

رویکرد رفتارمحور برای اجرای هم‌زمان مانورهای اجتناب از مانع و تعقیب رهبر برای یک ربات پرنده

احسان زیبایی (کارشناس ارشد)

محمدعلی امیری آتسگاه* (دانشیار)

دانشکده‌ی علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

در پژوهش حاضر، یک سامانه‌ی هدایت بر مبنای رویکرد رفتارمحور ارائه می‌شود، که در آن تعقیب ربات پرنده‌ی راهبر و اجتناب از مانع به‌طور هم‌زمان انجام می‌پذیرد. تعقیب ربات راهبر و عدم برخورد با موانع موجود در مسیر حرکت وسیله‌ی پرنده، از ملازومات اساسی در پروازهای گروهی است. همچنین چالش دیگر در طراحی سامانه‌ی کنترل، کم‌عملگر بودن چهارپره است که برای غلبه بر این مشکل یک سامانه‌ی کنترل بر مبنای رویکرد وارون‌سازی دینامیکی طراحی شده است که در سازگاری کامل با سامانه‌ی هدایت قرار دارد. در ادامه، عملکرد سامانه‌ی هدایت و کنترل مذکور در یک محیط شبیه‌سازی با در نظر گرفتن اغتشاش موجود در حسگرها و همچنین تأخیر در عملگرهای چهارپره مورد بررسی قرار گرفته است، به‌گونه‌ی که سامانه‌ی پیشنهادی با بیشینه خطای ۲ متر در موقعیت و ۳/۵ متر در ارتفاع، موفق به تعقیب ربات راهبر در سناریوی پیشنهادی شده است.

واژگان کلیدی: ربات پرنده چهارپره، هدایت رفتارمحور، اجتناب از مانع، وارون‌سازی دینامیکی.

۱. مقدمه

عملکرد اجتناب از مانع نقش مهمی در اجرای موفق و ایمن مأموریت وسایل پرنده دارد. سرعت حرکتی بالا در بالای سطح زمین باعث می‌شود تا در صورت وقوع کوچک‌ترین برخورد میان وسایل پرنده و موانع موجود در مسیر، کل مأموریت با شکست مواجه شود. لزوم توسعه‌ی سیستم‌های اجتناب از مانع در صنایع هوایی با افزایش ترافیک هواپیماهای مسافری مورد توجه قرار گرفته است. در آغاز، تنها کاربر زمینی برای جلوگیری از برخورد هواپیماها تصمیم‌گیری می‌کرد ولی به تدریج سیستم‌های خودکاری نظیر «سامانه‌ی اجتناب از مانع» (TCAS) توانستند جای خود را در این صنعت بگشایند. با توسعه‌ی ربات‌های پرنده به ویژه چهارپره‌ها که توانایی پرواز در محیط‌های سربسته را دارند، نیاز به الگوریتم‌های دقیق برای اجتناب از مانع بیش از گذشته حس شده است. در حال حاضر اکثر رویکردهای موجود برای عملکرد اجتناب از مانع در ربات‌های پرنده، از زمینه‌هایی همچون مدیریت ترافیک هوایی نشأت می‌گیرد. تاکنون برای اجرای مانور اجتناب از مانع، رویکردهای مختلفی ارائه شده است. از مهم‌ترین رویکردهای اجتناب از مانع می‌توان به سه دسته‌ی «از پیش تعریف شده»، «طراحی مسیر فرار بهینه» و «الگوریتم رفتارمحور» اشاره کرد؛ در ادامه مزایا و معایب هر یک از این سه دسته تشریح می‌شود.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۶/۹، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۰/۲۸، پذیرش ۱۳۹۵/۱۱/۱۱

DOI: 10.24200/J40.2018.6393

۱.۱. اجتناب از مانع از پیش تعریف شده

این رویکرد مبتنی است بر مجموعه قوانین از پیش تعریف شده، و هیچ محاسبه‌ی اضافی برای تعیین مسیر احتراز ندارد. مزیت این روش در کاهش زمان پاسخ احتراز است. از معایب این روش می‌توان به انعطاف‌پذیری کم‌تر و بهینه نبودن مانور اشاره کرد. در برخی از منابع موجود^[۱] قابلیت اجتناب از مانع به صورت از پیش تعیین شده ارائه شده است. در این رویکرد وقتی که ربات به یک مانع نزدیک می‌شود، تمام عملگرها فقط در راستایی فعال می‌شوند که ربات را در راستای دوری از مانع مذکور قرار دهند. در نتیجه ربات به مقدار زیادی از مسیر اصلی خود منحرف خواهد شد.

