

طراحی، کنترل و پیاده‌سازی سامانه شبیه‌سازی تعقیب شی هدف متحرک با استفاده از پردازش تصویر

میرابوالفضل مختاری^۱، مهرداد طاهری^۲

۱ دانشیار، گروه خلبانی، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، s.abolfazl.mokhtari@aut.ac.ir

۲ کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۶

چکیده

در این مقاله مدل آزمایشگاهی جهت تعقیب شی هدف متحرک با استفاده از پردازش تصویر طراحی و ساخته شده است. امروزه پردازش تصویر به عنوان یک ابزار مهندسی در ابزارهای دیجیتال و در شبکه های کامپیوتری، برای کنترل ابزارهای صنعتی دیگر از قبیل کنترل ربات‌های پرنده به کار می رود. موبایل ربات‌ها با استفاده از پسخوراند پردازش تصویر میتوانند در زمینه تعقیب اهداف و شناسایی مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله با استفاده از پردازش تصویر خطای فاصله بین ربات زمینی و ربات پرنده محاسبه شده و به صورت پسخورد به کنترل‌کننده ربات تعقیب کننده داده شده است. مدل‌سازی دینامیکی ربات تعقیب کننده انجام شد و در ادامه با شبیه‌سازی به بررسی عملکرد سه کنترل‌کننده PID، PID-فازی و بهینه خطی پرداخته شده است. با توجه به شبیه‌سازی صورت گرفته عملکرد کنترل‌کننده PID دارای زمان پاسخ کمتری نسبت دیگر کنترل‌کننده‌ها است. در نهایت کنترل‌کننده PID بر روی ربات تعقیب کننده پیاده‌سازی شده است تا به صورت بلادرنگ شی هدف را تعقیب نماید و شی هدف از دید ربات تعقیب کننده خارج نمی‌شود.

واژگان کلیدی

سامانه پردازش تصویر، تعقیب هدف متحرک، کنترل‌کننده PID، تعقیب بلادرنگ.

۱. مقدمه

اشاره کرد که باعث افزایش کاربری آنها در زمینه‌های نظارت، جستجو و نجات، کمک های اضطراری، کسب اطلاعات و تصویربرداری از اهداف می‌شود. کوادروتورها به دلیل کوچک بودن قابلیت انجام ماموریت‌هایی را دارند که هیچ کدام از وسایل و تجهیزات موجود توانایی انجام آن را ندارند. در عملیات شهری،

ردیابی اهداف متحرک از دیرباز ذهن بشر را به خود مشغول کرده است. در سال های اخیر محققان با استفاده از بینایی ماشین در محیط های مختلف به ردیابی هدف های متحرک پرداخته‌اند [۱]. از جمله مزایای کوادروتورها می‌توان به اندازه کوچک، چابکی، شناور ماندن، هزینه تعمیر و نگهداری کم و مانورپذیری بالا آنها

کوادرتورهاها، در گروه‌های کوچک وارد عمل می‌شوند و قادر به انجام عملیات دیدبانی، شناسایی، تجسس و تعقیب در سطح شهر هستند [۲]. با پیاده‌سازی بینایی ماشین بر روی کوادکوپترها می‌توان از آنها برای انجام عملیات های خطرناک در صنایع نظامی و تعقیب اهداف استفاده کرد. از مزیت‌های پیاده‌سازی بینایی ماشین بر روی کوادکوپترها می‌توان به امکان پیدا کردن محل فرود مناسب، هدایت ربات در محیط باز، تشخیص مسیر حرکت، عبور از موانع و تعقیب اهداف متحرک اشاره کرد. این مزایا موجب می‌شود بینایی ماشین در مواد گسترده و متنوعی مانند حمل و نقل، نقشه‌برداری، نظامی و حتی سرگرمی استفاده شود [۳-۸]. کوادکوپترهای از پیش ساخته شده دارای پروتکل بسته ارتباطی با کاربر هستند. به همین منظور پژوهشگر نمی‌تواند داده‌هایی جز داده‌های از پیش تعیین شده توسط شرکت سازنده را از کوادکوپتر بگیرند. عدم دسترسی کامل به برنامه کوادکوپتر موجب افزایش هزینه پژوهش‌های بینایی ماشین می‌شود. به همین دلیل این زمینه پژوهشی در داخل کشور به صورت نظری انجام شده است و کارهای تجربی اندکی در داخل کشور انجام شده است [۹-۱۳]. تاکنون در خارج از کشور پژوهش‌های فراوانی در زمینه پیاده‌سازی بینایی ماشین بر روی کوادکوپترها مانند تشخیص محل فرود کوادکوپتر با استفاده از بینایی ماشین، حرکت در محیط باز و تعیین مسیر با توجه به موانع استفاده شده است. بخش عظیمی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه پیاده‌سازی بینایی ماشین بر روی کوادکوپترها به تعقیب اهداف متحرک در محیط باز اختصاص دارد.

ارنست و همکارانش با استفاده از پیاده‌سازی بینایی ماشین بر روی کوادکوپترها، به طراحی کنترل‌کننده‌ای با پسخورد پردازش تصویر پرداخته‌اند که کوادکوپتر را بر روی نقطه از پیش تعیین شده فرود می‌آورد. در این پژوهش محل فرود به صورت یک دایره با قطر ثابت انتخاب شده است و با استفاده از الگوریتم تشخیص الگو محل فرود تشخیص داده می‌شود [۱۴]. محمد ربا و همکاران الگوریتم های مختلف کنترل برای ردیابی هدف در حال حرکت با استفاده از بینایی ماشین ارائه دادند. جهت ردیابی هدف متحرک یک کنترل‌کننده PID-فازی برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده خطی با استفاده از موقعیت و تغییر داده های موقعیت به عنوان ورودی ایجاد شده است و برای تشخیص اینکه کدام یک عملکرد بهتری دارند، چندین آزمایش از کوادکوپتر

