

تخمین خطی مرتبه پایین از یک پهپاد چهارپره تجاری با استفاده از داده‌های پروازی

دهقان، سید محمد مهدی^{*}، پارسا، علی^۲، آهانگرانی فراهانی، علیرضا^۳، غزلباش، احسان^۴

- ۱- مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی مالک اشتر
 - ۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشکده فنی- دانشگاه تهران
 - ۳- مجتمع دانشگاهی هوافضا- دانشگاه صنعتی مالک اشتر
 - ۴- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشکده فنی- دانشگاه تهران
- (دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۳)

چکیده

در این مقاله به منظور بهبود عملکرد حلقه هدایت یک چهارپره تجاری مجهز به سیستم کنترل و ناوبری ارزان قیمت، از مدل‌های شناسایی شده بر اساس داده‌های پروازی استفاده شده است. برای این منظور، رابطه بین سرعت و زاویه حول محورهای افقی و همچنین رابطه بین چرخش حول محورهای سه‌گانه با دستورات تعریف شده در اتوپیلوت پرنده به صورت مجزا از یکدیگر شناسایی شده است. بر اساس نتایج حاصل از آزمون‌های میدانی، استفاده از یک تابع تبدیل درجه اول برای توصیف چرخش حول محور عمودی از دقت کافی برخوردار است. همچنین توصیف عملکرد افقی چهارپره در قالب دو مدل خطی درجه اول متوالی، یک مدل بین دستور تغییر زاویه و تغییر زوایای رول و پیچ و مدل دیگر بین زوایای رول و پیچ و سرعت‌های افقی، از دقت کافی برخوردار است. برای تخمین پارامترهای مجهول مدل‌ها نیز با توجه به خطی و نامتغیر با زمان بودن سیستم از تخمین گر حداقل مربعات خطا بر روی داده‌های حاصل از تست‌های پروازی استفاده شده است. در پایان با استفاده از مدل‌های شناسایی شده، یک ردیاب PID برای افزایش دقت در ردیابی مسیرهای مرجع پیاده‌سازی گردیده است. برای اطمینان از عملکرد مطلوب روش پیشنهادی، اثر بکارگیری ردیاب مسیر مبتنی بر مدل شناسایی شده به عنوان حلقه بیرونی کنترل بررسی شده است. نتایج ارزیابی عملی در فضای داخل ساختمان نشان از بهبود عملکرد سیستم در ردیابی مسیرهای مرجع ورودی دارد.

واژه‌های کلیدی: چهارپره، شناسایی سیستم، داده‌های پروازی، روش حداقل مربعات، ردیابی مسیر مرجع

Low-order Linear Estimation of a Commercial Quadrotor using Flight Test Data Sets

S. M. M. Dehghan, A. Parsa, A. Ahangarani Farahani, E. Ghezlbash

Abstract

In this paper, a functional model, which is identified based on flight test data sets, is used to improve the performance of guidance loop of a commercial quadrotor equipped with a low-cost autopilot and navigation system. For this purpose, relationships between horizontal velocities and the quadrotor attitudes around the horizontal axes and relationships between three quadrotor attitudes with the correspondent commands sent to the autopilot are identified independently. The first model describes the relation between rotation around the axes of the quadrotor with declared commands in the autopilot system and the other describes the relation between horizontal velocities with the angle around the longitudinal and latitudinal axes of the quadrotor. According to the experimental test results, a first order transfer function has enough accuracy to describe the rotation around the vertical axis with related commands. Also, the description of the relation between the horizontal velocities and the autopilot commands has suitable accuracy using two consequent first order transfer functions; one model between the applied commands and changes of roll and pitch angles, and the other between roll and pitch angles and the horizontal velocities. Due to the linear time invariant characteristics of the system, the least square estimator is used to estimate unknown parameters of the models. To evaluate the identified models, the performance of the path tracking using a PID controller as the outer controller is investigated. The results of the indoor tests show significant improvements in path tracking that confirms enough accuracy of the identified models.

Key words: Quadrotor, Parrot, System identification, Flight data set, Least square method, Path tracking.

مقدمه

چهارپره یکی از انواع پرنده‌های عمود پرواز است. این پرنده دارای چهار روتور است و برای چرخاندن هر روتور و تولید نیروی پیشران از یک موتور مجزا استفاده می‌کند. این پرنده به دلیل کاربردهای فراوان در مأموریت‌های نظامی و غیرنظامی، ساختار ساده، قیمت ارزان و در دسترس بودن، نظر بسیاری از محققان را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. در این پرنده تغییر زوایا حول محورهای افقی به سرعت در دو راستای طولی و جانبی و تغییر زاویه حول محور عمودی به چرخش راستای پرنده منجر می‌شود [۱].

تاکنون تحقیقات وسیعی در زمینه طراحی کنترل‌کننده برای چهارپره صورت گرفته است. برای مثال، مرجع [۲] عملکرد کنترل‌کننده را در حذف اغتشاشات آیرودینامیکی یک چهارپره مورد مطالعه قرار داده است. در مرجع [۳] کنترل‌کننده‌های PID و LQR برای کنترل چهارپره استفاده شده است. در مرجع [۴] برای کنترل پرنده در فرود خودکار از کنترل‌کننده مد لغزشی استفاده شده است که منجر به پدیده ضربه‌زدن در پرنده می‌شود. مرجع [۶] از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای بهینه کردن زمان در کنترل چهارپره استفاده می‌کند. در مرجع [۷] کنترل مد لغزشی مقاوم برای کنترل چهارپره استفاده شده و تخمین خطا بر اساس رویت‌گر صورت گرفته است. در مرجع [۸] کنترل‌کننده مقاومی برای ردیابی مسیر مرجع توسط یک چهارپره طراحی و با موفقیت پیاده‌سازی شده است. در مرجع [۹] نیز از کنترل‌کننده اشباع آشیانه‌ای برای مسئله ردیابی مسیر مرجع استفاده شده است. در مرجع [۱۰] از روش دینامیک معکوس برای طراحی یک کنترل‌کننده دو سطحی برای چهارپره استفاده شده است. در مرجع [۱۱] به همراه کنترل‌کننده مد لغزشی از تابع پتانسیل برای بهبود دنباله‌روی هدف زمینی متحرک توسط پرنده بال‌ثابت در مسیرهای منحنی شکل استفاده شده است. در مرجع [۱۲] از کنترل‌کننده مقاوم غیرخطی برای کنترل چهارپره استفاده شده است. هم‌چنین در مرجع [۱۳] از کنترل غیرخطی برای ردیابی یک نقطه توسط چهارپره استفاده شده و سیستم پیاده‌سازی شده است.

