با وجود سادگی و سرعت، هنگام عبور هدف از پس‌زمینه‌ای که حاوی رنگی از هدف موردنظر باشد، با مشکل مواجه می‌شوند. از این‌رو در الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، از ترکیب دو ویژگی رنگ و حرکت استفاده شده است. بنابراین با استفاده از اعمال فیلترینگ رنگ و حرکت، هدف موردنظر در تصویر هر دوربین شناسایی می‌شود. اگر شئی در محیط دارای رنگ موردنظر و همچنین در حال حرکت باشد، به‌عنوان هدف شناسایی شده و سپس در مراحل بعدی مورد ردیابی و تعیین موقعیت قرار می‌گیرد.

نکته حائز اهمیت آن است که اگر موقعیت هدف در زمینه تغییر نکند، در پردازش تصویر شناسایی نمی‌شود. این موضوع در صورتی که نقطه تخمین هدف در صورت عدم مشاهده در محل قبلی فرض شود، مشکلی برای سیستم ناوبری پیشنهادی ایجاد نمی‌کند. لذا، این موضوع با استفاده از روش پیاده‌سازی فیلتر کالمن مرتفع می‌شود.

۲-۳- تعیین موقعیت دوبعدی هدف در تصویر هر دوربین

در این مرحله، پردازش بر روی اطلاعات غیر هم‌زمان به‌دست آمده از دوربین‌ها انجام می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شد، دوربین‌ها بر روی پایه‌هایی نصب شده‌اند که هرکدام دارای مختصات $[T_{xi}, T_{yi}, T_{zi}]^T$ و زوایای چرخش $[\varphi_i, \theta_i, \psi_i]^T$ نسبت به دستگاه مرجع بوده و هدف در محیط در حال حرکت است. با توجه به آرایش دوربین‌ها، هدف در حال حرکت توسط حداقل سه دوربین قابل مشاهده است.

از این‌رو با استفاده از ویژگی‌های استخراج‌شده، هدف در تصویر هر دوربین شناسایی شده و موقعیت دوبعدی مرکز هدف (پیکسل میانگین مشاهده دوبعدی هدف $[P_{ix}, P_{iy}]^T$ در دستگاه دوربین هدف) تعیین می‌گردد. سپس با اعمال فیلتری مناسب که در بخش بعد توضیح داده می‌شود، موقعیت سه‌بعدی هدف به‌صورت بلادرنگ و بر اساس اطلاعات غیر هم‌زمان به‌دست‌آمده از هر دوربین در هر لحظه محاسبه می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده، موقعیت هدف در تصویر هر دوربین توسط دایره‌هایی مشخص شده که در این شکل، تنها هدف در تصویر سه دوربین نشان داده شده است. در این شکل، مختصات مرکز صفحه در تصویر هر دوربین با نقاط قرمز، سبز و آبی مشخص شده است. در مرحله بعد، موقعیت سه‌بعدی هدف به‌صورت بلادرنگ و با استفاده از مختصات مراکز به‌دست‌آمده از هدف در تصویر هر دوربین تعیین می‌شود.

۲-۴- استخراج معادله خطی مشاهده در دستگاه مرجع

قبل از بیان مؤلفه‌های معادلات ناوبری، برای تعیین موقعیت،

$$h_i = \begin{pmatrix} C_x & 0 & 0 \\ 0 & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 0 & P_{xi} \\ 0 & 0 & P_{yi} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times (A_{xi} \times A_{yi} \times A_{zi}) \quad (9)$$

که در آن Z_i را معادله مشاهده خطی شده دوربین i ام می‌نامیم. با توجه به رابطه (۸)، تطابق مشاهده هدف در دوربین i ام با مقدار تخمین زده شده در دستگاه مرجع $[X, Y, Z]^T$ منجر به صفر شدن معادله (۸) می‌شود. لذا مقدار مطلوب معادله مشاهده (۸) برای هر دوربین مقدار $Z_i = 0$ است. با استفاده از این واقعیت، می‌توان معادلات فیلتر کالمن توزیع شده را بیان نمود.

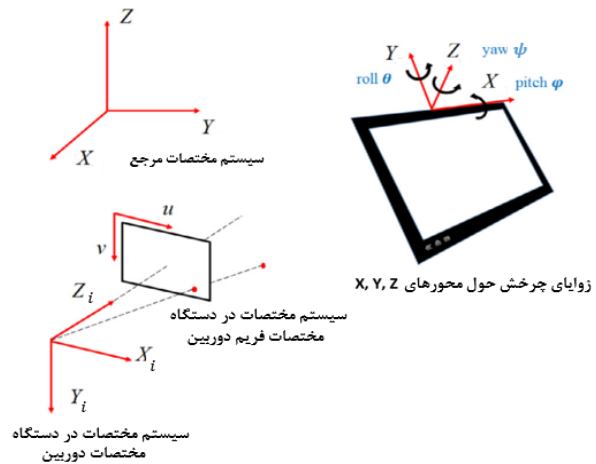
۵-۲- تلفیق اطلاعات به دست آمده از تصویر هر دوربین با استفاده از فیلتر کالمن توزیع شده