با توجه به سرعت متغیر هدف در حال حرکت برای ردیابی هدف در حال حرکت انجام دادند در این پژوهش از سنسور IR برای پسخوراند موقعیت ربات زمینی نسبت به ربات هوایی استفاده شده است [۱۵]. در مقاله کاریخ و کامالاکوپار به طراحی کنترل کننده پیش‌بین پرداخته‌اند که در صورتی که هدف از دید دوربین خارج شد با توجه به نوع پارامترهایی که در کنترل کننده دارند بتوانند هدف را تعقیب کنند. در این پژوهش یک طرح شبنم بر روی ربات زمینی قرار داده شده است و با استفاده از الگوریتم یافت الگو طرح شبنم ربات زمینی یافت می‌شود [۱۶]. کای و همکاران با استفاده از قانون کنترلی حاصل از انحراف زاویه نسبت به محور ارتفاع به ردیابی اهداف پرداخته است. از جمله معایب این روش کنترلی، طولانی بودن زمان لازم برای رسیدن به هدف مورد نظر و ضعیف بودن پایداری کنترل کننده می‌باشد. به همین منظور یک استراتژی برنامه ریزی مسیر را بر اساس الگوریتم بهبود یافته ستاره-ای پیشنهاد دادند و با انجام شبیه‌سازی نشان داده شد که الگوریتم پیشنهادی بهتر از الگوریتم قانون کنترلی حاصل از انحراف زاویه به هدف همگرا خواهد شد. در این پژوهش تست تجربی بر روی کوادکوپتر انجام نگرفته است. [۱۷]. مقاله وانگ و همکاران یک سیستم ردیابی و شناسایی هدف مبتنی بر پهپاد را با قابلیت های موقعیت‌یابی دقیق دوربین، پردازش سریع تصویر و همجوشی اطلاعات چند حالتی توسعه داده شده است. الگوریتم های ردیابی هدف با روش‌های مبتنی بر اجماع، پردازش زمینه و تشخیص هدف با استفاده از شبکه عصبی قابل بهینه سازی می‌باشند. از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای تهیه اطلاعات جغرافیایی، محیطی و اطلاعاتی استفاده می‌شود. نتایج تجربی عملکرد قوی چارچوب ردیابی و شناسایی هدف مبتنی بر پهپاد را نشان می‌دهد. [۱۸].

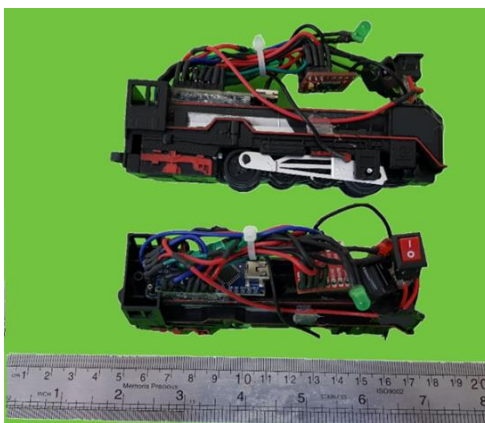
هدف از انجام این پژوهش ساخت مدل آزمایشگاهی تعقیب اهداف متحرک با استفاده از ربات تعقیب کننده طراحی شده است. استراتژی کنترل در این پژوهش مبتنی بر محدود نمودن خطای فاصله بین ربات تعقیب کننده و ربات زمینی در یک همسایگی صفر اتخاذ می‌گردد و با صفر نگه‌داشتن خطای فاصله، ربات زمینی را تعقیب می‌کند.

برتری‌های روش پیشنهادی در این مقاله نسبت به کارهای مشابه ساخت یک مدل آزمایشگاهی جهت پیاده‌سازی الگوریتم تعقیب هدف متحرک به صورت بلادرنگ است. در مدل

سرعت ربات زمینی را تعیین کرده و به ربات زمینی ارسال می‌کند. همچنین در کنترل از راه دور چهار درجه سرعتی برای شی هدف در نظر گرفته شده است که عملکرد تعقیب ربات زمینی توسط ربات تعقیب کننده را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در شکل ۲ نمای جانبی و بالایی ربات زمینی نشان داده شده است.



شکل ۱. نمایی از ربات تعقیب کننده در مدل آزمایشگاهی



شکل ۲. نمای جانبی و بالایی ربات زمینی

برای کنترل از راه دور ربات زمینی از یک کنترل کننده با ارتباط بلوتوث استفاده شده است. در این کنترل کننده از دو دکمه فشاری برای تنظیم سرعت ربات زمینی و جوی استیک برای تعیین جهت حرکت شی هدف استفاده شده است. در ساخت کنترل از راه دور از برد بلوتوث به همراه برد توسعه یافته آردوینو استفاده شده است که توسط باتری لیتیوم پلیمر ۷/۴ ولتی تغذیه می‌شود. در شکل ۳ تصویر کنترل کننده ربات زمینی و بخش داخلی آن نشان داده شده است.

آزمایشگاهی از لحاظ سخت افزاری و مدل دینامیکی ساده‌سازی جهت تعقیب هدف صورت گرفته است که در پژوهش‌های مشابه صورت نگرفته است. از دیگر مزایای این مدل آزمایشگاهی ساخته شده می‌توان به دریافت پسخوراند تصویر و ایجاد تعامل بین کاربر و مدل آزمایشگاهی اشاره نمود. علاوه بر این در پژوهش حاضر، با بررسی نظامند مدل دینامیکی ربات تعقیب کننده به بررسی عملکرد سه کنترل کننده PID، PID-فازی و پهنه خطی پرداخته شده است. این بررسی‌ها با استفاده از مدل دینامیکی یک ربات یک درجه آزادی که با استفاده از موتور سروو کنترل می‌شود، انجام می‌پذیرد.

به این ترتیب در ادامه مقاله، بخش ۲ به طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی تعقیب هدف متحرک، و بخش ۳ به طراحی کنترل کننده برای ربات تعقیب کننده پرداخته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌های کنترل کننده‌های طراحی شده و مقایسه عملکردی آنها در بخش ۴ ارائه می‌شود و در بخش ۵ صحت عملکرد کنترل کننده پیشنهادی با استفاده از تست تجربی اعتبارسنجی می‌شود. بخش ۶ به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پژوهش اختصاص داده شده است.

۲. طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی تعقیب هدف متحرک

۲-۱. طراحی و ساخت ربات تعقیب کننده

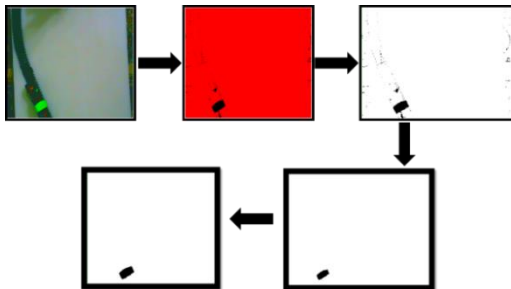
در مدل آزمایشگاهی از ربات تعقیب کننده به عنوان جایگزین کوادکوپتر استفاده شده است. تصاویر مسیر حرکت و موقعیت ربات زمینی توسط دوربین تعبیه شده بر روی ربات تعقیب کننده به رایانه منتقل می‌شود. با انجام پردازش بر روی تصاویر دریافتی موقعیت ربات زمینی بدست آمده و به صورت پسخورد وارد کنترل کننده ربات تعقیب کننده می‌شود. با استفاده از کنترل کننده ربات تعقیب کننده، حرکت کابین به صورتی تنظیم می‌شود که ربات زمینی از دید دوربین خارج نشود. در شکل ۱ نمایی از ربات تعقیب کننده نشان داده شده است.

