



توسعه روش کنترل بینا مبنا برای ردیابی هدف ثابت توسط کوادروتور

شب‌نم مصطفی قره‌باغی^۱، دکتر عبدالمجید خوشنود^۲^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده هوافضا دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.^۲ دانشیار دانشکده هوافضا دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۲

چکیده

ردیابی اهداف، یکی از کاربردهای کلیدی و پیشرفته پهپادها به شمار می‌رود. در گذشته، این وظیفه عمدتاً به وسیله رادارها انجام می‌گرفت که به دلیل انعطاف‌پذیری محدود، تنها قادر به پوشش منطقه‌ای خاص بودند. با این حال، توسعه فناوری‌های جدید در حوزه پردازش تصویر و بینایی ماشین، امکان استفاده از دوربین‌های سبک‌وزن و کوچک‌تر را فراهم آورده که به راحتی بر روی پهپاد نصب می‌شوند. در این مقاله، هدف اصلی توسعه روش IBVS^۱ برای دنبال کردن اهداف ثابت توسط کوادروتور است که با استفاده از کنترل بینا مبنا، ورودی‌های کنترلی مناسب برای حفظ موقعیت هدف در مرکز دید پهپاد تولید می‌گردد. در رویکردهای متداول IBVS، طراحی و تنظیم بهینه ضرایب کنترلر به گونه‌ای که عملکرد مطلوبی در شرایط مختلف داشته باشد، همواره یک چالش اساسی بوده است. نوآوری اصلی این پژوهش، به کارگیری الگوریتم یادگیری تقویتی کیو برای تنظیم بهینه این ضرایب است.

کلمات کلیدی: ردیابی تصویری؛ هدف ثابت؛ کنترل بینا مبنا؛ کوادروتور.

Development of Image-Based Visual Servoing for Tracking by a Quadrotor

Shabnam Mostafa Gharabaghi¹, Abdol Majid Khoshnood²¹ Ph.D. Student, Aerospace. Eng., K. N. Toosi Univ., Tehran, Iran.² Assoc. Prof., Aerospace. Eng., K. N. Toosi Univ., Tehran, Iran.

Abstract

Target tracking is considered a key and advanced application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). In the past, this task was primarily carried out using radar systems, which, due to their limited flexibility, could only cover a specific area. However, advancements in image processing and machine vision technologies have enabled the use of lighter and smaller cameras that can be easily mounted on UAVs. The primary objective of this paper is to develop an Image-Based Visual Servoing (IBVS) method for tracking stationary targets using a quadrotor. This method utilizes visual feedback to generate appropriate control inputs to maintain the target position at the center of the drone's field of view. In conventional IBVS approaches, the optimal design and tuning of controller gains to ensure satisfactory performance under various conditions has always been a fundamental challenge. The main innovation of this research is the application of the Q-learning reinforcement learning algorithm for the optimal adjustment of these gains.

Keywords: Visual tracking; Fixed target; image based visual servoing; quadrotor.¹ Image based visual servoing

۱- مقدمه

کوادروتورها به دلیل توانایی‌های خودمختار، مانورپذیری بالا و انعطاف‌پذیری در شرایط مختلف، به ابزارهای محبوبی برای طیف گسترده‌ای از کاربردها تبدیل شده‌اند. این کاربردها شامل عملیات جست‌وجو و نجات، حمل و نقل اشیاء، بازرسی زیرساخت‌ها، نظارت محیطی و نقشه‌برداری می‌شود. علاوه بر این، توانایی حرکت در مسیرهای پیچیده، پرواز در ارتفاعات متنوع و تغییرات سریع در جهت و سرعت، آن‌ها را برای مأموریت‌هایی که به دقت بالا و واکنش سریع نیاز دارند، ایده‌آل می‌کند. از جمله مهم‌ترین این مأموریت‌ها، ردیابی و دنبال کردن اهداف است که در حوزه‌های نظامی و غیرنظامی کاربرد دارد.

حسگرهای مورد استفاده در این مأموریت‌ها، رادارها بودند. به‌طور کلی، رادارها ابزارهای قدرتمندی برای شناسایی و دنبال کردن اهداف هستند، اما تعمیر و نگهداری آن‌ها هزینه‌ی بالایی دارد و همچنین با افزایش فاصله، کارایی و دقت خود را از دست می‌دهند. بنابراین، جایگزینی مناسب برای رادار در پروازهای مستقل، استفاده از دوربین‌ها است.

سیگنال‌های تصویری در این زمینه مزایای متعددی نسبت به سایر روش‌های ردیابی ارائه می‌دهند. در مقایسه با روش‌هایی که به تجهیزات متعدد و پرهزینه نیاز دارند، فناوری‌های مبتنی بر بینایی با استفاده از کامپیوترهای سبک، فضای کمتر و مصرف انرژی پایین‌تر، این امکان را فراهم می‌کند که اهداف به‌طور مداوم از طریق پردازش فریم‌های ویدئویی در زمان حقیقی شناسایی و ردیابی شوند. در نهایت، با توجه به پیشرفت‌های اخیر در پردازش تصویر و یادگیری ماشین، روش‌های بینایی در طراحی سیستم‌های ردیابی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده‌اند.