در این مرحله می‌بایست بر اساس معادله خطی مشاهده هر دوربین، موقعیت دقیق سه‌بعدی هدف استخراج شود. در این راستا چند مشکل وجود دارد که عبارت‌اند از:

- تصاویر ارسال شده از دوربین‌ها لزوماً هم‌زمان نیستند و پیاده‌سازی معادلات تخمین برای آن‌ها به صورت یکجا امکان‌پذیر نیست. هم‌زمان‌سازی تصاویر هم نیاز به یک سخت‌افزار پرهزینه دارد.
- امکان عدم مشاهده هدف در یک یا چند دوربین وجود دارد. این موضوع می‌تواند به علت ناحیه دید دوربین و یا به علت عدم حرکت معنادار هدف در زاویه دید دوربین باشد.
- تخمین هم‌زمان موقعیت هدف بر اساس مشاهده انجام شده توسط همه دوربین‌ها منجر به ایجاد مجموعه‌ای از معادلات ماتریسی (با وجود ماتریس معکوس) از مرتبه $2N \times 2N$ (تعداد دوربین‌ها) می‌شود و در نتیجه با افزایش تعداد دوربین‌ها به شدت حجم محاسبات زیاد می‌شود.

لذا در این مقاله پیشنهاد می‌شود هر دوربین به عنوان یک حس‌گر هوشمند توزیع شده مستقل، موقعیت تخمین زده شده از هدف مطلوب را به صورت مجزا با مشاهده انجام شده، مقایسه کرده و اطلاعات اصلاح خطای حاصل را به صورت جداگانه بر اساس یک فیلتر کالمن محلی محاسبه و برای سیستم سرتاسری ارسال نماید. در این حالت معادلات فیلتر کالمن توزیع شده [۲۶] به دو قسمت پیش‌بینی و تصحیح تقسیم می‌شود که برای هر دوربین به صورت مستقل در یک هسته پردازشی مجزا اجرا و نتیجه هر مرحله در یک حافظه مشترک ذخیره‌سازی می‌شود.

در مرحله پیش‌بینی بر اساس مقادیر قبلی اندازه‌گیری شده از خروجی سیستم سرتاسری، مقادیر حالت بعدی سیستم تخمین زده می‌شود. در مرحله تصحیح، از مقادیر فعلی مشاهده هدف در هر دوربین، برای اصلاح نتایج به دست آمده از مرحله پیش‌بینی استفاده



شکل ۴: معرفی سیستم‌های مختصات [۱۷]

در روابط بالا، $[x_i, y_i, z_i]^T$ معرف مختصات هدف در دستگاه مختصات دوربین i ام، $[X, Y, Z]^T$ معرف مختصات هدف در دستگاه مختصات مرجع، $[T_{xi}, T_{yi}, T_{zi}]^T$ مکان انتقال مکان دوربین i ام نسبت به دستگاه مرجع و A_{xi}, A_{yi}, A_{zi} ماتریس چرخش و زوایای θ_i, ψ_i, ϕ_i به ترتیب زوایای چرخش حول محورهای X, Y, Z هستند. رابطه میان دستگاه مختصات دوربین i ام و مختصات فریم دوبعدی مشاهده شده آن مطابق رابطه (۶) است.

$$\begin{bmatrix} P_{xi} \\ P_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_x * x_i \\ z_i \\ C_y * y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، $[P_{xi}, P_{yi}]^T$ مختصات پیکسل دوبعدی هدف در صفحه تصویر دوربین i ام است که این مختصات از الگوریتم پردازش تصویر به دست می‌آید. دو پارامتر فاصله کانونی C_x, C_y از عمل کالیبراسیون محاسبه می‌شوند [۱۷]. در رابطه فوق، سه مقدار $[x_i, y_i, z_i]^T$ نامعلوم هستند. لذا مقدار تخمین دارای رابطه غیرخطی با مقدار مشاهده است. جهت خطی‌سازی معادله مشاهده، می‌توان (۶) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{bmatrix} C_x * x_i - P_{xi} * z_i \\ C_y * y_i - P_{yi} * z_i \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

همچنین بر اساس (۲)، می‌توان (۷) را بر اساس دستگاه مرجع بیان نمود:

$$Z_i = h_i \times \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} T_{xi} \\ T_{yi} \\ T_{zi} \end{pmatrix} \quad (8)$$

در این رابطه $r_i(k_i)$ معادله خطای مشاهده دوربین i ام (که با توجه به معادله خطی شده (۹) دارای مقدار مطلوب صفر است) و $S_i(k_i)$ کوواریانس جدید وابسته، $Z_i^*(k_i)$ مشاهده خطی جدید و $h_i^*(k_i)$ نگاشت مشاهده و انتقال است. نکته حائز اهمیت آن است که با روش پیشنهادی جدید و با استفاده از وابسته نمودن ماتریس $h_i^*(k_i)$ به مقادیر مشاهده، امکان خطی نمودن تخمین سه بعدی بر اساس مشاهده دوبعدی میسر شده است.