۲-۲. طراحی و ساخت ربات زمینی

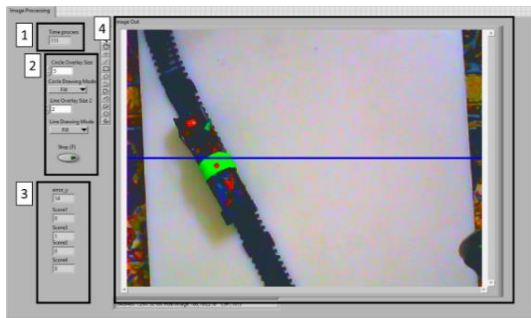
ربات زمینی به عنوان هدف متحرک در مدل آزمایشگاهی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از کنترل کننده بی‌سیم دستورات برای ربات زمینی ارسال می‌شود. کنترل از راه دور جهت حرکت و

۲-۳. پردازش تصویر

در این پژوهش از بینایی ماشین به عنوان پسخورد ربات تعقیب کننده استفاده شده است. تصاویر با استفاده از دوربین روی ربات تعقیب کننده به رایانه منتقل می‌شود و با انجام پردازش‌های لازم موقعیت ربات زمینی را محاسبه می‌کند. نور محیط تأثیرگذارترین عامل در بینایی ماشین می‌باشد. برای حذف تأثیرات مخرب تغییر نور محیط از فیلترهای متعددی استفاده شده تا تصویر نهایی برای تشخیص ربات زمینی به اندازه کافی مقاوم باشد.

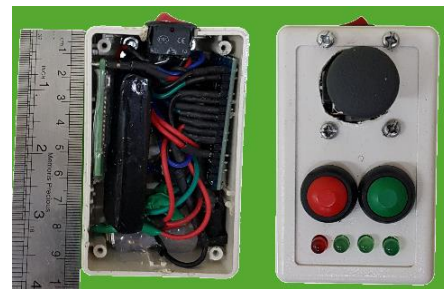


شکل ۴. روند فیلتر تصاویر دریافتی از ربات تعقیب کننده



شکل ۵. تصویر از محیط کاربری طراحی شده برای پردازش تصویر

محیط کاربری که در شکل ۵ نشان داده شده است دارای ۴ بخش است. بخش اول زمان چرخش هر حلقه کنترلی است که بر حسب میلی‌ثانیه می‌باشد. بخش دوم برای تنظیم ابعاد خط و نقطه هدف است. بخش سوم مقدار خطا و امتیاز تشخیص الگوریتم‌های موازی تشخیص هدف نشان داده شده است. در بخش چهارم تصویر دریافتی از ربات هوایی به همراه خط و نقطه هدف نشان داده می‌شود. در سیستمی با مشخصات، جدول ۱، مدت زمان پردازش هر حلقه کنترلی ۱۱۱ میلی‌ثانیه می‌باشد. تصویر از طریق وبکم و رابط سریال RS232 به رایانه ارسال می‌شود و در برنامه لیبویو مورد پردازش قرار می‌گیرد و مرکز هدف بدست می‌آید. در ادامه خطا محاسبه و وارد حلقه کنترلی می‌شود و مقدار جابجایی ربات هوایی محاسبه می‌شود و از طریق رابط RS232 به پردازنده ربات هوایی ارسال می‌شود. مدت هر حلقه کنترلی که شامل تشخیص و تعقیب هدف است در حدود ۸۰ میلی‌ثانیه است. با توجه به سرعت بالای الگوریتم تشخیص و تعقیب هدف میتوان ادعان داشت که این الگوریتم خاصیت بالادرنگی دارد.



شکل ۳. نمای بیرونی و نمای داخلی کنترل کننده بی سیم ربات زمینی

با استفاده از فیلترهای رنگی تصاویر دریافتی از دوربین ربات تعقیب کننده را بهبود بخشیده تا ربات زمینی سریعتر قابل تشخیص شود. اولین فیلتر اپراتور ضرب رنگی می‌باشد. در اپراتور رنگی از رنگ قرمز به عنوان رنگ پایه استفاده می‌شود. به صورتی که رنگ قرمز به صورت ضرب داخلی در پیکسل‌های عکس ضرب می‌شود. تصویر بدست آمده دارای دو ناحیه رنگی قرمز، خالص و مشکی می‌باشد. با استفاده از فیلتر استخراج رنگ قرمز، تصاویر دریافتی از حالت رنگی به سیاه-سفید تبدیل می‌شود. تصویر بدست آمده دارای نقاط کوچک پراکنده در تصویر است که می‌تواند حجم محاسبات برای پیدا کردن هدف را بالا ببرد. با استفاده از فیلتر مورفی نقاط ریز را از تصویر حذف می‌شوند. در انتها با اعمال عکس الگوریتم حذف نقاط زائد، نقاط باقیمانده به سائز واقعی خودشان بازگردانده می‌شوند. در شکل ۴ روند فیلتر تصویر دریافتی از ربات تعقیب کننده نشان داده شده است.

با تکمیل روند فیلترهای رنگی و دست یافتن به نتیجه نهایی می‌توان از الگوریتم‌های الگو و شکل هندسی برای پیدا کردن موقعیت ربات زمینی استفاده کرد. با بدست آوردن تصویر فیلتر شده می‌توان از روش تشخیص الگو و روش هندسی موقعیت ربات زمینی را پیدا کرد. برای افزایش اطمینان از صحت عملکرد الگوریتم پردازش از ۲ الگوریتم با دو روش متفاوت استفاده

۳. طراحی کنترل کننده

در معادله ۱ مدل دینامیکی ربات تعقیب کننده در فضای حالت ارائه شده است. مدل دینامیکی ربات تعقیب کننده خطی می باشد و ماتریس حالت، ماتریس ورودی و ماتریس خروجی به ترتیب در معادلات ۱ تا ۴ ارائه شده است.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{2c_{bearing}}{M_{cabin}} x_2 + \frac{u}{rM_{cabin}} \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2c_{bearing}}{M_{cabin}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ rM_{cabin} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C = [1 \quad 0] \quad (4)$$

در معادلات فضای حالت $c_{bearing}$ ضریب اصطکاک بلبرینگ های خطی، M_{cabin} جرم کابین ربات تعقیب کننده و r شعاع پولی موتور الکتریکی می باشد.