در سناریوهایی که به دقت بالا نیاز دارند، مانند ردیابی و فرود بر یک هدف با استفاده از کوادروتورها [۱-۴]، تکنیک‌های کنترل بینا مینا^۱ پتانسیل بالایی نشان داده‌اند؛ زیرا اندازه‌گیری‌های بصری عملکرد خوبی در ردیابی فراهم می‌کنند. دو رویکرد اصلی در کنترل بینا مینا عبارتند از: (۱) کنترل بصری مبتنی بر موقعیت^۲ PBVS که بازسازی موقعیت

را بر اساس اطلاعات بصری برای قوانین کنترلی انجام می‌دهد، و (۲) کنترل بصری مبتنی بر تصویر IBVS که محاسبات کنترلی مستقیماً در صفحه تصویر انجام می‌شود [۵]. دستیابی به دقت لازم در پارامترهای بازسازی موقعیت مانند عمق، مدل هدف، پارامترهای درونی و هندسه سه‌بعدی در کنترل بصری مبتنی بر موقعیت می‌تواند چالش‌برانگیز باشد [۶، ۷]. در نتیجه، بسیاری از پژوهشگران به دلیل فرمولاسیون نسبتاً ساده کنترلی و مقاومت آن در برابر خطاهای کالیبراسیون دوربین و تخمین عمق، ترجیح می‌دهند که از روش‌های کنترل بصری مبتنی بر تصویر استفاده کنند [۸]. از آنجا که کوادروتورها سیستم‌های زیرتحریر هستند، فرمولاسیون مبتنی بر IBVS اغلب منجر به ایجاد یک ژاکوبین تصویری کوپل می‌شود که در طراحی کنترل باید به آن دقت نمود.

زیرتحریر به این معناست که تعداد ورودی‌های مستقل کنترلی (نیرو یا گشتاور) کمتر از تعداد درجات آزادی است. سیستم پهپاد دارای شش درجه آزادی است اما تنها چهار ورودی کنترلی دارد. استراتژی کنترل سلسله مراتبی^۳ راه‌حل مؤثری برای مشکل کنترل پهپادهای زیرتحریر است. این رویکرد با جدا کردن سیستم زیرتحریر به حلقه بیرونی و حلقه داخلی عمل می‌کند. استراتژی کنترل سلسله مراتبی شامل سه مرحله است، ابتدا ورودی کنترلی حلقه بیرونی طراحی می‌شود تا به هدف کنترل دست یابد. سپس، وضعیت فرمان حلقه داخلی از ورودی کنترل بدست می‌آید. در نهایت، ورودی کنترل داخلی برای دنبال کردن وضعیت مطلوب به کار گرفته می‌شود. استراتژی کنترل سلسله مراتبی در پژوهش‌های مختلف کنترل پهپاد به کار رفته است که می‌توان به کنترل غیرخطی با ماتریس چرخش، کنترل اشباع‌شده و مقاوم به خطا، کنترل مد لغزشی، کنترل در زمان محدود/ثابت، کنترل محدود به خروجی^۴ و غیره اشاره کرد.

ساختار دو حلقه کنترل برای سرووینگ بصری پهپاد مناسب است، حلقه داخلی ورودی‌های کنترل پرواز را با فرکانس نسبتاً بالا دریافت می‌کند و حلقه بیرونی با بازخورد دوربین و با فرکانس نسبتاً پایین کار می‌کند. علاوه بر این، با در نظر گرفتن دینامیک پهپاد و دوربین‌های پرسرعت می‌توانند عملکرد کنترل حلقه بسته را بهبود بخشند [۹].

⁴ saturated and fault-tolerant control, sliding mode control, finite-time/fixed-time control, output-constrained control

¹ Visual servoing

² Position based visual servoing

³ hierarchical control

کنترل مبتنی بر تصویر یک تکنیک کنترلی است که از اطلاعات تصویر یک دوربین برای هدایت ربات به موقعیت دلخواه استفاده می‌کند. این روش در کاربردهایی که نیاز به موقعیت‌یابی و جهت‌گیری دقیق دارند، مانند جابجایی رباتیک و بازرسی، بسیار مفید است. در این زمینه تحقیقات بسیاری صورت گرفته که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

زمان پرواز کوادروتورها به دلیل محدودیت ظرفیت باتری محدود است. بنابراین، هزینه زمانی طرح کنترل در کاربردهای واقعی اهمیت دارد. در نتیجه پژوهش [۱۱]، یک طرح کنترل سروینگ بصری با زمان ثابت برای کوادروتورها پیشنهاد می‌کند. ابتدا، بر اساس اصل تصویرسازی پرسپکتیو^۱ و نقاط هدف ثابت، ویژگی‌های تصویری مؤثر^۲ در صفحه‌ای به نام صفحه تصویری مجازی تعریف می‌شوند. سپس، دینامیک ویژگی‌های تصویری و دینامیک کوادروتور با هم ترکیب می‌شوند تا یک سیستم غیرخطی کوپل شده حاصل شود. این سیستم غیرخطی به دو زیرسیستم حلقه داخلی و حلقه خارجی تفکیک می‌گردد. علاوه بر این، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر زمان ثابت با استفاده از سطوح مود لغزشی طراحی شده‌اند و اثبات می‌شود سیستم حلقه بسته طراحی شده پایدار هستند. پلتفرم آزمایش واقعی، DJI Matrice ۱۰۰ است.

در پژوهش [۱۲]، برای عبور کوادروتور با سرعت بالا از چندین دهانه با چرخش‌های بزرگ از روش IBVS استفاده کرد. هر دوی این پژوهش‌ها فرض می‌کنند که ویژگی‌های هدف می‌توانند در میدان دید سنسور باقی بماند که این فرض در اکثر سناریوهای پروازی چابک با دوربین تک سوراخ سوزنی برقرار نمی‌باشد.