این تحقیقات عموماً برای بکارگیری بر روی پرنده‌های تجاری ارزان قیمت موجود در بازار مناسب نیستند. بنابراین در این مقاله جهت دستیابی به عملکرد مطلوب در ردیابی مسیر

مرجع توسط یک چهارپره تجاری ارزان قیمت که سیستم کنترل و ناوبری آن از دقت پایینی برخوردار است، یک طبقه کنترل‌کننده بیرونی به پرنده اضافه شده است. این کنترل‌کننده به صورت سری با کنترل‌کننده‌های داخلی خود چهارپره قرار می‌گیرد. طراحی این کنترل‌کننده نیازمند مدل مناسبی از پرنده و شناسایی پارامترهای آن است.

اگرچه به‌طور کلی از دینامیک تک‌سیکله به‌عنوان دینامیک چهارپره همراه با کنترل‌کننده محلی استفاده می‌شود، اما برای داشتن دینامیک دقیق چهارپره موردنظر، نیاز به شناسایی آن است. تاکنون روش‌های مختلفی برای شناسایی انواع سیستم‌ها ارائه شده است. روش حداقل‌مربعات از بارزترین و پرکاربردترین روش‌ها برای شناسایی سیستم‌های ساده خطی و نامتغیر با زمان است [۱۴]. در مراجع [۱۵] و [۱۶] با استفاده از روش حداقل‌مربعات مدلی برای چهارپره استخراج شده و جهت کنترل موقعیت بکار رفته است. هم‌چنین، مرجع [۱۷] ابتدا به بررسی دکوپله بودن محورهای مختلف پرنده جهت تبدیل این سیستم چندورودی - چندخروجی به چند سیستم تک‌ورودی - تک‌خروجی پرداخته و سپس کنترل چهارپره محدود شده توسط قيود فیزیکی را مدنظر قرار داده است.

در مقاله حاضر با توجه به دینامیک تک‌سیکله که نشان می‌دهد، دینامیک جهت‌های افقی نسبت به هم دکوپله هستند و هم‌چنین با توجه به نتایج ارائه شده در مراجع [۱۶] و [۱۷] و مدل عملکردی چهارپره همراه با حلقه کنترل داخلی در قالب سه کانال پیچ، یاو و رول به صورت دکوپله شناسایی شده است. بر اساس نتایج پروازی، عملکرد هر سه محور قابل توصیف با توابع تبدیل خطی بوده و با استفاده از این مدل‌ها دقت قابل قبول در ردیابی تأمین خواهد شد. برای تخمین پارامترهای این توابع تبدیل نیز از روش حداقل‌مربعات استفاده شده است. در انتها با استفاده از مدل‌های شناسایی شده، کنترل‌کننده‌ای جهت ردیابی مسیر مرجع بکار رفته است. لازم به ذکر است که در این مقاله مسیرهای مرجع ورودی براساس زاویه مطلوب یاو و سرعت‌های مطلوب افقی توصیف می‌گردد. برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده مبتنی بر مدل شناسایی شده نیز یک سیستم ضبط حرکت با دقت بالا برای استخراج مسیر پروازی پرنده توسعه داده شده و بکار رفته است.

در ادامه مقاله، در بخش دوم چهارپره تجاری مورد نظر معرفی خواهد شد. در بخش سوم مدل دینامیکی پرنده ارائه

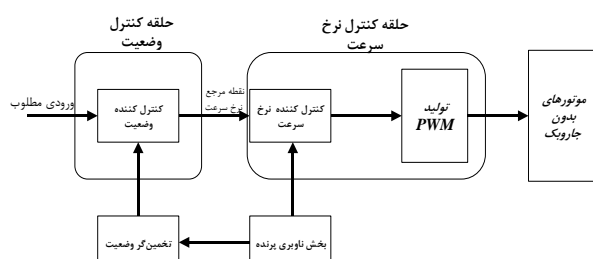
ویژگی‌های دینامیکی و ساختار مناسب برای شناسایی چهارپره

ساختار اولیه کنترل‌کننده‌های درونی این پرنده از دو حلقه تشکیل شده‌است. حلقه اول یک کنترل‌کننده وضعیت می‌باشد. در این کنترل‌کننده سیگنال مرجع نرخ سرعت از اختلاف بین تخمین وضعیت و نقطه مرجع وضعیت و با استفاده از کنترل‌کننده PI استخراج می‌شود. حلقه دوم جهت کنترل نرخ سرعت از یک کنترل‌کننده ساده تناسبی برای کنترل موتورها استفاده می‌کند. دیاگرام بلوکی ساختار کنترلی به‌همراه حلقه‌های آن در شکل ۱ آورده شده‌است.

خروجی‌هایی که این پرنده در اختیار کاربر قرار داده است شامل زوایای اوپلری پرنده (پیچ، رول، یاو)، ارتفاع و سرعت‌های خطی در سه راستا می‌باشد. ورودی‌های در دسترس کاربر نیز شامل سرعت در راستاهای سه‌گانه دستگاه مختصات کارترین و سرعت چرخشی حول محور عمودی می‌باشد.

نحوه عملکرد به این صورت است که انحراف در زاویه پیچ باعث حرکت روبه‌جلو در راستای طولی پرنده می‌شود. همچنین انحراف در زاویه رول باعث حرکت پرنده در راستای جانبی خواهد شد. سرعت حرکت چهارپره در هر راستا متناسب با میزان این انحراف‌ها است. به عبارتی هرچه انحراف حول محور پیچ بیشتر باشد، سرعت پرنده در راستای طولی بیشتر و هرچه انحراف حول محور رول بیشتر باشد، سرعت پرنده در راستای جانبی بیشتر خواهد شد.

در شکل ۲ ساختار دیاگرام‌بلوکی عملکرد چهارپره مورد نظر آورده شده‌است. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، بلوک اول دستورات لازم را دریافت کرده و دستورات را به میزان انحراف در راستای پیچ، یاو و رول تبدیل کرده و بلوک دوم این تغییرات را به سرعت در راستای طولی و جانبی و همچنین میزان زاویه حول محور عمودی تبدیل می‌نماید.



شکل ۱ - دیاگرام بلوکی ساختار کنترلی چهارپره

شده و نحوه شناسایی مدل چهارپره شرح داده خواهد شد. در بخش چهارم این مقاله کنترل‌کننده بررسی شده و در بخش پنجم نتایج حاصل از پیاده‌سازی کنترل‌کننده بر روی پرنده آورده شده‌است. در پایان نیز جمع‌بندی و اقدامات آتی ارائه خواهد شد.

معرفی پرنده تجاری بکار گرفته شده

پرنده بکار گرفته‌شده در این پژوهش، چهارپره هوشمند ارزان قیمت با عنوان تجاری Ardrone2 است. این چهارپره دارای چهار موتور با ساختار صلیبی شکل است که با تغییر سرعت‌زاویه‌ای چهار موتور الکتریکی کنترل می‌شود. در کنار هر موتور بدون جاروبک یک میکروکنترلر ATmega8L و یک قطع‌کننده که در مقابل برخوردهای احتمالی موتورها را خاموش می‌کند، وجود دارد. چهارپره دارای شش درجه آزادی است در حالی که توسط چهار ورودی کنترل می‌شود؛ لذا این پرنده یک سیستم زیرتحریر است [۱۸].