در جدول ۲ مقدار متغیرهای لازم برای مدل سازی دینامیکی ربات هوایی ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات سیستم پردازشی.

مشخصات	قطعه
Intel® Pentium® Processor G2030, 3M Cache, 3.00 GHz	پردازنده اصلی
Zotac GT610 2GB	پردازنده گرافیکی
4GB 1444MHz	رم
Windows 10 64x	سیستم عامل

جدول ۲. مقادیر متغیرهای مدل دینامیکی.

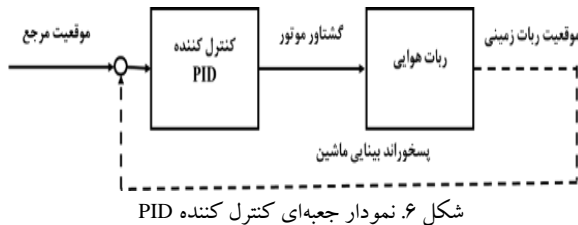
متغیر	واحد	مقادیر
M_{cabin}	کیلوگرم	۰/۵
$C_{bearing}$	-	۰/۱
r	میلی متر	۰/۰۰۶

با داشتن مدل دینامیکی ربات تعقیب کننده به طراحی کنترل کننده پرداخته می شود. هدف از طراحی کنترل کننده این است که ربات تعقیب کننده به سمت ربات زمینی حرکت کند. استراتژی کنترل موقعیت در این پژوهش صفر نمودن فاصله بین خط وسط دوربین و ربات زمینی می باشد. با اینکار ربات تعقیب کننده با به روز نمودن متوالی فاصله خود با ربات زمینی می تواند ربات زمینی را تعقیب نماید. برای این امر از سه کنترل کننده PID، PID-فازی و بهینه خطی استفاده می شود.

۳-۱. کنترل کننده PID

در کنترل کننده PID پسخورد حلقه بسته که اختلاف بین مقدار اولیه تعیین شده و مقدار بدست آمده از حلقه به عنوان ورودی کنترل کننده PID می باشد.

$$C = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (5)$$



روشهای متعددی برای حساب کردن ضرایب هر بخش وجود دارد. قواعد زیگلر - نیکولس یکی از قواعد معمول برای بدست آوردن ضرایب کنترل کننده PID می باشد. به دلیل اینکه سیستم ربات تعقیب کننده شرایط زیگلر-نیکولس را دارا نمی باشد، ضرایب کنترل کننده را با استفاده از روش سعی و خطا تعیین می گردد. در روش سعی خطا ابتدا با افزایش بهره تناسبی زمان رسیدن به هدف را کاهش داده و سپس با استفاده از ضرایب مشتقی و انتگرالی نوسانات و خطای ماندگار را کاهش داده تا بتوان خطای ماندگار و نوسانات را در محدوده ۱۰ پیکسل حفظ کرد.

۳-۲. کنترل کننده PID-فازی

از بین بسیاری از کاربردهای مجموعه ها و منطق فازی، شاید کنترل PID-فازی معمولترین آنها باشد. از قوانین فازی به صورت برخط استفاده می شود تا پارامترهای کنترل کننده براساس سیگنال خطا و اختلاف خطا تعیین شود [۱۹]. رابطه ورودی خروجی کنترل کننده PID در حوزه زمان به صورت زیر قابل نوشتن است.

$$G(s) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \dot{e}(t) \right] \quad (6)$$

که در رابطه فوق $T_i = \frac{K_p}{K_i}$ و $T_d = \frac{K_d}{K_p}$ که به عنوان ثابت زمانی انتگرالی و مشتق گیر شناخته می شوند. موفقیت این نوع کنترل کننده شدید وابسته به انتخاب مناسب و بهینه بهره های کنترل کننده می باشد که در عالم واقع راه حل مشخص و ساده ای برای آن وجود ندارد. در عمل بهره های کنترل کننده توسط افراد متخصص بر اساس قوانین سر انگشتی و تجربی تنظیم می شوند. برای اتوماتیک کردن این فرایند می توان از تئوری

جدول ۳. قانون فازی برای متغیر K_p' [۱۹]

		ΔE						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	B	S	S	S
	PS	S	S	B	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

جدول ۴. قانون فازی برای متغیر K_d' [۱۹]

		ΔE						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	B	B	S	S	S	B	B
	NS	B	B	B	S	B	B	B
	ZO	B	B	B	B	B	B	B
	PS	B	B	B	S	B	B	B
	PM	B	B	S	S	S	B	B
	PB	S	S	S	S	S	S	S

جدول ۵. قانون فازی برای متغیر α [۱۹]

		ΔE						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
	NM	۳	۳	۲	۲	۲	۳	۳
	NS	۴	۳	۳	۲	۳	۳	۴
	ZO	۵	۴	۳	۳	۳	۴	۵
	PS	۴	۳	۳	۲	۳	۳	۴
	PM	۳	۳	۲	۲	۲	۳	۳
	PB	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

جدول ۶. مقادیر بهره‌های کنترلی [۱۹]

مقادیر	ضرایب کنترل کننده
۰/۱۲۵	K_{dmax}
۰/۰۰۱	K_{dmin}
۰	α_{min}
۱	α_{max}
۰/۲۵	K_{pmax}
۰/۰۰۱	K_{pmin}

۳-۳. کنترل کننده بهینه خطی

کنترل کننده LQI یک کنترل کننده پس‌خورده حالت و یک کنترل کننده انتگرالگیر می‌باشد. خروجی سیستم و ورودی مرجع با یکدیگر مقایسه شده و وارد یک کنترل کننده انتگرالی می‌شود و مقدار خروجی کنترل کننده انتگرالی و پس‌خورده حالت وارد یک سیستم LQR می‌شود و خروجی کنترل کننده LQR به سیستم اعمال می‌شود. نمودار کنترل کننده LQI در شکل ۸ نشان داده شده است.

فازی بهره جست. در تنظیم ضرایب PID از تئوری فازی استفاده شده است. این کنترل کننده را می‌توان به صورت یک سیستم دو سطحی به صورت شکل ۷ در نظر گرفت که در آن کنترل کننده اصلی PID می‌باشد که ضرایب آن توسط لایه اول (فازی) تعیین می‌شود.