در مقاله [۱۳]، یک سیستم ردیابی مبتنی بر تصویر طراحی شده است که با استفاده از آن، یک کوادروتور مجهز به دوربین مونوکولار^۳ ثابت می‌تواند یک هدف متحرک را بر روی زمین ردیابی کند. این طرح بصری شامل یک شناساگر سبک وزن YOLOv3-tiny و یک ردیاب KCF برای درک کردن هدف زمینی است. از یک کنترل‌کننده سرعت PID برای حفظ ردیابی پیوسته استفاده شده است.

در مقاله [۹]، یک رویکرد IBVS دینامیکی برای کنترل موقعیت و زاویه یاو پهپاد با در نظر گرفتن یک هدف متحرک

روش IBVS با استفاده از اطلاعات تصویری، امکان تنظیم دقیق موقعیت و فاصله کوادروتور نسبت به هدف را فراهم می‌آورد. این فناوری‌ها در نهایت به افزایش خودمختاری و توانایی پهپادها در انجام مأموریت‌های پیچیده‌تر و حساس‌تر می‌انجامد.

در شکل ۱ مسئله ردیابی هدف از منظرهای مختلف مانند اندازه، تعداد، محیط و ثابت یا متحرک بودن دسته بندی شده است.



شکل ۱- تقسیم بندی مأموریت‌های مختلف ردیابی هدف توسط پهپاد [۱۰]

اهداف را می‌توان بر اساس اندازه و فاصله آن‌ها از سیستم ردیابی پهپاد به اهداف بزرگ و کوچک طبقه‌بندی کرد. کوچک بودن اندازه هدف، به‌ویژه در سناریوهای شلوغ، شناسایی و ردیابی آن را دشوار می‌سازد و ردیابی اهداف کوچک را به چالشی جدی تبدیل می‌کند. ردیابی اهداف با اندازه‌های مختلف مشکلات منحصر به فردی ایجاد می‌کند، زیرا نیاز به ردیابی طولانی مدت هدف با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف دارد. در ردیابی و تشخیص اهداف ثابت، پهپادها باید به دنبال یک یا چند هدف که در مکان‌های ثابت قرار دارند بگردند و موقعیت آن‌ها را حفظ کنند. در حالیکه، در وظایف ردیابی اهداف متحرک، پهپادها باید به دنبال یک یا چند هدف متحرک و نامشخص بگردند و آن‌ها را شناسایی کنند.

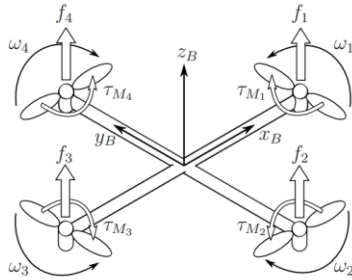
روش‌های سنتی تشخیص هدف شامل گرفتن تصویر توسط پهپاد و ارسال آن به یک ایستگاه زمینی برای شناسایی است. سپس، ایستگاه زمینی فرمان‌هایی را به پهپاد برای کنترل ارسال می‌کند. با این حال، این روش به دلیل مشکلات مربوط به تأخیر شبکه و نیاز به پهنای باند بالا، محدودیت‌هایی در پاسخگویی دارد.

³ monocular

¹ perspective projection

² effective image features

ساختار کوادکوپتر در شکل ۲ نمایش داده شده است که شامل سرعت‌های زاویه‌ای، گشتاورها و نیروهای تراست تولید شده توسط روتور است.



شکل ۲- دستگاه مختصات بدنی کوادروتور [۱۶]

برای برای شبیه‌سازی کوادروتور از معادلات زیر استفاده می‌شود. این معادلات از مرجع [۱۶] استفاده شده است.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = -g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + T/m \begin{bmatrix} S_\theta C_\phi C_\psi + S_\phi S_\psi \\ S_\theta C_\phi S_\psi - S_\phi C_\psi \\ C_\theta C_\phi \end{bmatrix} - 1/m \begin{bmatrix} A_x & 0 & 0 \\ 0 & A_y & 0 \\ 0 & 0 & A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{p} \\ \ddot{q} \\ \ddot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I_{yy} - I_{zz})qr/I_{xx} \\ (I_{zz} - I_{xx})pr/I_{yy} \\ (I_{xx} - I_{yy})pq/I_{zz} \end{bmatrix} - I_r \begin{bmatrix} q/I_{xx} \\ -p/I_{yy} \\ 0 \end{bmatrix} wr + \begin{bmatrix} \tau_\phi/I_{xx} \\ \tau_\theta/I_{yy} \\ \tau_\psi/I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S_\theta T_\theta & C_\theta T_\theta \\ 0 & C_\theta & -S_\theta \\ 0 & S_\theta/C_\theta & C_\theta/C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3)$$

مقدار w_T از سرعت زاویه‌ای موتورها در رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$w_T = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 \quad (4)$$

سرعت زاویه‌ای روتورها به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{cases} w_1^2 = \frac{T}{4k} - \frac{\tau_\theta}{2kl} - \frac{\tau_\psi}{4b} \\ w_2^2 = \frac{T}{4k} - \frac{\tau_\theta}{2kl} - \frac{\tau_\psi}{4b} \\ w_3^2 = \frac{T}{4k} + \frac{\tau_\theta}{2kl} - \frac{\tau_\psi}{4b} \\ w_4^2 = \frac{T}{4k} + \frac{\tau_\theta}{2kl} - \frac{\tau_\psi}{4b} \end{cases} \quad (5)$$

پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مقادیر پارامترها	
پارامترها	مقادیر
m	2Kg
Ix	0.85 kgm ²
Iy	0.85 kgm ²
Ax, Ay, Az	0.25 kg/s
k	2.98*1e-4
L	0.6 m
b	1.14*1e-5

ناشناخته در صفحه پیشنهاد شده است. ممان‌های مناسب تصویر در صفحه تصویر مجازی برای مقابله با زیرتحرک بودن پهپاد انتخاب می‌شوند و کنترلر IBVS برای ردیابی اهداف متحرک توسط ویژگی‌های دینامیکی انتخاب‌شده تصویر طراحی شده است. علاوه بر این، یک تخمینگر غیرخطی جدید برای سرعت‌های هدف همراه با متغیر کمکی مناسب ایجاد شد و با IBVS حلقه بسته ترکیب می‌شود که به حذف تأثیر حرکت هدف نامشخص کمک می‌کند. در تست واقعی از یک پهپاد چهارموتوره DJI-M100 به عنوان پلتفرم استفاده می‌شود که مجهز به دوربین رو به پایین Intel RealSense D435i و کامپیوتر روی برد Intel NUC است. ربات متحرک Jackal به عنوان هدف پویا با یک کامپیوتر داخلی انتخاب شده است.

در پژوهش [۱۴] فرآیند با شناسایی هدف در تصویر از طریق تشخیص اشیاء متحرک (blob) آغاز شده و در ادامه موقعیت هدف و نرخ تغییرات آن محاسبه می‌شود. هنگامی که هدف از مرکز تصویر فاصله می‌گیرد و از شعاع مجاز تغییرات فراتر می‌رود، فرمان حرکتی به دوربین ارسال می‌شود تا دوربین با حرکت مناسب (چرخش افقی دوربین یا چرخش عمودی دوربین)، شیء را در محدوده دید حفظ کند.

در مقاله [۱۵] با استفاده از کنترلر PID به ردیابی هدف متحرک زمینی پرداخته است. ابتدا شبکه YOLOv3 روی داده‌های مناسب آموزش داده شده تا بتواند هدف مورد نظر را به‌طور دقیق شناسایی کند. سپس از کنترلر PID برای ردیابی استفاده کرده است.

هدف اصلی این مقاله، توسعه یک روش کنترل بینامبنا برای ردیابی اهداف ثابت توسط یک کوادروتور است که در آن، ضرایب کنترلر به‌وسیله الگوریتم Q-learning تنظیم می‌شوند. ساختار این مقاله به شرح زیر است: در بخش دوم، مدل دینامیک کوادروتور ارائه می‌شود. بخش سوم به معرفی اصول کنترل بینامبنا و به‌طور خاص روش IBVS می‌پردازد و در ادامه، چگونگی تنظیم ضرایب کنترلر در این چارچوب تبیین می‌گردد. در نهایت، بخش چهارم به ارائه و تحلیل نتایج شبیه‌سازی اختصاص دارد.

۲- دینامیک

احتمالی درباره‌ی سیستم (مانند پارامترهای تقریبی درونی دوربین یا مدل‌های سه‌بعدی اشیا) می‌باشد. بردار s^* شامل مقادیر مطلوب برای ویژگی‌ها است.

پس از انتخاب s ، طراحی سیستم کنترلی نسبتاً ساده می‌شود. یکی از روش‌های مستقیم، طراحی یک کنترل‌کننده سرعت است. برای این منظور، نیاز به رابطه‌ای بین تغییرات زمانی s و سرعت دوربین داریم. سرعت دوربین با $V_c = (v_c, \omega_c)$ نشان داده می‌شود که در آن v_c سرعت خطی لحظه‌ای مرکز دوربین و ω_c سرعت زاویه‌ای چارچوب دوربین است.

$$\dot{s} = L_s V_c \quad (7)$$

ماتریس L_s به صورت $6 \times k$ است و به عنوان ماتریس تعاملی یا ژاکوبین ویژگی شناخته می‌شود که k نشان‌دهنده تعداد نقاط مورد نظر است. با استفاده از روابط (۶) و (۷)، بلافاصله رابطه بین سرعت دوربین و تغییرات زمانی خطا به دست می‌آید:

$$\dot{e} = L_s V_c \quad (8)$$

با در نظر گرفتن V_c به عنوان ورودی کنترل‌کننده ربات، در صورتی که هدف کاهش نمایی و مستقل خطا باشد، به عبارت دیگر $\dot{e} = -\lambda e$ نتیجه می‌گیریم:

$$V_c = -\lambda L_s^+ e \quad (9)$$

در رابطه (۹)، L_s^+ ماتریسی با ابعاد $6 \times k$ است که به عنوان شبه معکوس Moore-Penrose ماتریس L_s عمل می‌کند. برای استخراج ماتریس L_s به صورت زیر عمل می‌کنیم.

برای یک نقطه در دستگاه مختصات دوربین به صورت $X=(X,Y,Z)$ که نمایش آن در دستگاه مختصات تصویر به

صورت $x=(x,y)$ است، داریم:

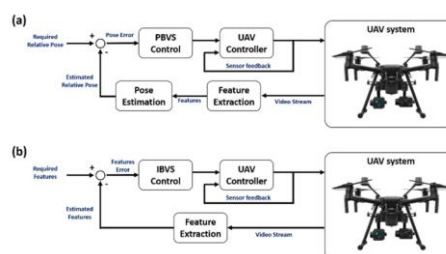
$$\begin{cases} x = \frac{X}{Z} = (u - c_u)/f\alpha \\ y = \frac{Y}{Z} = (v - c_v)/f \end{cases} \quad (10)$$

که در آن (u,v) مختصات نقطه در تصویر را به صورت پیکسل نشان می‌دهد و (c_u, c_v, f, α) مجموعه‌ای از پارامترهای ذاتی دوربین است به طوریکه c_u و c_v انحراف بین مختصات تصویر و دستگاه مختصات پیکسلی، f فاصله کانونی و α نسبت ابعاد پیکسل‌ها را تعیین می‌کند.