به‌لحاظ سیستم تأمین توان الکتریکی، پرنده دارای یک باتری با سه سلول با قابلیت شارژ مجدد با ولتاژ ۱۱/۱ ولت و ۱۰۰ میلی‌آمپر ساعت است که وزن آن ۸۰ گرم می‌باشد. این باتری قابلیت پرواز پرنده به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه را دارد [۱۹].

این پهپاد از یک سیستم ناوبری اینرسی ارزان قیمت میکروالکترومکانیکی استفاده می‌کند که شامل ژایروسکوپ، شتاب‌سنج، مغناطیس‌سنج، گیرنده سیستم موقعیت‌یابی جهانی و هم‌چنین ارتفاع‌سنج اولتراسونیک است. در کنار حسگرها یک برد الکترونیکی با پردازشگر ۱۶بیتی PIC با سرعت پردازش ۴۰ مگاهرتز به‌عنوان برد ناوبری بکار گرفته شده‌است. سرعت به‌روزرسانی داده‌های ناوبری ۳۰ هرتز است. علاوه‌براین، بخش ناوبری این چهارپره مجهز به یک دوربین HD جهت فیلمبرداری و عکس‌برداری است [۱۹].

سیستم ارتباطی پرنده دارای یک ارتباط Wi-Fi و همچنین یک درگاه سریال از نوع USB است. پردازشگر استفاده‌شده در آن از نوع ARM9 با 128Mb است و سیستم عامل آن از نوع LinuxBox است [۲۰]. از طرفی پرنده دارای کنترل‌کننده داخلی است که وظیفه پایدارسازی و هم‌چنین کنترل اعمال دستورات به پرنده را برعهده دارد.

شناسایی پرنده در راستای x

همان طور که در دیاگرام بلوکی شکل ۲ مشاهده می شود برای حرکت در راستای محور x، ابتدا دستور اولیه به انحراف در راستای کانال پیچ منجر شده و این انحراف باعث ایجاد سرعت در راستای مورد نظر می شود. بر این اساس، جهت دستیابی به مدل مناسب از این کانال، برای هر بخش یک تابع تبدیل در نظر گرفته شده و پارامترهای آن تخمین زده می شود.

لازم به ذکر است که از میان مدل های قابل بکارگیری برای توصیف عملکرد هر یک از کانال ها، مدلی که از دقت کافی برخوردار بوده و از مرتبه پایین تری برخوردار است، بکار گرفته خواهد شد. برای ارزیابی میزان مناسب بودن مدل های دارای مرتبه متفاوت، معیارهایی از قبیل معیار اطلاعاتی Akaike [۲۳] وجود دارد که با توجه به ماهیت کاربردی موضوع مقاله و وجود حلقه کنترل کننده داخلی در چهارپره، ضرورتی برای استفاده از این معیارها احساس نشده و مدل مناسب به صورت تجربی و بر اساس خروجی عملکردی سیستم انتخاب شده است.

شناسایی مدل حول محور پیچ

باتوجه به نوسانات مشاهده شده در داده های اندازه گیری شده در راستای پیچ، ابتدا یک مدل درجه دوم برای سیستم در نظر گرفته می شود؛ سپس با استفاده از روش حداقل مربعات خطا پارامترهای مدل مرتبه دوم به صورت رابطه (۱) تخمین زده می شود:

$$P = \frac{\alpha_0 z}{z^2 - \alpha_2 z - \alpha_1} v_p \Rightarrow \quad (1)$$

$$p(k+1) = \alpha_2 p(k) + \alpha_1 p(k-1) + \alpha_0 v_p(k)$$

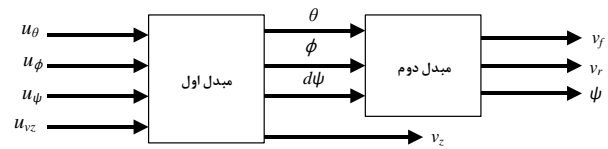
با استفاده از تعداد کافی از مشاهدات و براساس روش حداقل مربعات می توان رابطه (۲) را نوشت:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0 & p_{-1} & v_{p_0} \\ p_1 & p_0 & v_{p_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n-1} & p_{n-2} & v_{p_{n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \alpha_1 \\ \alpha_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\Rightarrow P = AX$$

با استفاده از روابط تخمین حداقل مربعات خطا، پارامترهای مدل مرتبه دو عبارت خواهند شد با:

$$\underline{X} = [1.1167 \quad -0.1627 \quad 0.0332]$$



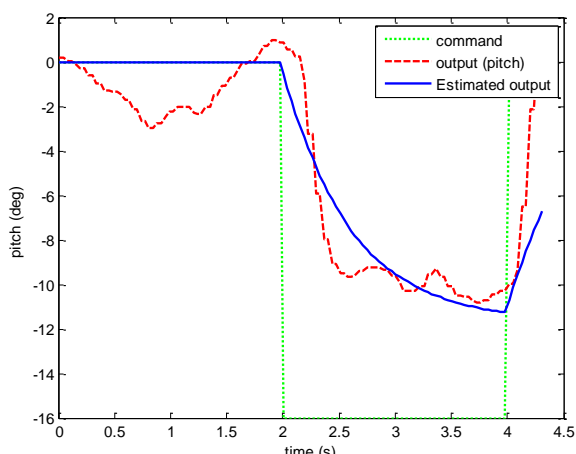
شکل ۲ - دیاگرام بلوکی ساختار عملکردی چهارپره

به طور معمول، برای توصیف موقعیت و وضعیت چهارپره دو چهارچوب اینرسی و بدنی در نظر گرفته می شود. در این مقاله برای سادگی در ارائه مباحث و بدون از دست دادن عمومیت راهکار پیشنهادی، فرض شده است که پرنده در ابتدای آزمایش در راستای مبدأ دستگاه اینرسی در یک ارتفاع مشخص و به صورت موازی با سطح زمین قرار گرفته است و محورهای هر دو دستگاه مختصات موازی با یکدیگر می باشند.