سیستم فازی از مجموعه‌ای از قوانین شرطی تشکیل شده است که در هر مد کاری بهره‌های بهینه کنترل کننده PID را تعیین می‌کند. فرض کنید که محدوده تغییرات بهره تناسبی، مشتق‌گیر و انتگرالی کنترل کننده به ترتیب در بازه $[K_{pmin}, K_{pmax}]$ و $[K_{dmin}, K_{dmax}]$ قرار داشته باشند. برای سادگی مقادیر بهره با استفاده از محدوده بهره تعریف شده و مطابق روابط زیر نرمالیزه می‌شوند.

$$K_p' = \frac{K_p - K_{pmin}}{K_{pmax} - K_{pmin}} \quad (7)$$

$$K_d' = \frac{K_d - K_{dmin}}{K_{dmax} - K_{dmin}} \quad (8)$$

فرض کنید که ثابت زمانی انتگرالی رابطه تناسبی مستقیمی با ثابت زمانی مشتق‌گیر به صورت زیر داشته باشد،

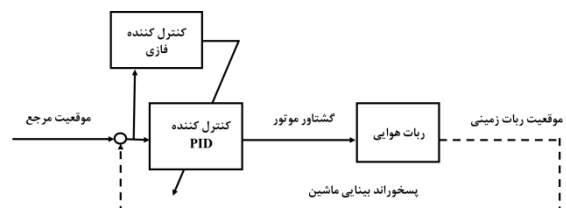
$$T_i = \alpha T_d \quad (9)$$

با استفاده از این رابطه می‌توان نوشت:

$$K_i = \frac{K_p}{\alpha T_d} = \frac{K_p^2}{\alpha K_d} \quad (10)$$

به عبارت دیگر می‌توان پارامترهای تنظیمی کنترل کننده را α ، K_p' و K_d' در نظر گرفت. اگر این پارامترها تعیین گردند با استفاده از دو رابطه فوق می‌توان بهره‌های کنترل کننده را تعیین نمود. حال فرض کنید که ورودی‌های کنترل کننده شامل خطا و مشتق خطای ردیابی باشند. برای خطا و مشتق خطا هر کدام ۷ حالت در نظر گرفته شده است که نتیجه آن ۴۹ قانون فازی برای کنترل کننده می‌باشد.

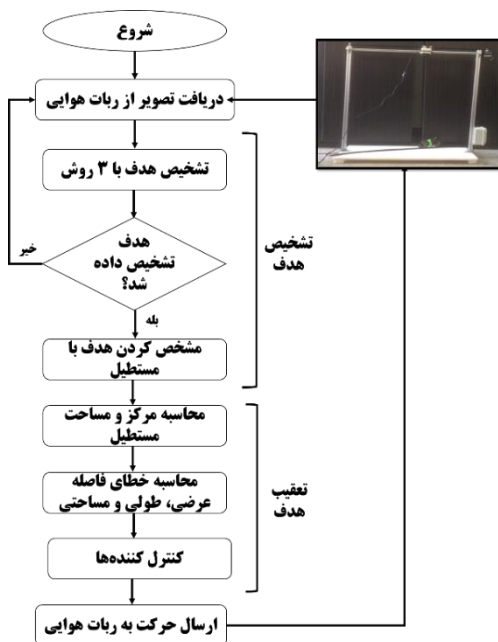
قانون فازی برای هر یک از ۳ پارامتر معرفی شده به صورت جدول ۳ تا جدول ۶ نوشته می‌شود.



شکل ۷. نمودار سیستم کنترل PID-فازی ضرایب کنترل کننده PID

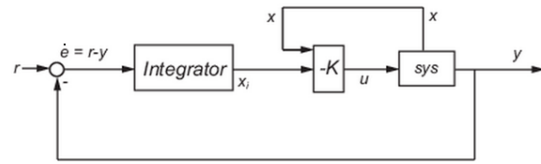
۴. شبیه‌سازی

صحت عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی شده برای ربات تعقیب کننده، با شبیه‌سازی سیستم در نرم افزار متلب نشان داده می‌شود. در شکل ۶، شکل ۷ و شکل ۸ دیاگرام جعبه‌ای سیستم کنترلی و نحوه‌ی ارتباط اجزای سه کنترل‌کننده طراحی شده و سیستم نشان داده شده است. همچنین در شکل ۹ بلوک دیاگرام کلی سیستم نشان داده شده است. چهار معیار برای مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌ها تعریف می‌شود. این معیارها، متغیرهای لازم برای کنترل، زمان رسیدن، زمان رسیدن به کمتر از ۱۰ درصد مقدار نهایی و شاخص تلاش کنترلی ind می‌باشند.



شکل ۹. بلوک دیاگرام تعقیب هدف متحرک.

خطای فاصله یعنی e که با استفاده از پس‌خورده بینایی ماشین و خط وسط حاصل می‌شود به عنوان ورودی به کنترل‌کننده‌های طراحی شده خورنده می‌شود و کنترل‌کننده موقعیت خطای فاصله دم را برای تعقیب ربات زمینی به سمت صفر تنظیم می‌نماید. برای مقایسه عملکرد سه کنترل‌کننده پیشنهادی در این پژوهش نتایج شبیه‌سازی‌های این سه کنترل‌کننده در کنار یکدیگر در شکل ۱۰ تا شکل ۱۳ مقایسه شده است. در شکل ۱۰ جواب سیستم به ازای پله واحد در سه کنترل‌کننده نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با استفاده از کنترل طراحی شده بر اساس روش فازی بسیار سریع به موقعیت مرجع می‌رسد و خطای فاصله صفر می‌شود در حالی که کنترل‌کننده بهینه خطی و PID



شکل ۸. نمودار کنترل‌کننده LQI

برای استفاده از کنترل‌کننده LQI باید معادلات جدید سیستم استخراج شود و سپس بر روی معادلات جدید حالت کنترل بهینه خطی اعمال شود. خطا بین خروجی و ورودی مرجع $\dot{e}(t)$ در نظر گرفته شود، می‌توان نوشت،

$$\dot{e}(t) = r - y \quad (11)$$

با توجه به استفاده از کنترل‌کننده پس‌خورده حالت می‌توان

تلاش کنترلی را به صورت زیر نشان داد،

$$u(t) = -kz = -[k_1 \quad k_2] \begin{bmatrix} x \\ e_i \end{bmatrix} = -k_1x - k_2e_i \quad (12)$$