P1	(0.1 , 0.1 , 0) m
P2	(-0.1 , 0.1 , 0) m
P3	(0.1 , -0.1 , 0) m
P4	(-0.1 , -0.1 , 0) m
C_u	321 pixel
C_v	250 pixel
f	644 pixel
α	0.75

۳- کنترل بینا مبنا

کنترل بینا مبنا یک چارچوب کنترلی مبتنی بر بازخورد تصویر^۱ است که شامل IBVS و PBVS می‌باشد. نیاز به بازسازی تصویر سه بعدی از تصاویر دو بعدی در فضای کاری با استفاده از هندسه هدف و پارامترهای دوربین دارد. اما در IBVS از اطلاعات تصاویر ۲ بعدی هدف به طور مستقیم در کنترل حلقه بسته استفاده می‌شود و نیازی به بازسازی سه بعدی ندارد [۹]. این روش همچنین از بازسازی پیچیده اجتناب می‌کند که به افزایش استحکام در برابر خطاهای کالیبراسیون دوربین کمک می‌نماید. در شکل ۳ مقایسه دو روش قابل مشاهده است.



شکل ۳- مقایسه روش IBVS و PBVS [۱۷]

هدف از تمام طرح‌های کنترلی مبتنی بر بینایی، به حداقل رساندن خطای $e(t)$ است که معمولاً به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e(t) = s(m(t), a) - s^* \quad (6)$$

پارامترهای موجود در رابطه (۶) به صورت زیر تعریف می‌شوند. بردار $m(t)$ مجموعه‌ای از مختصات تصویری نقاط موردنظر یا مختصات تصویری مرکز جرم یک شیء است. a مجموعه‌ای از پارامترها است که نشان‌دهنده‌ی اطلاعات اضافی

^۱ Visual feedback

$$L = \frac{1}{2}e^2 \quad (16)$$

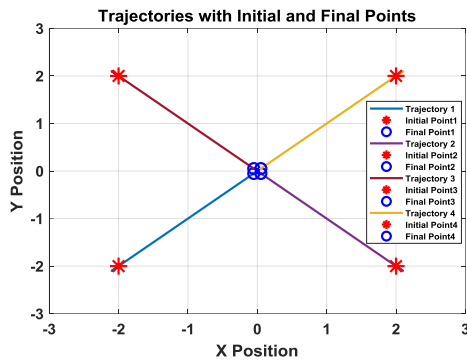
از تابع لیپانوف مشتق گرفته و از روابط (۸) و (۹) استفاده می‌کنیم.

$$\dot{L} = e^T \dot{e} = e^T L_s V_c \quad (17)$$

$$e^T L_s V_c = -\lambda e^T L_s L_s^+ e < 0 \quad (18)$$

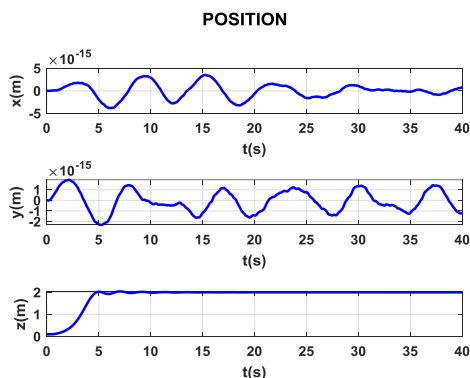
۴- نتایج

برای استفاده از کنترل بینامینا حداقل به ۴ نقطه نشان شده نیاز داریم. لازم است مختصات این نقاط در گام ابتدایی مشخص شود. سپس با توجه به مطالب گفته شده شبیه‌سازی در محیط سیمولینک انجام می‌دهیم و نتایج از قرار زیر است:



شکل ۴- جابه‌جایی نقاط هدف در مختصات تصویر (حرکت عمودی)

شکل ۴ جابه‌جایی نقاط مورد نظر در مختصات تصویر را نمایش می‌دهد. همانطور که از نمودار پیداست کوادروتور در حال افزایش ارتفاع برای رسیدن به نقطه مرجع است.



شکل ۵- موقعیت کوادروتور

با گرفتن مشتق از رابطه (۱۰) داریم:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\dot{X}}{Z} - \frac{X\dot{Z}}{Z^2} \\ \dot{y} = \frac{\dot{Y}}{Z} - \frac{Y\dot{Z}}{Z^2} \end{cases} \quad (11)$$

سرعت نقطه $X=(X,Y,Z)$ را می‌توان به سرعت دوربین مرتبط کرد.

$$\dot{X} = -v_x - \omega_y Z + \omega_z Y \quad (12)$$

$$\dot{Y} = -v_y - \omega_z X + \omega_x Z$$

$$\dot{Z} = -v_z - \omega_x Y + \omega_y X$$

با جایگذاری رابطه (۱۲) در (۱۱) به فرمول (۱۳) می‌رسیم.

$$\begin{cases} \dot{x} = -\frac{v_x}{Z} + \frac{xv_z}{Z} + xy\omega_x - (1+x^2)\omega_y + y\omega_z \\ \dot{y} = -\frac{v_y}{Z} + \frac{yv_z}{Z} - xy\omega_y + (1+y^2)\omega_x - x\omega_z \end{cases} \quad (13)$$