توجه کنید که این معادله در صورتی اجرا می شود که دوربین i ام هدف را تشخیص داده باشد. لذا اگر هدف در ناحیه دید یک دوربین نباشد و یا حرکت نکند، در خروجی پردازش تصویر دوربین i ام مشاهده نشده و معادله فوق برای آن اجرا نمی شود. در بهترین شرایط، سیکل اصلی اجرای برنامه N برابر سیکل اجرای پردازش تصویر در هر دوربین است. حال اگر فرض کنیم هر دوربین توان ارسال U فریم بر ثانیه را داشته باشد و در تمامی فریم ها هدف مشاهده شود، در بهترین شرایط (در صورت پیاده سازی صحیح بر روی هسته های مختلف یک پردازنده) سیکل اجرای برنامه دارای مقداری در حدود $1/NU$ ثانیه خواهد بود و لذا سیستم پیشنهادی امکان تخمین موقعیت هدف با سرعت NU در ثانیه را خواهد داشت.

این روش پیاده سازی معادلات فیلتر کالمن این امکان را ایجاد می کند که معادلات مربوط به یک دوربین به طور اختصاصی روی یک هسته پردازشی مستقل میکروپروسور اجرا شود و این موضوع نیز سرعت محاسبات را به نوبه خود افزایش می دهد.

نکته جالب دیگر آنکه در صورت عدم حرکت شیء، معادلات هیچ یک از دوربین ها اجرا نخواهد شد و سیستم به صورت دائم آخرین مقدار مشاهده را به عنوان موقعیت تخمین زده شده محسوب خواهد کرد. به طور کلی مزایای روش پیشنهادی عبارتند از:

- ترکیب اطلاعات دوبعدی حاصل از پردازش تصویر هر دوربین و استخراج موقعیت دقیق سه بعدی
- غلبه بر مشکل عدم هم زمانی تصاویر
- عدم نیاز به مشاهده هدف در تمامی دوربین ها
- افزایش چند برابری سرعت تشخیص هدف نسبت به سرعت مشاهده یک دوربین (تا حد NU برابر).
- کاهش حجم محاسبات تخمین ماتریسی از مرتبه $2N \times 2N$ در حالت فیلتر کالمن ساده به مرتبه $4N$ در حالت فیلتر کالمن توزیع شده.
- قابلیت پیاده سازی برنامه پردازش تصویر و همچنین معادلات توزیع شده فیلتر کالمن به صورت موازی بر روی چندین هسته یک میکروپروسور بدون وجود وابستگی محاسباتی
- افزایش دقت مشاهده یا افزایش ناحیه دید با افزایش تعداد دوربین دلخواه به سیستم با افزایش بار محاسباتی معقول

می شود. باید توجه داشت که مقدار تخمین ذخیره شده توسط هر دوربین به عنوان آخرین تخمین کل سیستم در نظر گرفته شده و معادله تصحیح سایر دوربین ها بر اساس مقدار تخمین زده شده دوربین قبلی محاسبه می شود.

در این حالت معادلات تخمین موقعیت هدف در دستگاه مرجع

برای هر دوربین به صورت زیر پیاده سازی خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} x^-(k_i) \\ y^-(k_i) \\ z^-(k_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(j) \\ y(j) \\ z(j) \end{bmatrix} \quad (10)$$

که در آن $[x^-(k_i), y^-(k_i), z^-(k_i)]^T$ به مفهوم تخمین اولیه موقعیت هدف در دستگاه مرجع (در سیکل k_i اجرای برنامه، مربوط به دوربین i ام) و $[X(j), Y(j), Z(j)]^T$ به مفهوم آخرین تخمین سرتاسری محاسبه شده توسط هریک از دوربین ها در دستگاه مرجع (در سیکل سرتاسری اجرای برنامه j) است. توجه کنید که برنامه به صورت موازی برای هر دوربین اجرا می شود، مقدار (k_i) معادل سیکل اجرای اصلی برنامه (j) نیست.