با قرار جایگذاری معادله ۱۳ در معادله فضای حالت سیستم

می‌توان معادله زیر را نتیجه گرفت،

$$\dot{x} = Ax + B(-k_1x - k_2e_i) = (A - Bk_1)x - Bk_2e_i \quad (13)$$

$$\dot{e}(t) = r - Cx - Du = r - Cx - D(-k_1x - k_2e_i) = (Dk_1 - C)x + Dk_2e_i + r \quad (14)$$

$$y(t) = Cx + Du = Cx + D(-k_1x - k_2e_i) = (-Dk_1 + C)x - Dk_2e_i \quad (15)$$

معادلات ۱۴ تا ۱۶ معادلات حالت جدید سیستم هستند که

ماتریس حالت، ورودی، خروجی و انتقال مستقیم به صورت زیر می‌شود.

$$\begin{cases} \dot{\begin{bmatrix} x \\ e_i \end{bmatrix}} = A' \begin{bmatrix} x \\ e_i \end{bmatrix} + B'r \\ y = C' \begin{bmatrix} x \\ e_i \end{bmatrix} + D'r \end{cases} \quad (16)$$

$$A' = \begin{bmatrix} A - Bk_1 & -Bk_2 \\ Dk_1 - C & Dk_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$B' = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$C' = [-Dk_1 + C \quad -Dk_2e_i] \quad (19)$$

$$D' = 0 \quad (20)$$

با داشتن معادلات جدید سیستم ضریب بهینه برای فیدبک

حالت محاسبه می‌شود. برای انجام شبیه‌سازی کنترل بهینه خطی

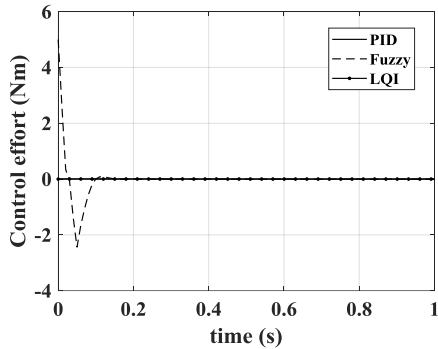
نیاز به دو ماتریس معادلات ۲۲ و ۲۳ می‌باشد. با داشتن ماتریس‌ها

و ضرایب سیستم می‌توان عملکرد سیستم با کنترل‌کننده بهینه

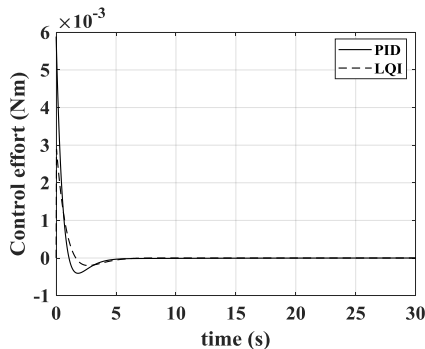
خطی را شبیه‌سازی کرد.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$



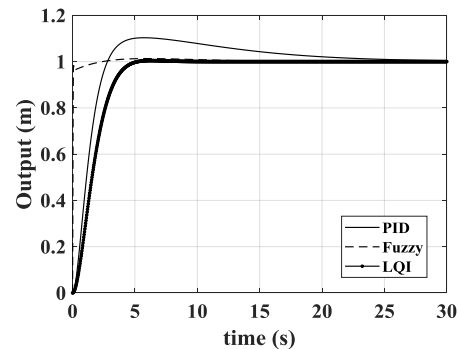
شکل ۱۲. تلاش کنترلی سه کنترل کننده طراحی شده نسب به زمان به ازای ورودی پله



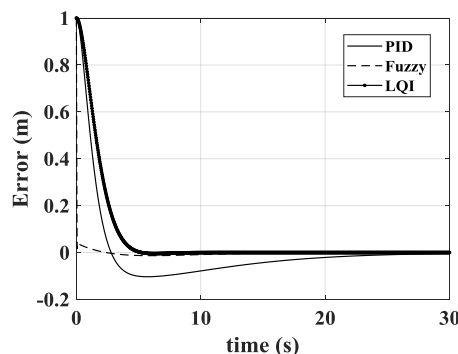
شکل ۱۳. تلاش کنترلی دو کنترل کننده طراحی شده نسب به زمان به ازای ورودی پله

از مزیت‌های کنترل کننده PID-فازی و PID می‌توان به بی‌نیازی آنها به متغیر حالت اشاره نمود. کنترل کننده بهینه خطی با وجود عملکرد بهتر نسبت به دو کنترل کننده طراحی شده در این پژوهش نیازمند در دست داشتن متغیر حالت است. چهار معیار در نظر گرفته شده برای مقایسه نتایج یعنی، متغیرهای لازم برای کنترل، زمان رسیدن، زمان رسیدن به کمتر از ۱۰ درصد مقدار نهایی و شاخص تلاش کنترلی ind در جدول ۷ گزارش شده‌اند. با دقت در اطلاعات ارائه شده در این جدول کنترل کننده PID در این پژوهش ساختار ساده‌تری داشته و دارای زمان کمتری برای رسیدن به مقدار خطای زیر ۱۰ درصد می‌باشد. اگرچه کنترل کننده PID-فازی زمان رسیدن کمتری دارد ولی به دلیل تلاش کنترلی بیش از حد تاثیر نامطلوبی بر ربات تعقیب کننده خواهد داشت. کنترل کننده بهینه خطی با تلاش کنترلی و زمان رسیدن بهینه عملکرد مطلوبی دارد و به دلیل نیاز به متغیرهای حالت ساختار پیچیده‌تری نسبت به دو کنترل کننده دیگر دارد.

با ۵ ثانیه و ۲۵ ثانیه اختلاف خطا به صفر می‌رسند. خطای فاصله در شکل ۱۱ بر حسب زمان نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که کنترل کننده PID-فازی طراحی شده سریعتر از دو کنترل کننده دیگر، ربات را در ۲ ثانیه به موقعیت هدف هدایت می‌نماید. در حالی که این کار برای کنترل کننده بهینه خطی ۵ ثانیه و ۲۵ ثانیه زمان می‌برد. علت این امر تلاش کنترلی بیش از حد کنترل کننده PID-فازی نسبت به دو کنترل کننده دیگر است. با دقت در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ ملاحظه می‌گردد تلاش کنترلی کنترل کننده PID-فازی در بالاترین حد ممکن است که این امر نامطلوب عملکرد ربات تعقیب کننده را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در مقابل در کنترل کننده بهینه خطی و PID به رغم سادگی بسیار بهتر عمل نموده و تلاش کنترلی آنها در جدول ۷ نشان داده شده است. جهت مقایسه کمی تلاش کنترلی کنترل کننده‌ها نیز، از انتگرال قدر مطلق تلاش کنترلی یعنی $ind = \frac{1}{T} \int_0^T |T| dt$ به عنوان معیار مقایسه استفاده شده و مقادیر عددی آن برای کنترل کننده‌های PID، PID-فازی و بهینه خطی در جدول ۷ گزارش شده‌اند.