معادله (۱۳) را می‌توان به صورت (۱۴) بازنویسی کرد.

$$\dot{x} = L_s V_c \quad (14)$$

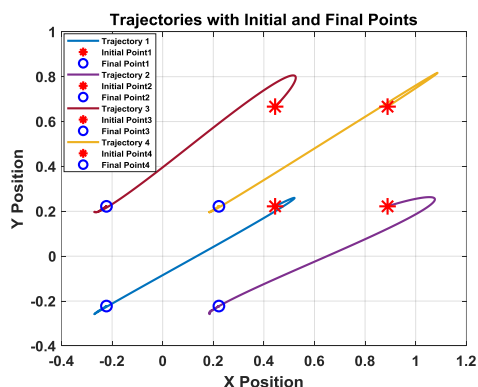
ماتریس L_s برابر است با:

$$L_s = \begin{bmatrix} -1/Z & 0 & x/Z & xy & -(1+x^2) & y \\ 0 & -1/Z & y/Z & 1+y^2 & -xy & -x \end{bmatrix} \quad (15)$$

در میان روش‌های مختلف کنترل بصری، کنترل مبتنی بر تصویر (IBVS) جذاب‌تر است، زیرا سیگنال کنترل را مستقیماً از ویژگی‌های تصویر در صفحه تصویر محاسبه می‌کند که حساسیت کمتری به خطاهای مدل‌سازی و کالیبراسیون دوربین دارد [۱۹،۲۰].

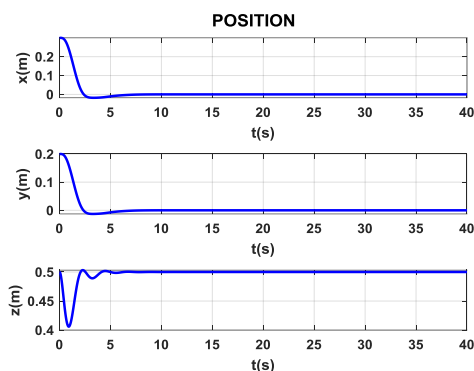
کنترل‌کننده IBVS برای کوادروتور با چالش‌هایی همراه است؛ از جمله دینامیک غیرخطی و کوپل سیستم و ویژگی زیرتحریک بودن کوادروتور که موانعی در طراحی این کنترل‌کننده ایجاد می‌کنند. همچنین، پیاده‌سازی IBVS روی کوادروتور با مشکلاتی نظیر از دست دادن اطلاعات عمق، گم کردن هدف در مانورهای تهاجمی، و نیاز به نشانگرهای خاص برای تشخیص هدف مواجه است [۹]. با وجود مزایای IBVS، این روش به دلیل محدودیت میدان دید سنسور در مدیریت مانورهای تهاجمی کوادروتور دچار محدودیت‌های جدی می‌شود؛ به گونه‌ای که با خروج هدف از میدان دید، کنترل مختل می‌شود. این در حالی است که روش PBVS دارای لایه‌ای برای تخمین وضعیت سیستم و پیش‌بینی موقعیت هدف حتی زمانی که از دید خارج است، می‌باشد [۲۱].

با توجه به $\dot{e} = -\lambda e$ و با در نظر گرفتن تابع L به عنوان تابع لیپانوف، برای بررسی پایداری سیستم، شرایط پایداری لیپانوف را داریم:



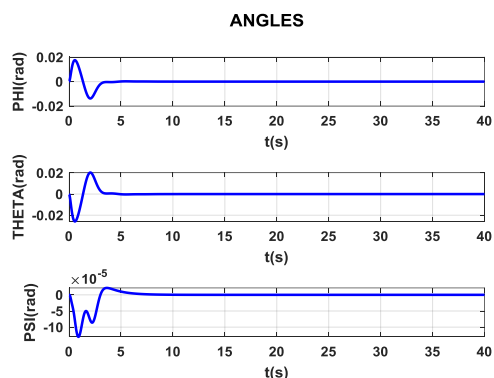
شکل ۸- جابه‌جایی نقاط هدف در مختصات تصویر (حرکت افقی)

شکل ۸ جابه‌جایی نقاط نشاندار را در مختصات تصویر حین اعمال کنترل بینامبنا نمایش می‌دهد.



شکل ۹- موقعیت کوادروتور (حرکت افقی)

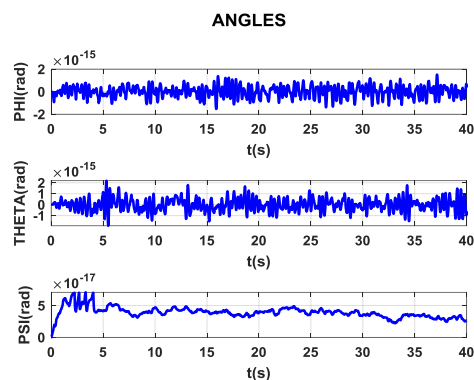
موقعیت کوادروتور در شکل ۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰- وضعیت کوادروتور (حرکت افقی)

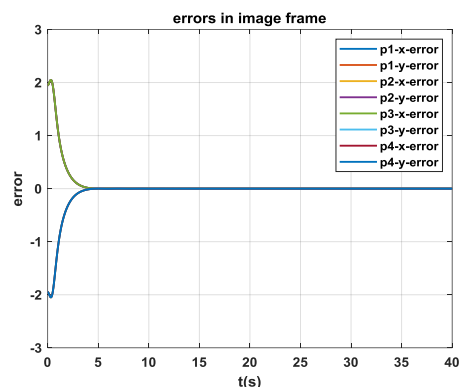
وضعیت پرنده در حین پرواز در شکل ۱۰ نمایش داده می‌شود.