۲.۱. اجتناب از مانع با طراحی مسیر فرار بهینه

در این رویکرد، اجتناب از برخورد به صورت «مسئله‌ی طراحی مسیر» فرمول‌بندی می‌شود، که از روش‌های مختلف طراحی مسیر می‌توان برای حل آن بهره برد. این روش‌ها معمولاً یک مدل سینماتیکی را با مجموعه‌ی از قیود ترکیب می‌کنند. برای مثال از این رویکرد برای اجتناب از برخورد ربات با موانع ثابت و متحرک^[۲،۳] استفاده شده است. این رویکرد نسبت به رویکرد از پیش تعیین شده دقت بالاتری دارد ولی پیاده‌سازی آن به دلیل الگوریتم‌های طراحی مسیر مشکل‌تر است.

۳.۱. اجتناب از برخورد از طریق الگوریتم رفتارمحور

الگوریتم رفتارمحور از ترکیب چندین رفتار -- شامل تعقیب راهبر، اجتناب از مانع و حفظ چیدمان -- تشکیل می‌شود. رفتار اجتناب از مانع در رویکرد رفتارمحور به صورت میدان‌های پتانسیل مصنوعی پیاده‌سازی می‌شود. مثلاً با پیاده‌سازی این رویکرد، وسایل نقلیه و موانع به صورت ذرات دارای پتانسیل فرض شده‌اند [۵۴] و از نیروهای دافعه‌ی بین این ذرات برای تولید مسیرهای فرار استفاده شده است. این روش مسیر اولیه را در حین مأموریت و براساس ضرورت اصلاح می‌کند تا از برخورد ربات با مانع جلوگیری کند. مزیت این روش در ارائه‌ی هم‌زمان رفتارهای تعقیب راهبر و اجتناب از برخورد است که باعث می‌شود مسیر طی شده‌ی نهایی تا حد امکان به مسیر اولیه نزدیک بماند. برای تکمیل کارایی سامانه‌ی حلقه‌بسته در پرواز یک ربات پرنده، علاوه بر سامانه‌ی هدایت به یک سامانه‌ی کنترل نیاز است تا مسیر تولید شده در سامانه‌ی هدایت با دقت مناسب تعقیب شود. تاکنون تحقیقات زیادی روی سامانه‌ی کنترل چهارپره صورت گرفته است. در پژوهش‌های اولیه تنها پایدارسازی زوایای چهارپره برای معلق ماندن در هوا مد نظر بود، ولی به تدریج طراحی سامانه‌ی کنترل برای تعقیب مسیر در فضای سه‌بعدی در دستور کار پژوهش‌گران قرار گرفت. روش‌های کنترل پیشنهادی برای چهارپره را می‌توان به سه دسته‌ی خطی، غیرخطی و مبتنی بر یادگیری تقسیم‌بندی کرد. از مزایای روش‌های خطی می‌توان به امکان پیاده‌سازی آسان و تنظیم ورودی‌های کنترلی برحسب عملکرد سامانه اشاره کرد. معایب این روش‌ها نیز در پیچیدگی اثبات پایداری و تنزل عملکرد در خارج از دامنه‌ی طراحی شده است. روش‌های تناسبی - انتگرالی - مشتقی، [۶] رگولاتور درجه‌ی دوم خطی [۹-۷] و برنامه‌ریزی بهره [۱۰] در دسته‌ی روش‌های خطی قرار می‌گیرند که به‌طور موفقیت‌آمیزی برای چهارپره پیاده‌سازی شده‌اند. روش‌های غیرخطی در اجرای مانورهای پرشتاب بسیار توان‌مندند و نسبت به اغتشاشات نامعینی‌ها قوام بالایی دارند. این روش‌ها اساساً برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های خطی ابداع شده‌اند. با این حال روش‌های غیرخطی برتری چندانی در آزمایش‌های عملی به دست نیاورده‌اند. دلیل این امر در حساسیت بالای آنها به پارامترهای مدل دینامیکی است که پیاده‌سازی این روش‌ها را مشکل کرده است. از جمله روش‌های غیرخطی که برای کنترل چهارپره به کار رفته‌اند می‌توان به وارون‌سازی دینامیکی، [۱۲، ۱۱] گام‌رو به عقب [۱۳] و مود لغزشی [۱۴] اشاره کرد. مهم‌ترین مشخصه‌ی روش‌های مبتنی بر یادگیری این است که مدل دینامیکی چهارپره در آنها به کار نمی‌رود، بلکه از داده‌های حاصل از پرواز واقعی برای آموزش به سامانه‌ی کنترل استفاده می‌شود. از جمله‌ی این روش‌ها نیز که برای کنترل چهارپره به کار رفته‌اند می‌توان به منطق فازی [۱۵] و شبکه‌های عصبی [۱۶] اشاره کرد. این روش‌ها بر مبنای مدل دینامیکی شکل نمی‌گیرند و در نتیجه می‌توان آنها را روی پلت‌فرم‌های گوناگون به کار گرفت. با این حال پایداری و قوام این روش‌ها به راحتی قابل تحلیل نیست و ارزیابی عملی در مقیاس بزرگ روی این روش‌های کنترلی تاکنون صورت نگرفته است.