معادلات تصحیح در دستگاه دوربین i ام به صورت زیر قابل بیان

خواهند بود:

$$\begin{cases} j = j + 1 \\ \begin{bmatrix} X(j) \\ Y(j) \\ Z(j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^-(k_i) \\ Y^-(k_i) \\ Z^-(k_i) \end{bmatrix} + \frac{1}{N} \times w_i(k) + R_i \\ P_i(k_i + 1) = P_i(k_i) - \frac{1}{N} \times w_i(k_i) \times s_i(k_i) \times w_i(k_i)^T + \frac{1}{N} \times Q_i \end{cases} \quad (11)$$

که در آن $[X(j), Y(j), Z(j)]^T$ تخمین مختصات تصحیح شده سرتاسری هدف، $P_i(k)$ تخمین کوواریانس پیش بینی شده برای دوربین i ام، N تعداد کل دوربین ها، R_i, Q_i ماتریس های کوواریانس مشاهده و تخمین و نهایتاً $w_i(k)$ ضریب بهینه کالمن است که در هر مرحله به صورت رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\begin{cases} r_i(k_i) = -Z_i^*(k_i) \\ S_i(k_i) = h_i(k_i) \times P_i(k_i) \times h_i(k_i)^T + R_i \\ w_i(k_i) = P_i(k_i) \times h_i(k_i)^T \times S_i(k_i)^{-1} \\ Z_i^*(k_i) = h_i^*(k_i) \times \begin{pmatrix} X(k_i) \\ Y(k_i) \\ Z(k_i) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} T_{xi} \\ T_{yi} \\ T_{zi} \end{pmatrix} \\ h_i^*(k_i) = \begin{pmatrix} C_x & 0 & 0 \\ 0 & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 0 & P_{xi}(k_i) \\ 0 & 0 & P_{yi}(k_i) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \times (A_{xi} \times A_{yi} \times A_{zi}) \end{cases} \quad (12)$$

۳- نتایج پیاده‌سازی الگوریتم

در این مقاله، تعیین موقعیت دقیق بلادرنگ یک ربات پرنده با استفاده از دوربین‌هایی کم‌هزینه و با کیفیت متوسط صورت گرفته و همچنین از هیچ‌گونه سیستم کمکی برای تعیین موقعیت سه‌بعدی هدف استفاده نشده است. محیط هدف در این پیاده‌سازی یک ناحیه ۳۰ مترمربعی (۴ متر طول، ۳ متر عرض، ۲/۵ متر ارتفاع) است که هر شیء متحرک هدف در آن با یک رنگ متمایز در مرکز نشانه‌گذاری شده است. شش دوربین ارزان‌قیمت از نوع Microsoft LifeCam HD-۳۰۰۰ HD در نواحی مختلف این محیط به‌گونه‌ای قرار گرفته‌اند که تمامی زوایای محیط موردنظر حداقل با سه دوربین قابل مشاهده باشند.

کاهش زمان اجرای الگوریتم یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در طراحی سیستم‌های ناوبری است. بنابراین به‌منظور اجرای الگوریتم به‌صورت بلادرنگ، الگوریتم معرفی شده در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزارهای Visual Studio و Opencv پیاده‌سازی و با استفاده از برنامه‌نویسی OpenMP به‌صورت موازی بر روی یک پردازنده Core I7 اجرا شده است. در نتیجه، با استفاده از یک برنامه‌نویسی موازی، موقعیت سه‌بعدی هدف به‌صورت بلادرنگ و بر اساس اطلاعات غیر هم‌زمان به‌دست‌آمده از هر دوربین در هر لحظه محاسبه می‌شود. هدف نهایی در اینجا، دستیابی به یک موقعیت دقیق و بلادرنگ از هر پرنده متحرک در این فضا با دقت حداقل ۱ سانتی‌متر و با سرعت حداقل ۵۰ نمونه در ثانیه است که این امر در سیستم موردنظر تحقق یافته است.

در جدول ۱، نتایج پیاده‌سازی مربوط به سیستم موردنظر با برخی از نتایج الگوریتم‌های سال‌های اخیر مقایسه شده است. دو محدودیت اصلی در مقاله [۱۷] وجود دارد: (۱) تنها قادر به ردیابی یک هدف می‌باشد. (۲) پوشش کاملی از محیط موردنظر صورت نمی‌گیرد زیرا تنها از دو دوربین در سیستم استفاده شده است. چنین محدودیت‌هایی در سیستم پیشنهادی در این مقاله مرتفع شده است.

همان‌گونه که از نتایج الگوریتم پیشنهادی مشخص است، شناسایی و ردیابی هدف موردنظر دارای زمان پاسخ کم و همچنین دارای دقت بالایی نسبت به دیگر سیستم‌های موجود می‌باشد. از طرفی در سیستم پیشنهادی، از هیچ‌گونه سیستم کمکی برای تعیین موقعیت سه‌بعدی هدف استفاده نشده است.