شکل ۵ موقعیت کوادروتور را با اعمال کنترلر بینامبنا نشان می‌دهد. پرنده جابه‌جایی کمی در جهت x و y دارد. این مد مربوط به مد تغییر ارتفاع پرنده است.



شکل ۶- وضعیت کوادروتور

وقتی پرنده حرکت عمودی دارد بدیهیست که تغییر زاویه کمی داشته باشد که قابل رؤیت در شکل ۶ است.



شکل ۷- خطای نقاط مرجع با نقاط دیده شده در تصویر

۴ نقطه نشان شده داریم که هر کدام در جهت x و y مقدار دارند. خطای مقادیر این نقاط با نقاط مرجعشان در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

نتایج قبلی مربوط به تغییر ارتفاع پرنده بود حال نتایج مربوط به کنترل position پرنده را بررسی می‌کنیم.

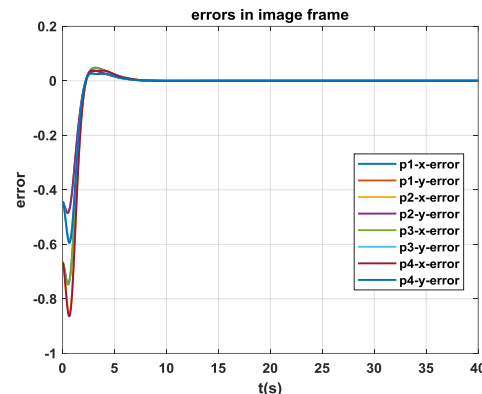
در رابطه (۱۹) p و q ضرایب ثابت، a نشان‌دهنده بهره‌های کنترلی و e نمایانگر خطای خطای موقعیت (بین وضعیت فعلی و مطلوب) در صفحه مختصات تصویر است. در جدول ۲ به صورت اختصار عملکرد کنترلر در مقایسه با PID آورده شده است.

جدول ۲- عملکرد کنترلر

مقادیر	شاخص‌ها
5 s	زمان نشست حرکت افقی (ibvs)
4 s	زمان نشست حرکت عمودی (ibvs)
1e-5	خطای حالت ماندگار حرکت افقی (ibvs)
1e-8	خطای حالت ماندگار حرکت عمودی (ibvs)
10 s	زمان نشست حرکت افقی (pid)
6 s	زمان نشست حرکت عمودی (pid)
1e-2	خطای حالت ماندگار حرکت افقی (pid)
1e-2	خطای حالت ماندگار حرکت عمودی (pid)

۵- جمع‌بندی

در این پژوهش، فناوری ردیابی اهداف به‌عنوان یکی از فناوری‌های اساسی و حیاتی مورد بررسی قرار گرفت که اهمیت آن در کاربردهای عملی روزبه‌روز در حال افزایش است. در روش‌های سنتی، این فرآیند عمدتاً مبتنی بر رادارها بود که به دلیل محدودیت‌های موجود، از جمله انعطاف‌پذیری پایین، تنها قادر به پوشش‌دهی نواحی خاصی بودند. در این مقاله، با به‌کارگیری کنترل بینامبنا، روشی نوین برای ردیابی هدف ارائه شده است. در این روش، اختلاف پیکسل به‌عنوان ورودی کنترلر در نظر گرفته می‌شود و سپس به سرعت مطلوب و در نهایت به موقعیت و وضعیت مورد نظر تبدیل می‌گردد. برای تنظیم ضرایب کنترلر از الگوریتم یادگیری تقویتی Q-learning استفاده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده،

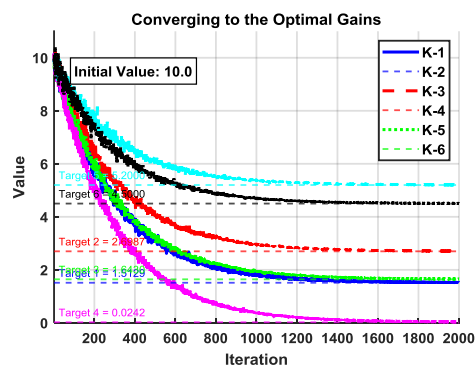


شکل ۱۱- خطای نقاط مرجع با نقاط دیده شده در تصویر (حرکت افقی)

خطای مختصات نقاط با مقدار مرجع در شکل ۱۱ ترسیم شده است.

برای بدست آوردن ضرایب کنترلی مناسب از روش یادگیری تقویتی عمیق DQN استفاده شده است. در چارچوب کلی یادگیری تقویتی، عامل با دریافت وضعیت^۱ از محیط، عملی^۲ را انتخاب می‌کند و بر اساس تأثیر آن عمل، پاداشی^۳ از محیط دریافت می‌کند. در این پژوهش، وضعیت عامل، خطای موقعیت (بین وضعیت فعلی و مطلوب) در صفحه مختصات تصویر تعریف می‌شود. عمل عامل نیز، بهره‌های کنترلی در نظر گرفته شده است. تابع پاداش نیز مطابق با روابط (۱۹) پیاده سازی شده است [۱].

$$r = \begin{cases} 100 & \text{رسیدن به وضعیت مطلوب} \\ -100 & \text{خارج شدن از صفحه تصویر} \\ -qe - pa & \end{cases} \quad (19)$$