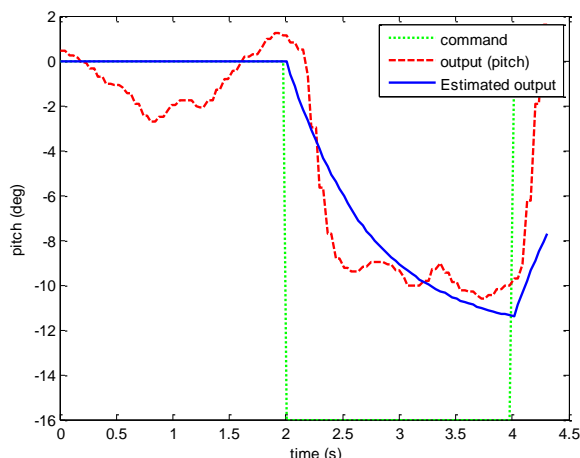
در مقالات، دینامیک این گونه وسایل را توسط دینامیک غیرخطی تک-سیکله توصیف می کنند [۲۱]. دینامیک تک-سیکله، مدل ساده شده ای از دینامیک این چهارپره ها است. دینامیک این سیستم ها، به صورت دینامیک با شش درجه آزادی توصیف می گردد که با استفاده از کنترل محلی بر روی وسیله نقلیه، مدل سیستم برای کنترل کننده راه دور به صورت مدل دینامیک تک-سیکله بازنویسی می گردد [۲۱ و ۲۲]. با توجه به این توضیحات و همچنین مدل عملکردی توصیف شده در این بخش و همچنین باتوجه به نتایج ارائه شده در مراجع [۱۶] و [۱۷]، سه کانال پیچ، یاو و رول این چهارپره همراه با حلقه کنترل داخلی آن دارای مدل عملکردی دکوپله از یکدیگر بوده و می توانند مجزای از یکدیگر شناسایی گردند.

باتوجه به توضیحات ارائه شده درخصوص دکوپله بودن محورها از یکدیگر و همچنین ساختار عملکردی تشریح شده برای این چهارپره، مدل مناسب سیستم شامل دو تابع تبدیل برای محورهای افقی و یک تابع تبدیل برای محور عمودی می باشد. یک تابع تبدیل رابطه بین دستور ورودی با انحراف زوایا و تابع تبدیل دوم رابطه بین زوایای رول و پیچ و سرعت در راستای مربوطه را مدل می نمایند. در ادامه مقاله، با استفاده از اعمال ورودی به هر کانال و جمع آوری داده ها، پارامترهای تابع تبدیل هر کانال مشخص خواهد شد. به عنوان ورودی نیز همانند اغلب کاربردهای شناسایی از سیگنال پله استفاده شده است؛ چراکه این سیگنال ورودی، یک تحریک پایا برای تحریک و شناسایی سیستم است و حاوی مودهای فرکانس پایین در بخش ثابت و مودهای فرکانس بالا در هنگام پرش است.

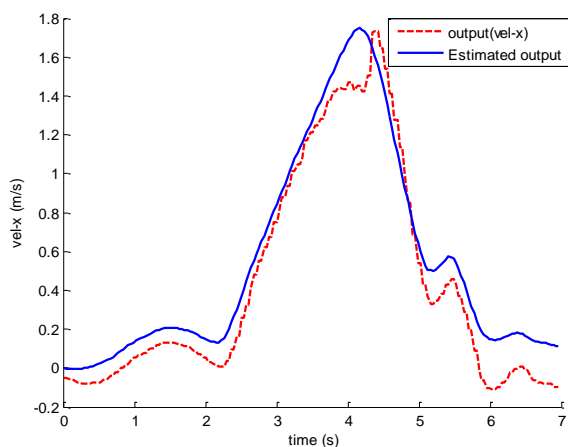
تابع تبدیل مدل مرتبه اول و پارامترهای تخمین زده شده آن از دقت مناسب برخوردار می‌باشند.



شکل ۳ - تخمین مرتبه دو سیستم حول محور پیچ



شکل ۴ - تخمین مرتبه اول سیستم حرکت حول محور پیچ



شکل ۵ - تخمین مدل سرعت در راستای x از زاویه پیچ

شکل ۳، نتایج مقایسه شبیه‌سازی مدل شناسایی شده و داده‌های جمع‌آوری شده از آزمایش را نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصل از شکل ۳، خروجی حاصل از شبیه‌سازی در راستای پیچ با خروجی واقعی تفاوت کمی دارد. این تفاوت به دلیل وجود نویز اندازه‌گیری، اغتشاش و همچنین دینامیک‌های مدل نشده‌ای است که در مدل در نظر گرفته نشده است. از طرفی رفتار کلی خروجی نشان می‌دهد که تخمین به دست آمده رفتار مرتبه اول دارد؛ لذا می‌توان مدل ساده‌تر مرتبه اول را در نظر گرفت. پارامترهای این مدل مرتبه اول با استفاده از روش حداقل مربعات خطا عبارت است از:

$$\underline{X} = [\alpha_1 \quad \alpha_0] = [0.9523 \quad 0.0363]$$

در شکل ۴ شبیه‌سازی مدل مرتبه اول شناسایی شده با نتایج اندازه‌گیری مقایسه شده است. شکل ۴ به خوبی نشان می‌دهد که تابع تبدیل درجه اول در نظر گرفته شده، حرکت پرنده در راستای پیچ را به خوبی مدل می‌کند. به عبارت دیگر تابع تبدیل درجه اول و پارامترهای شناسایی شده آن دارای دقت مناسب است.

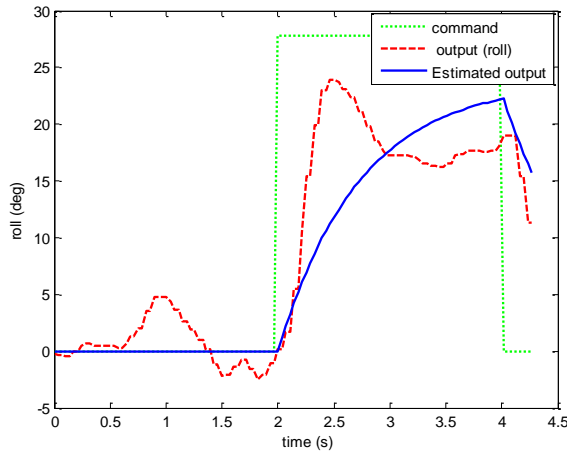
شناسایی مدل سرعت در راستای x نسبت به زاویه انحراف پیچ

همان‌طور که گفته شد میزان انحراف زاویه پیچ مشخص کننده میزان سرعت در جهت بردار X است. با روشی مشابه آنچه در خصوص شناسایی مدل حول محور پیچ ارائه شد، می‌توان به این نتیجه رسید که یک تابع تبدیل مرتبه اول برای توصیف رابطه بین زاویه پیچ و سرعت در راستای محور X از دقت کافی برخوردار است. نتایج تخمین پارامترهای مدل عبارت خواهد بود از:

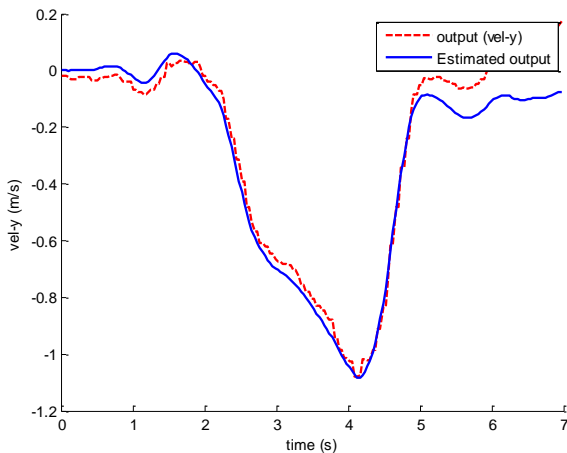
$$\underline{X} = [\alpha_1 \quad \alpha_0] = [0.9896 \quad -0.0043]$$

از ارائه نتایج مدل‌های مرتبه بالاتر برای استفاده بهینه از فضای مقاله خودداری شده است.