در این پژوهش، برای اولین بار سیستم هدایت رفتارمحور با سیستم کنترل دینامیک معکوس در کنار هم قرار داده شده‌اند تا امکان انتقال ربات‌های چهارپره در فضای سه‌بعدی از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر به‌طور ایمن فراهم شود. بکارگیری هم‌زمان رفتارهای تعقیب راهبر و اجتناب از مانع در کنار بهره‌گیری از الگوریتم غیرخطی در سامانه‌ی کنترل باعث ایجاد مجموعه‌ی پایدار و سازگار شده است که توانایی اجرای کامل مأموریت با وجود اغتشاش حسگرها و تأخیر عملگرها را دارد.

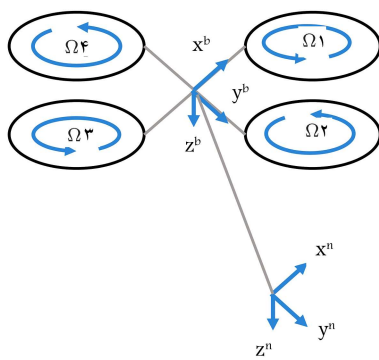
ساختار این مقاله چنین است: در بخش دوم مدل‌سازی دینامیکی ربات پرنده چهارپره، شامل معادلات دینامیکی و سینماتیکی و همچنین تأخیر موجود در عملگرها شرح داده شده است. بخش سوم اختصاص دارد به سامانه‌ی هدایت رفتارمحور و نحوه‌ی تولید مرجع مناسب برای سامانه‌ی کنترل. سامانه‌ی کنترل بر مبنای وارون‌سازی دینامیکی نیز در بخش چهارم ارائه شده است. و نهایتاً نتایج شبیه‌سازی عددی در بخش پنجم ارائه شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲. مدل‌سازی دینامیکی ربات پرنده