شکل ۱۲- پیدا کردن گین‌های مناسب

³ Reward

¹ State

² Action

- the 44th IEEE Conference on Decision and Control (pp. 6078-6084). IEEE.
- [8] Hamel, T. and Mahony, R., 2002. Visual servoing of an under-actuated dynamic rigid-body system: an image-based approach. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(2), pp.187-198.
- [9] Shi, L., Li, B. and Shi, W., 2024. Vision-based UAV adaptive tracking control for moving targets with velocity observation. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 46(12), pp.2255-2265.
- [10] Alhafnawi, M., Salameh, H.A.B., Masadeh, A.E., Al-Obiedollah, H., Ayyash, M., El-Khazali, R. and Elgala, H., 2023. A survey of indoor and outdoor uav-based target tracking systems: Current status, challenges, technologies, and future directions. *IEEE Access*, 11, pp.68324-68339.
- [11] Chen, J., Hua, C. and Guan, X., 2019. Image based fixed time visual servoing control for the quadrotor UAV. *IET Control Theory & Applications*, 13(18), pp.3117-3123.
- [12] Guo, D. and Leang, K.K., 2020. Image-based estimation, planning, and control for high-speed flying through multiple openings. *The International Journal of Robotics Research*, 39(9), pp.1122-1137.
- [13] Tian, R., Ji, R., Bai, C. and Guo, J., 2023, October. A vision-based ground moving target tracking system for quadrotor uavs. In 2023 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS) (pp. 1750-1754). IEEE.
- [14] Henriques, J.F., Caseiro, R., Martins, P. and Batista, J., 2014. High-speed tracking with kernelized correlation filters. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 37(3), pp.583-596.
- [15] Mokhtari, M.A. and Taheri, M., 2024. Real-time object detection and tracking using YOLOv3 network by quadcopter. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 52(4), pp.1811-1829.
- [16] Luukkainen, T., 2011. Modelling and control of quadcopter. Independent research project in applied mathematics, Espoo, 22(22), pp.1-24.
- [17] Zhang, K., Chen, J. and Jia, B., 2017. Asymptotic moving object tracking with trajectory tracking extension: A homography-based approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 27(18), pp.4664-4685.
- [18] Al Radi, M., AlMallahi, M.N., Al-Sumaiti, A.S., Semeraro, C., Abdelkareem, M.A. and Olabi, A.G., 2024. Progress in artificial intelligence-based visual servoing of autonomous unmanned aerial vehicles (UAVs). *International Journal of Thermofluids*, 21, p.100590.

کنترل طراحی شده عملکرد مطلوبی داشته و توانسته است هدف را به صورت پایدار در میدان دید دوربین حفظ کند. از جمله محدودیت‌های این پژوهش، حساسیت سیستم به اختلالات دیداری است؛ به گونه‌ای که در صورت ایجاد مانع در میدان دید یا محو شدن هدف، ردیابی با شکست مواجه خواهد شد. این پژوهش از پتانسیل بالایی برای توسعه برخوردار است. از جمله زمینه‌های پیشنهادی برای کارهای آتی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- افزودن قابلیت برنامه‌ریزی مسیر^۱ به منظور تضمین پرواز ایمن در محیط‌های شلوغ و پویا.
- اضافه نمودن گیمبال به دوربین برای افزایش میدان دید.

مراجع

- [1] Baca, T., Stepan, P., Spurny, V., Hert, D., Penicka, R., Saska, M., Thomas, J., Loianno, G. and Kumar, V., 2019. Autonomous landing on a moving vehicle with an unmanned aerial vehicle. *Journal of Field Robotics*, 36(5), pp.874-891.
- [2] Li, J.M., Chen, C.W. and Cheng, T.H., 2020. Motion prediction and robust tracking of a dynamic and temporarily-occluded target by an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 29(4), pp.1623-1635.
- [3] Sun, P., Zhu, B. and Li, S., 2023. Vision-based prescribed performance control for UAV target tracking subject to actuator saturation. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(1), pp.2382-2389.
- [4] Zhong, H., Wang, Y., Miao, Z., Li, L., Fan, S. and Zhang, H., 2022. A homography-based visual servo control approach for an underactuated unmanned aerial vehicle in GPS-denied environments. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(2), pp.1119-1129.
- [5] Janabi-Sharifi, F., Deng, L. and Wilson, W.J., 2010. Comparison of basic visual servoing methods. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16(5), pp.967-983.
- [6] Wu, A.D., Johnson, E.N. and Proctor, A.A., 2005. Vision-aided inertial navigation for flight control. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2(9), pp.348-360.
- [7] Metni, N., Hamel, T. and Derkx, F., 2005, December. Visual tracking control of aerial robotic systems with adaptive depth estimation. In *Proceedings of*

^۱ Path planner

- [21] Qin, C., Yu, Q., Go, H.H. and Liu, H.H.T., 2023. Perception-aware image-based visual servoing of aggressive quadrotor UAVs. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 28(4), pp.2020-2028.
- [22] Fu, G., Chu, H., Liu, L., Fang, L. and Zhu, X., 2023. Deep reinforcement learning for the visual servoing control of uavs with fov constraint. *Drones*, 7(6), p.375.
- [19] Chaumette, F. and Hutchinson, S., 2006. Visual servo control. I. Basic approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(4), pp.82-90.
- [20] Chaumette, F. and Hutchinson, S., 2007. Visual servo control. II. Advanced approaches [Tutorial]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 14(1), pp.109-118.