در شکل ۵ تخمین مدل سرعت در راستای X بر اساس مقدار زاویه پیچ به همراه مقدار اندازه‌گیری شده آن نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است سرعت اندازه‌گیری شده پرنده با سرعت حاصل از شبیه‌سازی مدل شناسایی شده رفتار یکسانی دارند. این تطابق نشان می‌دهد که



شکل ۶ - تخمین مرتبه اول سیستم در راستای رول



شکل ۷ - تخمین مدل سیستم سرعت در راستای زاویه رول

شناسایی پرنده حول محور یاو

با روشی مشابه آنچه در خصوص شناسایی مدل حول محور رول و پیچ ارائه شد، می‌توان به‌این نتیجه رسید که استفاده از تابع تبدیل مرتبه اول برای توصیف رابطه بین یاو و فرمان ورودی از دقت کافی برخوردار است. براین اساس مدل مورد استفاده برای این محور مطابق رابطه (۳) خواهد بود:

$$Y = \frac{z\alpha_0}{z-\alpha_1} v \quad (3)$$

در این مدل فرمان ورودی از جنس سرعت و خروجی از جنس زاویه بوده و هدف تخمین پارامترهای α_0 و α_1 مدل است. برای تخمین این پارامترها از داده‌های اندازه‌گیری شده و روش حداقل مربعات خطا استفاده می‌شود و مقادیر بدست آمده برای پارامترهای مدل عبارتند از:

$$\underline{X} = [\alpha_1 \quad \alpha_0] = [1.0006 \quad 0.0983]$$

همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد که در شرایط اولیه اختلاف وجود دارد. در تحلیل این نتایج می‌توان گفت که در فرآیند تخمین پارامترهای تابع تبدیل، شرایط اولیه صفر در نظر گرفته می‌شود و اثر شرایط اولیه در استخراج تابع تبدیل دیده نمی‌شود. بنابراین این اختلاف در ابتدای نمودار به‌علت وجود شرایط اولیه غیرصفر در سیستم واقعی است.

شناسایی پرنده در راستای محور y

برای این محور نیز ابتدا ضرایب تابع تبدیل ارتباط بین فرمان زاویه رول با انحراف در زاویه رول شناسایی می‌گردد و سپس ارتباط دینامیکی بین زاویه رول و سرعت در راستای محور y استخراج می‌شود.

شناسایی مدل حول محور رول

برای تخمین پارامترهای سیستم حول محور رول همانند قبل، از مدل درجه اول استفاده می‌شود و از روش حداقل مربعات خطا و براساس مشاهدات حاصل از آزمایش‌های پروازی، پارامترهای مدل تخمین زده می‌شوند؛

$$\underline{X} = [\alpha_1 \quad \alpha_0] = [0.9175 \quad 0.0289]$$

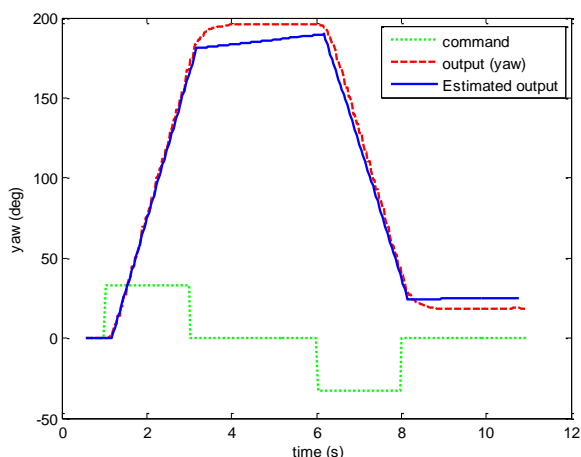
نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تست آزمایشگاهی برای مدل مرتبه اول شناسایی شده حول محور رول در شکل ۶ آورده شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد که تخمین انجام شده براساس حداقل مربعات و همچنین تابع تبدیل در نظر گرفته شده حول محور رول به‌خوبی بیانگر رفتار پرنده است.

شناسایی مدل سرعت در راستای y نسبت به انحراف زاویه رول

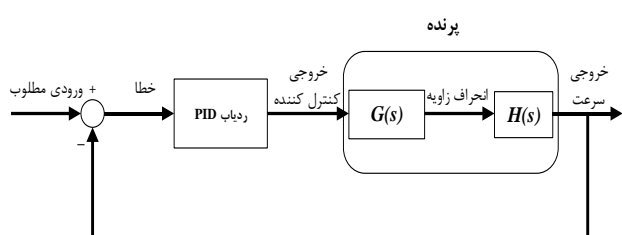
همان‌طور که گفته شد حرکت چهارپره در راستای محور y مستلزم تغییر در زاویه رول است؛ لذا می‌توان رابطه دینامیکی بین زاویه رول و سرعت در محور y را با یک معادله مرتبه اول مدل کرد. همانند بخش قبلی پارامترهای مدل مرتبه اول با استفاده از روش حداقل مربعات به‌دست می‌آیند:

$$\underline{X} = [\alpha_1 \quad \alpha_0] = [0.9744 \quad -0.0055]$$

در شکل ۷ تخمین مدل سرعت در راستای y براساس مقدار زاویه رول به‌همراه مقدار اندازه‌گیری شده آن نمایش داده شده است. شکل ۷ بیانگر تطبیق مناسب مدل شناسایی شده و رفتار پرنده در حرکات جانبی است.



شکل ۸ - خروجی زاویه یاو در دو حالت واقعی و نتیجه حاصل از تخمین مرتبه اول برای رابط نرم‌افزاری دوم



شکل ۹ - دیاگرام بلوکی کلی کنترل کننده و پرنده

دستورات به موتورها بکار می‌روند. علاوه بر آن یک حلقه ردیابی به صورت متوالی برای کنترل موقعیت بر اساس مدل‌های شناسایی شده در محیط شبیه‌سازی و همچنین محیط عملیاتی پیاده‌سازی شده است.

با اعمال کنترل کننده واقعی طراحی شده روی چهارپره و دادن فرمان و اندازه‌گیری نتایج خروجی، شکل ۱۰ به دست می‌آید. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، میزان زاویه یاو چهارپره از سیگنال ورودی پیروی کرده است.

شکل ۱۱ فرمان سرعت در راستای x و مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر آن را در حضور کنترل کننده نشان می‌دهد. در شکل ۱۲ نیز نتیجه آزمایش عملی کنترل کننده سرعت در راستای محور y نشان داده شده است.

همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است پرنده، سیگنال فرمان را با یک دینامیک دنبال کرده و پس از حدود ۲ ثانیه به مقدار فرمان می‌رسد. برای ارزیابی کمی خطای اجرای فرامین سرعت در محورهای x و y و همچنین مقایسه عملکرد ردیاب طراحی شده برای این دو کانال از معیار خطای جذر مجموع مربعات خطا (RSSE) استفاده شده است [۲۱]. اندازه این

در شکل ۸ نمودار خروجی کانال یاو به همراه خروجی به دست آمده از طریق شبیه‌سازی مدل شناسایی شده رسم شده است. در این آزمایش در فاصله زمانی یک تا سه ثانیه فرمان سرعت زاویه‌ای در راستای ساعت‌گرد صادر شده و زاویه یاو افزایش یافته است. در فاصله زمانی سه تا شش ثانیه فرمان سرعت صفر بوده و زاویه یاو تقریباً ثابت بوده است. در فاصله شش تا هشت ثانیه فرمان سرعت در راستای پادساعت‌گرد صادر شده و چهارپره را تقریباً به مبدأ اولیه خود بازگردانده است.

همان‌طور که از شکل ۸ مشخص می‌باشد، نتایج حاصل از خروجی واقعی در راستای کانال یاو با آنچه خروجی شبیه‌سازی می‌باشد، نتایج تقریباً یکسان دارند. لازم به ذکر است که چهارپره به کار گرفته شده بسیار ارزان قیمت بوده و دقت مورد انتظار تأمین شده است.

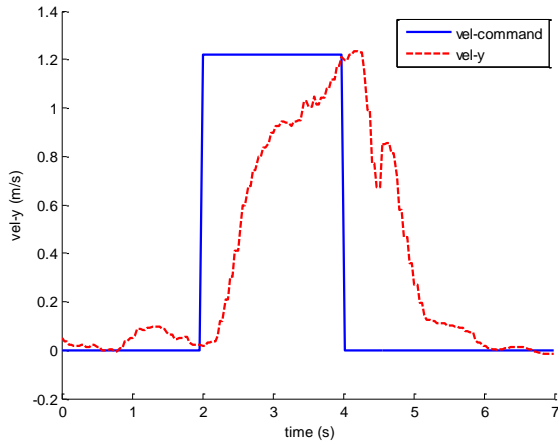
طراحی کنترل کننده

همان‌طور که گفته شد، موضوع اصلی مقاله حاضر طراحی کنترل کننده نیست و از نقطه نظر این مقاله، کنترل کوادروتور روی مسیر فقط برای صحت‌سنجی مدل شناسایی شده انجام گرفته است. بر این اساس، جهت افزایش کارایی و رسیدن به پاسخ مطلوب، کنترل کننده با استفاده از شبیه‌سازی مدل شناسایی شده طراحی شده و سپس بر روی سیستم اصلی پیاده‌سازی و تنظیم نهایی گردیده است. لازم به ذکر است که با توجه به کنترل پذیر و پایدار بودن چهارپره به کمک اتوپایلوت نصب شده بر روی آن، امکان تست‌های متعدد چهارپره در شرایط مختلف وجود دارد و تنها خطای ردیابی مسیرها متفاوت خواهد بود. بنابراین طراحی کنترل کننده به روش سعی و خطا و با تنظیم به ترتیب گین‌های تناسبی، مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر در طی چندین مرحله شبیه‌سازی و آزمایش متوالی انجام گرفته است.

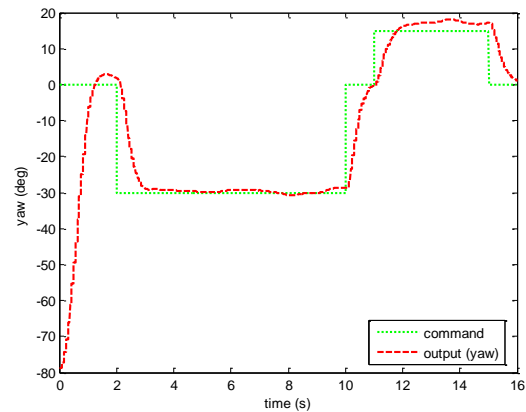
برای کنترل زوایا از کنترل کننده PID به عنوان کنترل کننده داخلی و برای کنترل سرعت در هر کانال کنترل کننده PID که در اصل دارای نقش کنترل ردیاب می‌باشد، استفاده شده است. در شکل ۹ نمایی از دیاگرام بلوکی کلی پرنده به همراه کنترل کننده ارائه شده است.

کنترل کننده‌های سیستم کنترل و ناوبری ارزان قیمت چهارپره در داخل بلوک پرنده جهت پایدارسازی و کنترل

معیار برای خطای محور X برابر با ۱۹/۱ و برای خطا در محور Y برابر با ۲۵/۲ است.



شکل ۱۲ - نتیجه آزمایش عملی کنترل کننده سرعت در راستای Y با ضریب بهره ۱۰



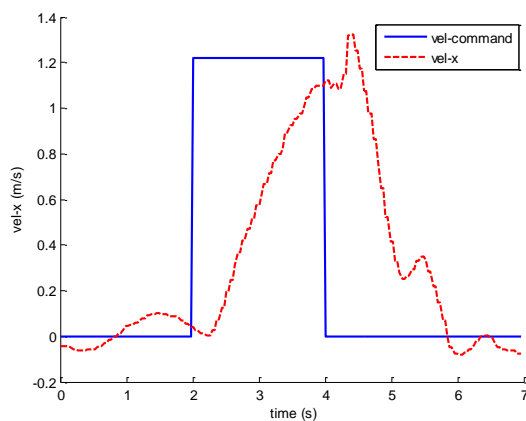
شکل ۱۰ - شکل موج فرمان در راستای چرخش Z و خروجی چهارپره در حضور کنترل کننده با ضریب بهره ۱۰ و ضریب مشتق گیر ۵

در تحلیل عملکرد کنترل سرعت در راستاهای X و Y بایستی توجه داشت که در آزمایش اول (شکل ۱۱)، فرمان ردیابی یک خط مستقیم در راستای X به پرنده صادر شده و انتظار آن بوده است که فرمان و همچنین تغییرات سرعت در راستای Y کم باشد. در شکل ۱۲ نیز، فرمان سرعت در راستای محور Y اعمال شده و هدف حفظ سرعت صفر در راستای محور X بوده است. در هر دو آزمایش از ارائه نمودار سرعت دوم (سرعت صفر) خودداری شده است.