نوآوری‌های اصلی سیستم پیشنهادی حصول دقت بالا، پردازش بلادرنگ، پوشش کامل محیط با استفاده از دوربین‌هایی کم‌هزینه، مقاوم بودن در برابر خرابی یک یا چند دوربین و رفع مشکل عدم هم‌زمانی تصاویر می‌باشد. چنین مزایایی به‌صورت هم‌زمان در سیستم پیشنهادی موجود است که این امکان در برخی از سیستم‌های معرفی شده در سال‌های اخیر وجود ندارد و یا با استفاده از سیستم‌های کمکی دیگری توانسته‌اند به این نوع اهداف دست یابند. حصول دقت بالا و پردازش بلادرنگ در الگوریتم، طبق جدول ۱ کاملاً مشخص است. دقت مورد بررسی در جدول ۱ از طریق اندازه‌گیری‌های مکرر در محیط

تست به‌دست‌آمده است. در این سیستم سعی شده، با استفاده از دوربین‌هایی کم‌هزینه، پوشش کامل محیط موردنظر ایجاد گردد که این امر کاملاً مقرون‌به‌صرفه است. از طرفی، اگر در سیستم موردنظر یک یا چند دوربین دچار خرابی شوند، در صورتی که هدف توسط حداقل سه دوربین دیگر قابل مشاهده باشد، در شناسایی، ردیابی و تخمین موقعیت سه‌بعدی آن مشکلی ایجاد نخواهد شد. زیرا در الگوریتم توزیع شده، فقط کافی است که حلقه محاسباتی مربوط به آن دوربین اجرا نشود و این امر هیچ خللی در برنامه کلی ایجاد نمی‌کند. در غیر این صورت، دقت سیستم در تخمین موقعیت سه‌بعدی هدف کاهش می‌یابد.

جدول ۱: مقایسه روش موردنظر با برخی از الگوریتم‌های

معرفی شده در سال‌های اخیر

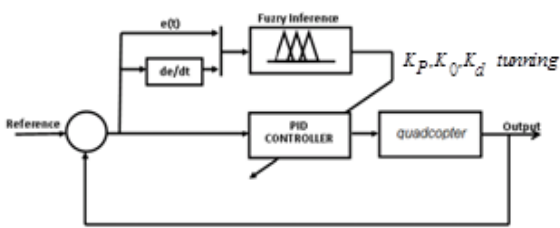
روش	دقت موقعیت‌های تعیین شده از هدف / اهداف موردنظر	متوسط زمان اجرای الگوریتم (ms)
Juan Li [۱۷]	۱۱/۵ Pixel	۹۶/۴۶
Y. J. Lee [۱۸]	-	۱۰۰
Our algorithm	۱ Cm	۳۰

جهت تصدیق عملکرد این سیستم، کنترل موقعیت یک ربات پرنده از نوع کوآدروتور توسط این سیستم انجام شده است. برای این امر، از یک پلتفرم آماده کوآدروتور استفاده شده است. مدل این ربات به‌صورت شش درجه آزادی بوده و به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲۷]:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \alpha_1 \dot{\theta} \dot{\psi} - \alpha_2 \dot{\theta} \Omega + b_1 u_2 \\ \ddot{\theta} = \alpha_3 \dot{\phi} \dot{\psi} - \alpha_4 \dot{\phi} \Omega + b_2 u_3 \\ \ddot{\psi} = \alpha_5 \dot{\theta} \dot{\psi} + b_3 u_4 \\ \ddot{x} = \frac{u_1 (c \varphi s \theta c \psi + s \varphi s \psi)}{m} \\ \ddot{y} = \frac{u_1 (c \varphi s \theta s \psi + s \varphi c \psi)}{m} \\ \ddot{z} = g - \frac{u_1 (c \varphi c \theta)}{m} \end{cases} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) θ, φ, ψ زوایای یاء، رول و پیچ، پرنده در دستگاه بدنه، x, y, z موقعیت پرنده در فضای دستگاه مرجع، α_i ضرایب ثابت پرنده، Ω سرعت عمومی ملخ‌ها، u_1 نیروی لیفت ملخ‌ها، u_2, u_3, u_4 گشتاورهای تفاضلی حول محورهای (مرجع [۲۷] را مشاهده کنید) و عبارتهای c, s مخفف توابع سینوس و کسینوس هستند.

پلتفرم مورد استفاده دارای یک سیستم تعیین وضعیت IMU و یک کنترل‌کننده داخلی SAS بوده که مقادیر مطلوب آن θ_d^A, φ_d را



شکل ۵: ساختار کنترل کننده پیشنهادی

Δe	NB	NM	Z	PM	PB
PB	m	m	m	b	b
PM	m	m	m	m	m
Z	m	s	s	s	m
NM	m	m	m	m	m
NB	b	b	m	m	m

kp

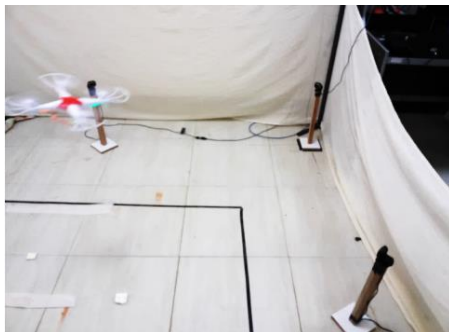
Δe	NB	NM	Z	PM	PB
PB	s	s	m	b	b
PM	s	s	m	b	b
Z	m	s	s	s	m
NM	b	b	m	s	s
NB	b	b	m	s	s