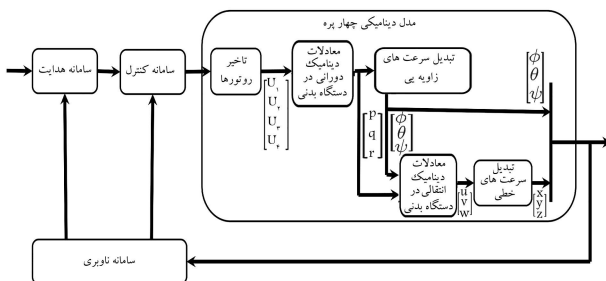
در این قسمت معادلات لازم برای مدل‌سازی حرکت چهارپره به‌عنوان یک جسم صلب با شش درجه آزادی شرح داده می‌شود. فرضیات استفاده شده برای مدل‌سازی چهارپره را می‌توان چنین خلاصه کرد: ۱. سازه چهارپره صلب و متقارن است؛ ۲. مرکز جرم و مرکز دستگاه بدنی چهارپره روی یک نقطه قرار دارند؛ ۳. ملخ‌های چهارپره صلب هستند؛ ۴. نیروهای آیرودینامیکی ناشی از چرخش روتورها با مربع سرعت زاویه‌ی روتورها متناسب هستند. لازم به ذکر است که چهارپره یک وسیله‌ی کم‌عملگر است، بدین معنی که با وجود داشتن شش درجه آزادی، تنها در چهار درجه امکان اعمال ورودی کنترلی مستقل دارد. همچنین، چهارپره از هیچ‌گونه سطوح کنترلی برای ایجاد نیرو استفاده نمی‌کند و تنها به تغییر سرعت زاویه‌ی روتورها خود وابسته است.

۱.۲. معادلات سینماتیکی

معمولاً برای بررسی حرکت یک جسم صلب شش درجه آزادی از دو دستگاه مختصات اینرسی/ناوبری (n) و بدنی (b) استفاده می‌شود (شکل ۱ الف). دلیل



الف) مختصات اینرسی و بدنی برای مدل‌سازی چهارپره؛



ب) بلوک نمودار مدل دینامیکی چهارپره در داخل سامانه‌ی حلقه بسته.

شکل ۱. دستگاه‌های مختصاتی چهارپره به همراه بلوک مدل دینامیکی مربوطه.

۱.۲.۲. معادلات دینامیک انتقالی

طبق قانون دوم نیوتن، معادلات دینامیکی انتقالی جسم صلب به صورت زیر است:

$$m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}^n \quad (5)$$

که در آن m جرم چهارپره و \mathbf{F}^n بردار نیروهای وارد بر چهارپره در دستگاه اینرسی است. برای نوشتن معادلات دینامیکی انتقالی در دستگاه بدنی باید از قضیه اویلر استفاده کنیم. با استفاده از قضیه اویلر و با بسط نیروهای رانش، جاذبه و بقیه ماتریس‌ها داریم:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rv - qw - g \sin \theta \\ -ru + pw + g \sin \phi \cos \theta \\ qu - pv + g \cos \theta \cos \phi + \frac{U_1}{m} \end{bmatrix} \quad (6)$$

فرم معادلات دینامیکی انتقالی در دستگاه اینرسی ساده‌تر از فرم آنها در دستگاه بدنی است، بنابراین:

$$m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{R}_\Theta \begin{bmatrix} \circ \\ \circ \\ -U_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \circ \\ \circ \\ mg \end{bmatrix} \quad (7)$$

یعنی:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{-U_1}{m} [\cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi] \\ \ddot{y} &= \frac{-U_1}{m} [\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi] \\ \ddot{z} &= g - \frac{U_1 \cos \phi \cos \theta}{m} \end{aligned} \quad (8)$$

۲.۲.۲. معادلات دینامیک دورانی

برای نوشتن معادلات دینامیکی دورانی در دستگاه بدنی باید از قضیه‌ی اویلر استفاده کنیم. بر این اساس:

$$\mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) = \boldsymbol{\tau}^b \quad (9)$$