در تحلیل نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، طبق توضیحات قبلی مقاله بایستی در نظر داشت که برای رسیدن به یک سرعت در راستاهای X و Y به ترتیب نیاز به تغییر زوایای پیچ و رول می‌باشد. به مرور که زوایای پرنده به مقادیر مورد نظر می‌رسد، سرعت نیز افزایش می‌یابد. بنابراین نباید انتظار داشت پرنده بتواند فرمان پله را به‌طور کامل دنبال کند و تأخیر در انجام فرامین و دینامیک‌های مرتبه بالا در پاسخ توجیح‌پذیر به‌نظر می‌رسد. اغتشاشاتی نیز در سیستم و محیط به‌وجود می‌آید که باعث تغییر زاویه و ایجاد سرعت‌های ناخواسته در کانال‌های X و Y می‌گردد. براین اساس نوسانات حول فرمان سرعت صفر نیز منطقی به‌نظر می‌رسد. همچنین سیستم ناوبری این پرنده نیز از دقت پایینی برخوردار است و بخشی از نوسانات نمایش داده شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز مربوط به دقت این سیستم می‌باشد.

نتایج حاصله از تست عملیاتی نشان می‌دهد که تخمین پارامترهای مدل‌ها از دقت مناسبی برخوردار بوده و به عملکرد در حد انتظار کنترل کننده منتهی شده است. همچنین تطبیق

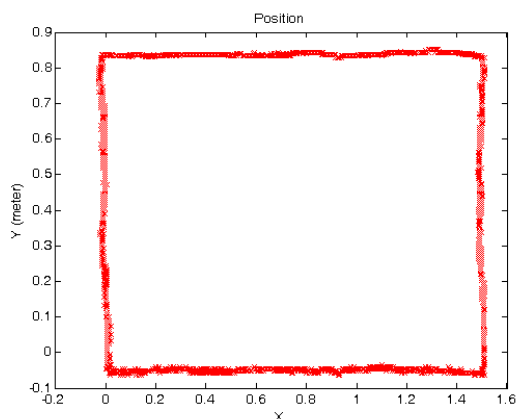
باید در نظر داشت که دقت مورد نیاز در ردیابی مسیرهای مستقیم در راستای X و Y براساس مطالبات مأموریت جستجوی منطقه تعیین می‌شود. هدف پروژه تأمین پوشش کامل منطقه‌ی جستجو است؛ بنابراین با در نظر گرفتن همپوشانی محدوده تصویربرداری چهارپره در هر مسیر جاروب کردن، نباید خطای ردیابی از حدی بیشتر شود که در بین دو جاروب مجاور، فضای بدون پوشش باقی بماند. در مجموع می‌توان گفت شناسایی و کنترل ارائه شده در این مقاله، با در نظر گرفتن همپوشانی متعارف بین رد زمینی دو مسیر جاروب مجاور، توانسته است پوشش کامل منطقه جستجو را تأمین نماید. به عبارت دیگر ناحیه جا افتاده‌ای بین هیچ دو مسیر پوشش مجاور بوجود نیامده است.



شکل ۱۱ - نتیجه آزمایش عملی کنترل کننده سرعت در راستای X با ضریب بهره ۱۰



شکل ۱۳ - سیستم یکپارچه ضبط حرکت مبتنی بر چهار کینکت



شکل ۱۴ - موقعیت تخمین زده شده پرنده توسط دوربین کینکت



شکل ۱۵ - نمایی از سناریوی جستجو و ردیابی اهداف متحرک زمینی در محوطه آزمایشگاه توسط دو چهارپره

با توجه به تحلیل‌های ارائه‌شده و همچنین آزمایش‌های انجام شده، کانال‌های حرکت طولی، حرکت جانبی و حرکت حول محور عمودی به‌صورت مجزای از یکدیگر شناسایی شده‌اند. اثر انحراف در زوایای پیچ و رول، تغییرات سرعت در راستای محورهای طولی و عرضی است؛ لیکن انحراف حول محور عمودی تنها به چرخش پرنده حول محور عمودی در دستگاه بدنی منتهی می‌گردد. براین اساس برای توصیف کانال یاو، یک مدل درجه یک بکار گرفته شد ولی برای کانال‌های عرضی و طولی، دو تابع تبدیل درجه یک به‌صورت سری استفاده شد. ورودی تابع تبدیل اول دستور تغییر زاویه حول محورهای طولی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تست عملیاتی نشان دهنده انتخاب مناسب تابع تبدیل برای هر کانال است.

ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده با استفاده از سیستم ضبط حرکت

برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد مدل شناسایی‌شده و کنترل‌کننده طراحی‌شده از یک سیستم ضبط حرکت مبتنی بر دوربین‌های کینکت استفاده شده است. سیستم ضبط حرکت پیاده‌سازی‌شده (شکل ۱۳) با استفاده از چهار کینکت، محدوده حرکت چهارپره به ابعاد ۳ در ۶ متر مربع را پوشش داده و با دقت $\pm 1\text{cm}$ و با نرخ تأمین داده ۲۰ هرتز اهداف موردنظر را مکان‌یابی می‌نماید.

شکل ۱۴ نتیجه حاصل از پیمودن یک مسیر مربع‌شکل توسط پرنده و محاسبه موقعیت آن با استفاده از دوربین‌های کینکت را نشان می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، این شکل نقاطی که به‌عنوان موقعیت طولی و عرضی پرنده به‌صورت لحظه‌ای توسط کینکت گزارش شده را نمایش می‌دهد. مسیری که پرنده در طول این تست پیموده مسیری مربع شکل به طول ۱۵۰ سانتی‌متر و عرض ۹۰ سانتی‌متر بوده و کنترل‌کننده ارائه‌شده در این مقاله به‌خوبی مسیر مربع‌شکل موقعیت پرنده را ردیابی نموده است. در این شکل خطای موقعیت حداکثر به ۲ سانتی‌متر می‌رسد که ناشی از دقت کنترل‌کننده و دقت سیستم مکان‌یابی بیرونی می‌باشد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است مسیر پیموده‌شده به مسیر مرجع نزدیکی زیادی دارد.

از کنترل‌کننده پیشنهادی این مقاله در ارزیابی آزمایشگاهی الگوریتم‌های همکاری پهپادها برای جستجو و ردیابی اهداف متحرک زمینی نیز استفاده شده است. هدف نهایی از این پژوهش، بکارگیری کنترل‌کننده طراحی‌شده به‌منظور ارزیابی آزمایشگاهی الگوریتم پیشنهادی در مرجع [۲۴] می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل یک چهارپره تجاری همراه با سیستم کنترل و ناوبری ارزان‌قیمت نصب‌شده بر روی آن به‌کمک داده‌های پروازی شناسایی شده است. از مدل شناسایی‌شده برای طراحی یک کنترل‌کننده بیرونی استفاده شده تا عملکرد پرنده در ردیابی مسیرهای مرجع بهبود یابد.

کنفرانس سیستم‌های هوشمند ایران، صفحات ۳۷۳-۳۷۸، زمستان ۱۳۹۲.