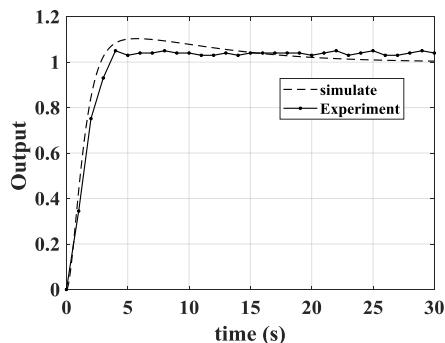


شکل ۱۰. پاسخ پله سه کنترل کننده طراحی شده نسبت به زمان به ازای ورودی پله



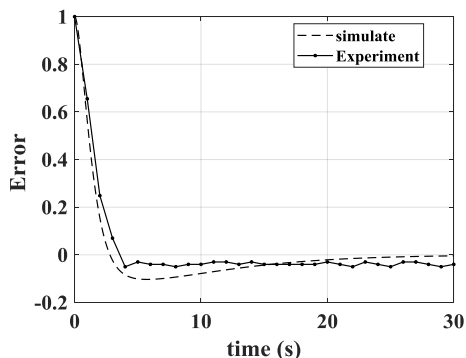
شکل ۱۱. خطای فاصله سه کنترل کننده طراحی شده نسب به زمان به ازای ورودی پله

است. مشاهده می‌گردد که اختلاف خطای تست تجربی و شبیه‌سازی کمتر از ۱۰٪ می‌باشد.

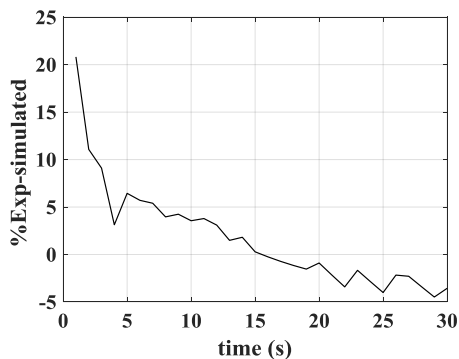


شکل ۱۴. پاسخ پله کنترل‌کننده PID و تست تجربی نسبت به زمان

هر دور اجرای حلقه کنترلی ۱۰۰ میلی‌ثانیه زمان می‌برد. ۵۰ میلی‌ثانیه پردازش تصویر، ۱۰ میلی‌ثانیه کنترل‌کننده PID، ۵۰ میلی‌ثانیه انتقال داده از طریق سریال به برد آردوینو و حرکت ربات تعقیب کننده می‌باشد.



شکل ۱۵. خطای فاصله کنترل‌کننده PID و تست تجربی نسبت به ورودی مرجع بر حسب زمان



شکل ۱۶. درصد اختلاف خطای فاصله بین شبیه‌سازی و تست تجربی کنترل‌کننده PID نسبت به زمان

جدول ۷. مقایسه‌ی نتایج پژوهش حاضر به ازای سه کنترل‌کننده طراحی شده

کنترل‌کننده طراحی شده			موارد مقایسه‌ای
LQI	فازی	PID	
Y_r, Y_{goal}, \dot{Y}_r	Y_r, Y_{goal}	Y_r, Y_{goal}	متغیرهای لازم برای کنترل
۵	۲	۲۵	زمان رسیدن به هدف
۳/۳۳	۰/۰۶	۲/۲۲	زمان رسیدن به خطای ۱۰٪ تلاش کنترلی
$۶/۱۲e-۵$	$۲/۸e-۳$	$۷/۱۹e-۵$	$\left(ind = \frac{1}{T} \int_0^T T dt \right)$

۵. اعتبارسنجی

هدف اصلی از طراحی کنترل موقعیت نه رسیدن به یک نقطه‌ی هدف و توقف در آن، بلکه پیمودن پی در پی اهداف پشت سر هم و تولید مسیر به روش نقطه به نقطه است. برای این منظور، مسیر موردنظر به صورت رشته‌ای با ترتیب از نقاط هدف شکسته می‌شود و به روز نمودن نقطه‌ی هدف پس از رسیدن ربات به همسایگی نقطه‌ی هدف قبلی موجب می‌شود که ربات مسیر مورد نظر را تعقیب نماید. با توجه به هدف اصلی که در طراحی کنترل‌کننده موقعیت ربات تعقیب کننده وجود دارد، کنترل‌کننده PID به مراتب عملکرد بهتری نسبت به کنترل‌کننده بهینه خطی طراحی شده دارد. دلیل برتری کنترل‌کننده PID زمان کمتر برای رسیدن به محدوده خطای ۱۰ درصد و سادگی در ساختار می‌باشد. تلاش کنترلی کمتر کنترل‌کننده PID نسبت به تلاش کنترلی کنترل‌کننده فازی دلیل برتری کنترل‌کننده PID دانست.

با انجام تست تجربی صحت عملکردی کنترل‌کننده PID طراحی شده مورد ارزیابی قرار داده می‌شود. برای بررسی صحت عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی در این پژوهش نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده PID و تست تجربی در شکل ۱۴ تا شکل ۱۶ مقایسه شده است. در شکل ۱۴ پاسخ پله سیستم در کنترل‌کننده PID و تست تجربی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با استفاده از کنترل‌کننده طراحی شده بر اساس روش PID ربات تعقیب کننده به موقعیت مرجع می‌رسد و خطا فاصله صفر می‌شود. خطای فاصله شبیه‌سازی و تست تجربی برای کنترل‌کننده PID نسبت به ورودی مرجع در شکل ۱۵ بر حسب زمان نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که تست تجربی کنترل‌کننده PID نسبت به ورودی مرجع دارای خطای حدود ۵٪ می‌باشد. در شکل ۱۶ خطای شبیه‌سازی نسبت به تست تجربی نشان داده شده

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با ساخت مدل آزمایشگاهی، تعقیب هدف متحرک با استفاده از کوادکوپتر مورد ارزیابی قرار گرفت. در ساخت مدل آزمایشگاهی از دو ربات تعقیب کننده بعنوان کوادکوپتر و ربات زمینی بعنوان هدف متحرک استفاده شد. در ربات تعقیب کننده از قابلیت بینایی ماشین برای گرفتن پس‌خورد از ربات زمینی استفاده شد به صورتی که تصاویر دریافتی به رایانه منتقل شده و پردازش روی آنها صورت داده می‌شود. خروجی پردازش تصاویر موقعیت ربات زمینی است که به کنترل کننده جهت کنترل ربات تعقیب کننده داده می‌شود. گشتاور موتور الکتریکی به عنوان تنها ورودی موثر در موقعیت کابین، که به نوعی در بردارنده‌ی مفهوم کنترل موقعیت است، معرفی گردید. همچنین برای ربات زمینی از کنترل از راه دور جهت حرکت دادن ربات زمینی استفاده شد.