با بسط گشتاورهای ورودی و بقیه‌ی ماتریس‌ها داریم:

$$\begin{aligned} \dot{p} &= qr \left(\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \right) + \frac{J_r q \Omega_r}{I_{xx}} + \frac{U_r}{I_{xx}} \\ \dot{q} &= pr \left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \right) - \frac{J_r p \Omega_r}{I_{yy}} + \frac{U_r}{I_{yy}} \\ \dot{r} &= qp \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \right) + \frac{U_r}{I_{zz}} \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن Ω_r برآیند سرعت زاویه‌ی روتورها و J_r ممان اینرسی روتور است. معادلات دینامیکی دورانی را می‌توان برحسب زوایای اویلر نیز به دست آورد:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \frac{d(\mathbf{T}_\Theta \boldsymbol{\omega})}{dt} = \dot{\mathbf{T}}_\Theta \boldsymbol{\omega} + \mathbf{T}_\Theta \dot{\boldsymbol{\omega}} \quad (11)$$

انتخاب دو دستگاه مختصات این است که اندازه‌گیری‌ها و ورودی‌های کنترلی معمولاً در دستگاه بدنی موجودند و ماتریس اینرسی در دستگاه بدنی مستقل از زمان است، در حالی که برای تعقیب یک مسیر در فضای سه‌بعدی اطلاع از موقعیت و وضعیت چهارپره نسبت به دستگاه اینرسی الزامی است. با توجه به سرعت و دامنه‌ی عملیاتی کم و ارتفاع پایین چهارپره، دستگاه NED را می‌توان به‌عنوان دستگاه اینرسی در نظر گرفت. در نهایت بردار متغیرهای حالت چهارپره عبارت خواهد بود از:

$$\mathbf{x} = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \phi \ \theta \ \psi \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}] \quad (1)$$

که در آن بردارهای موقعیت $\mathbf{r}^n = [x \ y \ z]^T$ و وضعیت $\Theta^n = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ در دستگاه ناوبری و بردارهای سرعت انتقالی $\mathbf{V}^b = [u \ v \ w]^T$ و سرعت دورانی $\boldsymbol{\omega}^b = [p \ q \ r]^T$ در دستگاه بدنی با استفاده از مؤلفه‌های بردار حالت تشکیل می‌شود. در ادامه برای انتقال سرعت‌های انتقالی از دستگاه بدنی به اینرسی می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\psi, z^n) \mathbf{R}(\theta, y^{(r)}) \mathbf{R}(\phi, x^b) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\Theta \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

برای انتقال سرعت‌های دورانی از دستگاه بدنی به اینرسی می‌توان نوشت:

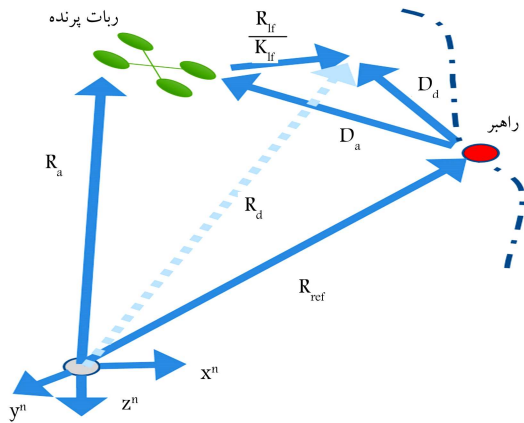
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \mathbf{R}(\phi, x^b) \begin{bmatrix} \circ \\ q \\ \circ \end{bmatrix} + \mathbf{R}(\theta, y^{(r)}) \mathbf{R}(\phi, x^b) \begin{bmatrix} \circ \\ \circ \\ r \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{T}_\Theta \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \circ & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ \circ & \cos \phi & -\sin \phi \\ \circ & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