- [5] Fang, Z., Gao, W., "Adaptive Integral Backstepping Control of a Micro-Quadrotor", 2nd International Conference in Intelligent Control and Information Processing, ICICIP, Vol. 2, pp. 910-915, 2011.
- [6] Lai, L., Yang, C.C., Wu, C.J., "Time Optimal Control of a Hovering Quad-rotor Helicopter", Journal of Intelligent and Robotics Systems, Vol. 45, No. 2, pp.115-135, 2006.
- [7] Chen, F., Jiang, R., Zhang, K., Jiang, B., Tao, G., "Robust Backstepping Sliding-Mode Control and Observer-Based Fault Estimation for a Quadrotor UAV", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, No. 8, pp. 5044-5056, Aug, 2016.
- [8] Liu, H., Bai, Y., Lu, G., Shi, Z., Zhong, Y., "Robust Tracking Control of a Quadrotor Helicopter", J. Intell. Robot. Syst., Vol. 75, No. 3-4, pp. 595-608, September 2014.
- [9] Castillo, P., Dzul, A., Lozano, R., "Real-time stabilization and tracking of a four-rotor mini rotorcraft", IEEE Trans. Control Syst. Technol., Vol. 12, No. 4, pp. 510-516, July 2004.
- [10] Tan, C.K., Wang, J., Paw, Y.C., Ng, T.Y., "Tracking of a moving ground target by a quadrotor using a backstepping approach based on a full state cascaded dynamics", Appl. Soft Comput., Vol. 47, pp. 47-62, Oct. 2016.
- [11] Nelson, D.R., Barber, D.B., McLain, T.W., Beard, R.W., "Vector Field Path Following for Miniature Air Vehicles", IEEE Trans. Robot., Vol. 23, No. 3, pp. 519-529, June 2007.
- [12] Zhao, B., Xian, B., Zhang, Y., Zhang, X., "Nonlinear Robust Adaptive Tracking Control of a Quadrotor UAV Via Immersion and Invariance Methodology", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 5, pp. 2891-2902, May 2015.
- [13] Choi, Y., Ahn, H., "Nonlinear Control of Quadrotor for Point Tracking: Actual Implementation and Experimental Tests", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 20, No. 3, pp. 1179-1192, June 2015.
- [14] Karrari, M., "System Identification", Amirkabir University of Technology Tehran Polytechnic Press, 2010.

و عرضی پرنده و خروجی آن انحراف واقعی زاویا و ورودی تابع تبدیل دوم انحراف زاویا و خروجی آن سرعت در راستاهای موردنظر است. پارامترهای این توابع تبدیل با استفاده از روش حداقل مربعات که داده‌های آن از تست‌های عملی استخراج شده است، شناسایی گردید. به کمک مدل‌های شناسایی شده، یک کنترل کننده PID برای حلقه بیرونی ردیابی پیاده‌سازی شد. از این کنترل کننده جهت ارزیابی صحت مدل‌های بکارگرفته شده و همچنین پارامترهای تخمین زده شده، در محیط آزمایشگاهی استفاده شد. نتایج این آزمایش‌ها بر روی چهارپره نشان می‌دهد که توابع تبدیل و پارامترهای تخمین زده شده می‌تواند دقت مورد نیاز برای ردیابی مسیرهای طراحی شده برای پوشش منطقه جستجو را فراهم نماید.

موضوعات بررسی شده در این مقاله اولین قدم در راستای طراحی و پیاده‌سازی یک سناریوی همکاری پهبادهای برای جستجو و ردیابی اهداف متحرک زمینی بر روی یک منطقه مرزی وسیع می‌باشد. دستیابی به این هدف مستلزم پژوهش‌های فراوانی در زمینه طراحی سناریوی همکاری، طراحی مسیر، بهبود قانون هدایت و ... می‌باشد که در پژوهش‌ها و مقالات آتی به آن پرداخته خواهد شد.

مراجع

- [۱] مدیرروستا، علیرضا، خدابنده، مهدی، "طراحی یک روش کنترل مد لغزشی انتگرالی تطبیقی برای پایدارسازی زمان محدود و مقاوم پرنده چهار ملخه"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحات ۳۲۱-۳۳۲، ۱۳۹۵.
- [2] Huang, H., Hoffmann, G.M., Waslander, S.L., Tomlin, C.J., "Aerodynamics and Control of Autonomous Quadrotor Helicopters in Aggressive Maneuvering", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009.
- [3] Bouabdallah, S., Siegwart, R., "Backstepping and Sliding-Mode Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor", Proceedings of the International Conference in Robotics and Automation, ICRA, IEEE, pp. 2247-2252, April 2005.
- [۴] نوبهاری، هادی، شریفی، علیرضا، "پیاده‌سازی فرود خودکار یک چهارپره مبتنی بر استفاده از کنترل کننده مود لغزشی و فیلتر پیوسته توده‌ای مورچه‌ها با در نظر گرفتن اثر زمین"، دوازدهمین

- [15] Krajnik, T., Vonasek, V., Fiser, V., Faigl, J., "AR-Drone as a Platform for Robotic Research and Education", International Conference on Research and Education in Robotics, pp. 172-186, 2011.
- [16] Sa, I., Corke, P., "Estimation and Control for an Open-Source Quadcopter", Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation, Monash University, Melbourne Australia, pp. 7-9, December 2011.
- [17] فرج‌زاده، محمد قاسم، شیخ بهایی، رضا، شرکا، مجید، حسینی ثانی، کمال، مدل‌سازی و کنترل یک درجه آزادی چهارپره بر پایه کنترل کننده پیش‌فاز گسسته، بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی برق، ۱۳۹۲.
- [18] Carrillo, L.R.G., Lopez, R., Pegard, C., "Modeling the Quad-Rotorcraft, In Quad Rotorcraft Control", Springer, pp. 23-34, 2013.
- [19] Bristeau, P.J., Callou, F., Vissière, D., Petit, N., "The Navigation and Control Technology Inside the AR. Drone Micro UAV", Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milano, Italy, 2011.
- [20] Engel, J., "Autonomous Camera-Based Navigation of a Quadcopter", Master's Thesis, Technischen University "AT M UNCHEN, 2011.
- [21] Sadanori, K., Kitagawa, G., "Generalised information criteria in model selection", Biometrika, Vol. 83, No. 4, pp. 875-890, 1996.
- [22] خصال، محمدعلی، دهقان، سید محمد مهدی، توکلی، امیرحسین، "ارزیابی و انتخاب سناریوی مناسب پوششش هوایی مرز به کمک صفحه مجازی مکانی-زمانی"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، صفحات ۵۱۷-۵۲۵، تابستان ۱۳۹۶.
- [23] Parsa, A., Farhadi, A., "Measurement and control of nonlinear dynamics systems over the Internet (IoT): Applications in remote control of autonomous vehicles", Automatica, Vol. 95, pp. 93-103, September 2018.
- [24] پارسا، علی، فرهادی، علی‌رضا، "تخمین حالت دینامیک‌های غیرخطی بر روی کانال مخابراتی دیجیتال بدون نویز ظرفیت محدود: کاربرد در کنترل از راه دور وسایل نقلیه‌ی خودکار"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۱۳۹۶.