kd

Δe	NB	NM	Z	PM	PB
PB	2	2	2	2	2
PM	3	3	2	3	3
Z	5	4	3	4	5
NM	3	3	2	3	3
NB	2	2	2	2	2

alpha

شکل ۶: قوانین فازی حاکم بر کنترل کننده فازی



شکل ۷: پرواز کوآدرتور در محیط آزمایشگاه

نواحی توابع عضویت باید بر اساس ناحیه پروازی، مدل پرنده و دقت پروازی توسط یک طراح خبره تعیین شود. روش طراحی کنترل کننده مذکور جهت دستیابی به پایداری سیستم حلقه بسته خارج از موضوع این مقاله بوده و لذا از بیان جزئیات آن صرف نظر می شود.

شکل ۷ تصویری از پرواز کوآدرتور در محیط آزمایشگاه را نشان می دهد. همچنین نتایج داده های ذخیره شده از پاسخ سیستم واقعی کنترل موقعیت پرنده در شکل ۸ نشان داده شده است.

از طریق یک رادیو کنترل دریافت و فرمان های u_2, u_3, u_4 را برای پرنده تولید می کند. با توجه به سیستم کنترل سمت بر روی این پرنده، مقدار مطلوب $\psi_d = 0$ برابر صفر در نظر گرفته می شود. ورودی تراتل u_1 به صورت حلقه باز کنترل می شود. با فرض رفتار سریع دینامیک های داخلی سیستم حلقه بسته با کنترل SAS، می توان معادلات ربات مذکور به صورت رابطه زیر ساده نمود:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{u_1(c\phi s\theta c\psi)}{m} \\ \ddot{y} = \frac{u_1(s\phi c\psi)}{m} \\ \ddot{z} = g - \frac{u_1(c\phi c\theta)}{m} \end{cases} \quad (14)$$

در این رابطه ورودی های θ_d, ϕ_d, u_4 به عنوان ورودی های سیستم محسوب شده که از طریق رادیو کنترل به سیستم قابل اعمال هستند. برای اتصال رادیو کنترل به سیستم کامپیوتری هم از یک واسط میکروکنترلی و نرم افزار LabVIEW استفاده شده است.

اطلاعات موقعیت حاصل از کد پردازش تصویر از طریق اتصال شبکه بر روی Local Host برای نرم افزار LabView فرستاده شده و کنترل حلقه بسته موقعیت در این نرم افزار انجام می شود. با توجه به اینکه مدل پرنده مورد نظر دارای سه درجه آزادی، غیرخطی و تزویج شده است، طراحی کنترل کننده مطلوب برای این سیستم امری دشوار است. لذا برای کنترل کننده از یک کنترل کننده چندمتغیره فازی PID بهره برده شده است که ساختار و قوانین در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. رابطه (۱۵) نحوه محاسبه ضرایب تناسبی، مشتق و انتگرال کنترل کننده را بیان می کند.

$$\begin{cases} k_{pi} = k_{pi}^{\min} + (k_{pi}^{\max} - k_{pi}^{\min})k'_{pi} \\ k_{di} = k_{di}^{\min} + (k_{di}^{\max} - k_{di}^{\min})k'_{di} \\ k_{ii} = \frac{k_{pi}^2}{\beta k_{di}} \end{cases} \quad (15)$$

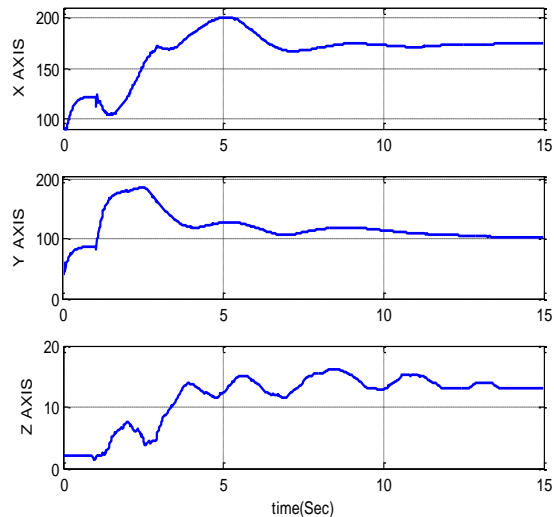
ضرایب مورد استفاده در معادله فوق بر اساس قوانین فازی ممدانی بر اساس خطا و مشتق خطا و به صورت شکل ۶ است. در این شکل، اختصارات پارامترهای $\Delta e, NB, NM, Z, PB, PM$ در زیر آورده شده است:

- derivative of error = Δe
- Negative Big = NB
- Negative Medium = NM
- Zero = Z
- Positive Big = PB
- Positive Medium = PM