در ادامه یک کنترل کننده ی موقعیت برای تعقیب به روش نقطه به نقطه طراحی گردید. استراتژی کنترل موقعیت پیمودن پی در پی اهداف پشت سر هم و تعقیب به روش نقطه به نقطه است. با استفاده از مدل دینامیکی ربات تعقیب کننده سه کنترل کننده شبیه‌سازی انجام شده و با استفاده از ۴ معیار مشخص شده برای مقایسه کنترل کننده‌ها، PID برای پیاده‌سازی بر روی مدل آزمایشگاهی انتخاب شده است. کارایی کنترل کننده پیشنهادی در این پژوهش نسبت به دو کنترل کننده PID-فازی و بهینه خطی

۸. مأخذ

با انجام شبیه سازی های مقایسه ای نشان داده شد. از کارایی‌های این کنترل کننده می توان به بی نیازی آن از متغیرهای حالت سیستم اشاره نمود که دشواری های دریافت پس‌خورد سرعت با طراحی مشاهده گر حالت مورد بررسی را منتفی می نماید. زیرا در کنترل کننده PID کفایت خطای فاصله بین دو حلقه کنترلی متوالی را حساب کرد و با مقادیر آنها خروجی کنترلی را تعیین نمود. ساختار ساده‌تر نسبت به کنترل بهینه خطی و صرف تلاش کنترلی کمتر در مقایسه با کنترل PID-فازی از دیگر کارایی‌های قابل ذکر کنترل کننده موقعیت پیشنهادی در این پژوهش است. در نهایت با استفاده مدل آزمایشگاهی ساخته شده، صحت عملکرد کنترل کننده طراحی شده با شبیه‌سازی نیز نشان داده شد، به عنوان یک نتیجه‌ی مهم گزارش می‌گردد زیرا می‌تواند پایه‌ای برای تحقیقات بعدی جهت پیگیری مفهوم تعقیب اهداف متحرک باشد.

۷. قدردانی

احتراماً بر خود لازم میدانیم بدین وسیله از همکاری ارتش جمهوری اسلامی ایران بابت افتخار خدمت به بنده جهت افزایش توانمندی‌های نظامی کشور و همچنین از اعتماد دکتر مختاری مراتب تشکر و قدردانی خودمان را اعلام نمایم.

- [1] Wolfe S, Givigi S, Rabbath C-A. Cooperative Multi Model State Estimation and Control for Target Tracking UAVs. 2020.
- [2] Li KW, Jia H, Peng L, Gan L. Line-of-sight in operating a small unmanned aerial vehicle: How far can a quadcopter fly in line-of-sight? Applied ergonomics. 2019;81:102898.
- [3] Krajník T, Vonásek V, Fišer D, Faigl J, editors. AR-drone as a platform for robotic research and education. International conference on research and education in robotics, Springer, 2015.
- [4] Cheng H, Lin L, Zheng Z, Guan Y, Liu Z, editors. An autonomous vision-based target tracking system for rotorcraft unmanned aerial vehicles. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017.
- [5] Camargo MPd. Aerial machine vision, geographical information system and hue for pattern classification in agriculture: Universidade de São Paulo, 2018.
- [6] Liu Y, Wang Q, Hu H, He Y. A novel real-time moving target tracking and path planning system for a quadrotor UAV in unknown unstructured outdoor scenes. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 49(11) 2018, pp 62-72.
- [7] Padhy RP, Verma S, Ahmad S, Choudhury SK, Sa PK. Deep neural network for autonomous uav navigation in indoor corridor environments. Procedia computer science. 2018, pp 43-50.
- [8] Goh G, Goh G, Zhong Z. Outdoor Autonomous Landing of a Quadcopter on a Moving Platform using Off-board Computer Vision. Journal of Modeling and Optimization, 11(2), 2019, pp 86-96.
- [9] Azad Zade V, Latif AM. Classification of Features Extracted from Image Foreground and Background for Tracking of Aerial Moving Targets. Tabriz journal of electrical engineering. 2016; 46(3):1-11. [Persian].

- [10] Manzori A, Vossoughi G. Cooperative Control of a Quadrotor and a Mobile Robot: Sharif University, 2016.
- [11] sutude Bahraini M, Taghirad H. Simultaneous Localization and Mapping of a Mobile Robot Using Robust and Adaptive Filters in Dynamical Environments: Yazd University, 2017.
- [12] Rezaei Nam N, Sharafi S, Farajian N. Track moving targets using a maximum learning machine strap. National Conference on the Application of New Technologies in Science and Engineering, Electrical and Computer and IT, 2016.
- [13] Navab Zadeh MA. Simulation of robot movement to accurately track a moving target based on artificial intelligence: Bahonar University, 2018.
- [14] Guevarra GEC, Moreno JNB, Reccion JCB, Sy CMO, del Rosario JRB. Development of a Quadrotor with Vision-based Target Detection for Autonomous Landing. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, 2018, pp 41-45.
- [15] Rabah M, Rohan A, Mohamed SA, Kim S-H. Autonomous moving target-tracking for a UAV quadcopter based on fuzzy-PI. IEEE Access, 2019.
- [16] Parikh A, Kamalapurkar R, Dixon WE. Target tracking in the presence of intermittent measurements via motion model learning. IEEE Transactions on Robotics, 34(3), 2018, pp 805-819.
- [17] Cai Y, Xi Q, Xing X, Gui H, Liu Q, Path planning for UAV tracking target based on improved A-star algorithm. 2019 1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI), 2019.
- [18] Wang S, Jiang F, Zhang B, Ma R, Hao Q. Development of UAV-Based Target Tracking and Recognition Systems. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019.
- [19] Z.-Y. Zhao, M. Tomizuka, and S. Isaka, Fuzzy gain scheduling of PID controllers. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, vol. 23, no. 5, pp. 1392-1398, 1993.