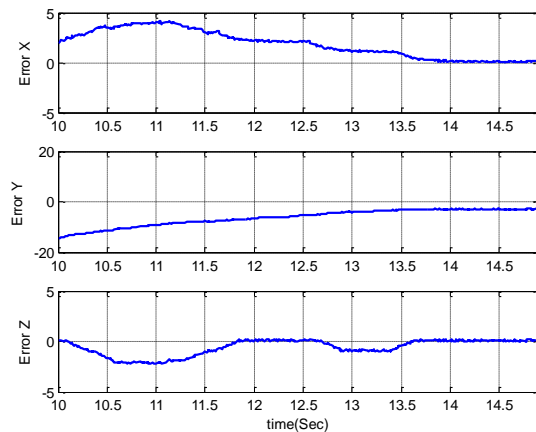
ترکیب توزیع شده اطلاعات مورد بررسی و پیاده‌سازی قرار گرفته است. به‌علت اینکه معمولاً حس‌گرهای کمک ناوبری در محیط‌های بسته قابل استفاده نیستند، روش‌های تعیین موقعیت بر اساس الگوریتم‌های پردازش تصویر می‌توانند گزینه مناسبی در این زمینه باشند. لذا بعد از شناسایی هدف به کمک ویژگی‌های استخراج شده و تعیین موقعیت دوبعدی آن در تصویر هر دوربین، با استفاده از فیلتر کالمن توزیع شده، موقعیت سه‌بعدی هدف به‌صورت بلادرنگ تعیین می‌شود. استفاده از فیلتر کالمن توزیع شده باعث شده که در این روش به هم‌زمان بودن تصاویر مشاهده هدف از طرف هر یک از دوربین‌ها نیاز نباشد. همچنین، فیلتر کالمن توزیع شده حجم پردازش را به‌شدت کاهش داده و امکان پیاده‌سازی سیستم تخمین به‌صورت توزیع شده را فراهم می‌کند. جالب‌تر آنکه در این روش، تعداد داده تخمین زده شده از هدف می‌تواند تا چندین برابر زمان نمونه‌برداری دوربین‌ها کاهش یابد. نتایج به‌دست آمده از پیاده‌سازی عملی روش پیشنهادی رسیدن به دقت در حد یک سانتی‌متر در تعیین موقعیت هدف را برای حدود حداقل ۸۰ نمونه در ثانیه تأیید می‌کند.

مراجع

- [1] P. D. Groves, "The complexity problem in future multi sensor navigation and positioning systems: A modular solution", *Journal of Navigation*, vol. 67, no. 2, pp. 311-326, 2014.
- [2] M. R. Hamrick, R. M. Ingman, inventors; At&T Intellectual Property I, LP, assignee. "GPS management system," *United States patent US 9,734,698*, 2017.
- [3] B. Zhang, Li. Zhigang, A. Perina, A. Del Bue, V. Murino and Liu. Jianzhuang, "Adaptive local movement modeling for robust object tracking," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 27, no. 7, pp. 1515-1526, 2017.
- [4] Li, Juan. "A new efficient pose estimation and tracking method for personal devices: application to interaction in smart spaces." PhD dissertation, Telecomunicacion, 2016.
- [5] وحید آزادزاده، علی محمد لطیف، «دسته‌بندی ویژگی‌های استخراج شده از پیش‌زمینه و پس‌زمینه تصویر برای ردیابی اهداف متحرک هوایی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵.
- [6] A. S. Huang, A. Bachrach, P. Henry, M. Krainin, D. Maturana, D. Fox, N. Roy, "Visual odometry and mapping for autonomous flight using an RGB-D camera," *In Robotics Research*, pp. 235-252, 2017.
- [7] J. Torres-Sospedra, A. Moreira, S. Knauth, R. Berkvens, R. Montoliu, O. Belmonte, S. Trilles, M. João Nicolau, F. Meneses, A. Costa and A. Koukofikis, "A realistic evaluation of indoor positioning systems based on Wi-Fi fingerprinting: The 2015 EvAAL-ETRI competition," *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, vol. 9, no. 2, pp. 263-279, 2017.
- [8] عقیل عبیری، محمدرضا محزون، «ردیابی اهداف متحرک هوایی با استفاده از تخمین چگالی کرنل بر اساس الگوریتم فیلتر ذره»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۴.



شکل ۸: پاسخ سیستم واقعی کنترل موقعیت پرنده



شکل ۹: خطای کنترل سیستم در دستیابی به هدف مطلوب

نقطه مطلوب برای کنترل این سیستم نقاط [۱۳، ۱۰۰، ۱۷۵] بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پرنده با دقت خوبی در موقعیت مطلوب قرار گرفته است. البته خطای موجود در محور Y ناشی از عدم توانایی کنترل‌کننده بوده است و سیستم ناوبری با دقت ۱ میلی‌متر هدف را تشخیص داده است. معمولاً این‌گونه پرنده‌ها به‌علت ناپایداری ذاتی، نیاز به تعداد حداقل ۵۰ نمونه موقعیت در ثانیه جهت یک کنترل مطلوب دارند. دقت اندازه‌گیری شده سیستم پیشنهادی توسط ابزارهای اندازه‌گیری فیزیکی در محل آزمون برابر حداقل ۱ سانتی‌متر و تعداد نمونه استحصال شده برای تست‌های مختلف بین ۷۸ الی ۱۰۵ نمونه بر ثانیه (بر اساس مشاهده دوربین‌های مختلف در نواحی مختلف) بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتمی برای تعیین موقعیت سه‌بعدی ربات‌ها با استفاده از تعدادی دوربین با کیفیت متوسط و به کمک تکنیک‌های

- fused vision and inertial data,” *Information Fusion* 33, pp. 15-28, 2017.
- [18] Y. J. Lee, and A. Yilmaz, “Real-time object detection, tracking, and 3D positioning in a multiple camera setup”, *The ISPRS Workshop on Image Sequence Analysis*, vol. 55, p. 56, 2013.
- [19] M. W. Park, I. Brilakis, “Construction worker detection in video frames for initializing vision trackers”, *Automation in Construction*, vol. 28, pp. 15 –25, 2012.
- [20] J. Yang, O. Arif, P. A. Vela, J. Teizer, Z. Shi, “Tracking multiple workers on construction sites using video cameras”, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 24, no. 4, pp. 428 –434, 2010.
- [21] J. Teizer, P. A. Vela, “Personnel tracking on construction sites using video cameras”, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 23, no. 4, pp. 452 –462, 2009.
- [22] Li, Heng, G. Chan, J. K. W. Wong and M. Skitmore, “Real-time locating systems applications in construction” *Automation in Construction*, vol. 63, pp. 37-47, 2016.
- [23] Y. Gu, A. Lo, I. Niemegeers, “A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks”, *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, 2009.
- [24] M. W. Park, C. Koch, I. Brilakis, “Three-dimensional tracking of construction resources using an on-site camera,” *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 541 –549, 2011.
- [25] M. W. Park, A. Makhmalbaf, I. Brilakis, “Comparative study of vision tracking methods for tracking of construction site resources,” *Automation in Construction*, vol. 20, no. 7, pp. 905 –915, 2011.
- [26] M. S. Mahmoud, H. M. Khalid, “Distributed Kalman filtering: a bibliographic review”, *IET Control Theory Appl.*, vol. 7, no. 4, pp. 483–501, 2013.
- [27] A. Zulu, S. John, “A review of control algorithms for autonomous quadrotors,” arXiv preprint arXiv: 1602.02622, 2016.
- [9] H. Koyuncu, S. H. Yang, “A survey of indoor positioning and object locating systems,” *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 10, no. 5, pp. 121-128, 2010.
- [10] J. L. Crassidis, “Sigma-point Kalman filtering for integrated GPS and inertial navigation,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 2, pp. 750-756, 2006.
- [11] N. Abdelkrim, N. Aouf, A. Tsourdos, B. White, “Robust nonlinear filtering for INS/GPS UAV localization,” *In Control and Automation, 2008 16th Mediterranean Conference on*, pp. 695-702, 2008.
- [12] H. Aoki, B. Schiele, A. Pentland, “Real time personal positioning system for a wearable computer,” *In Wearable Computers, 1999. Digest of Papers. The Third International Symposium on*, pp. 37-43, 1999.
- [13] A. Moemeni and E. Tatham, “Inertial-visual pose tracking using optical flow-aided particle filtering,” *in IEEE Symposium on Computational Intelligence for Multimedia, Signal and Vision Processing (CIMSIVP)*, pp. 4001-4008, 2014.
- [14] N. Sakagami and S. K. Choi, “Robust object tracking for underwater robots by integrating stereo vision, inertial and magnetic sensors,” *In Proceedings of the ISCIE international symposium on stochastic systems theory and its applications*, pp. 259-264, 2016.
- [15] K. Satoh, S. Uchiyama, H. Yamamoto, “A head tracking method using bird's-eye view camera and gyroscope,” *In Proceedings of the 3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 202-211, 2004.
- [16] P. Zhang, J. Gu, E. E. Milios, P. Huynh, “Navigation with IMU/GPS/digital compass with unscented Kalman filter,” *In IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005*, vol. 3, pp. 1497-1502, 2005.
- [17] J. Li, J. A. Besada, A. M. Bernardos, P. Tarrío, J. R. Casar, “A novel system for object pose estimation using

زیر نویس ها

¹ Ultrasonic Techniques

² Inertial Navigation System

³ Extended Kalman Filter

⁴ Pinhole

⁵ Projection Matrix

⁶ Real-Time

⁷ Stability Augmentation system

⁸ inertial measurement unit

⁹ Coupled