۲.۲. معادلات دینامیکی

نیروها و گشتاورهای وارده بر چهارپره از جنس نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی و جاذبه است. معمولاً نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی وارد بر چهارپره به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\begin{aligned} U_1 &= b(\Omega_1^2 + \Omega_r^2 + \Omega_r^2 + \Omega_r^2) \\ U_r &= bl(-\Omega_r^2 + \Omega_r^2) \\ U_\psi &= bl(\Omega_1^2 - \Omega_r^2) \\ U_\phi &= d(\Omega_1^2 - \Omega_r^2 + \Omega_r^2 - \Omega_r^2) \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن U_1 نیروی روبه بالا، U_ψ گشتاور حول x^b ، U_ϕ گشتاور حول y^b و U_r گشتاور حول z^b است. همچنین b ضریب برای سامانه‌ی رانش، l طول بازوی چهارپره و d ضریب پسای سامانه‌ی رانش است. تأثیرات آیرودینامیکی دیگری همچون تأثیر زاویه‌ی حمله، انحراف تیغه و اغتشاش جریان هوا^[۱۷، ۱۸] بررسی شده است. اما از آنجا که مدل‌سازی این تأثیرات بسیار پیچیده است و تنها در سرعت‌های بالا مقدار قابل توجهی پیدا می‌کنند، در این پژوهش از وارد کردن آنها به مدل چهارپره صرف نظر می‌کنیم.



شکل ۲. بلوک نمودار هدایت رفتارمحور.

۳.۲. مدل روتور

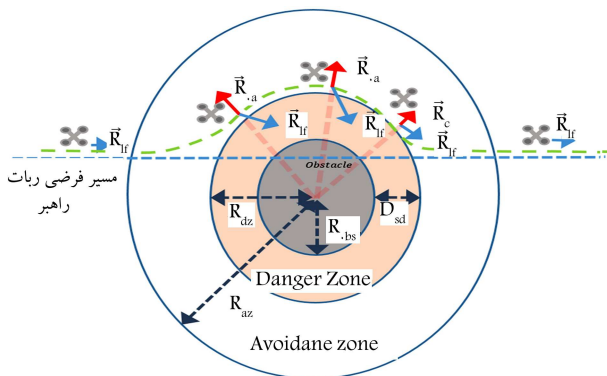
نکته‌ی مهم درباره‌ی سرعت زاویه‌ی روتورها، تأخیر موجود در روتورهاست که بر بایزاری چهارپره تأثیر منفی دارد. در واقع چهارپره برخلاف هواپیماهای بال ثابت، برای اعمال ورودی‌های کنترلی به فرکانس بالایی نیاز دارد و چنانچه روتورها در پیاده‌سازی ورودی‌های با فرکانس بالا موفق نباشند، چهارپره دچار ناپایداری خواهد شد. تأخیر روتورها ناشی از مسائل مکانیکی و الکتریکی است و می‌توان آن را به‌طور نسبتاً دقیق با تابع تبدیل مرتبه‌ی دوم مدل‌سازی کرد. با این حال ثابت زمانی ناشی از تأخیر مکانیکی بسیار بیشتر از تأخیر الکتریکی است و در نتیجه دینامیک روتور با یک معادله‌ی دیفرانسیل مرتبه‌ی اول قابل تقریب زدن است: [۱۱]

$$\dot{\Omega} = \frac{1}{T}(\Omega_d - \Omega) \quad (12)$$

که در آن T ثابت زمانی موتور است؛ یعنی مدت زمانی که برای روتور طول می‌کشد تا به ۶۳٪ مقدار ورودی پله برسد. همچنین مقدار Ω_d مقدار سرعت زاویه‌ی مطلوب و Ω مقدار سرعت زاویه‌ی واقعی است. معمولاً هرچه اندازه روتور و ملخ بزرگ‌تر باشد این ثابت زمانی بیشتر خواهد بود. در نتیجه تابع تبدیل روتور در فضای حالت به دست می‌آید:

$$\Omega(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (13)$$

شایان ذکر است، تابع تبدیل تأخیر روتورها در مقدار ورودی‌ها ضرب شده و سپس به سامانه‌ی چهارپره وارد می‌شود. در ادامه، بلوک نمودار مدل دینامیکی چهارپره در داخل سامانه‌ی حلقه‌بسته در شکل ۱ ب قابل ملاحظه است.



شکل ۳. تصویر شماتیک تعامل رفتارهای تعقیب راهبر و اجتناب از مانع در هنگام عبور از کنار مانع.

اجتناب کند. بردار حاصل از رفتار تعقیب راهبر برای چهارپره عبارت خواهد بود از:

$$\mathbf{R}_{lf} = K_{lf}(\mathbf{D}_d - \mathbf{D}_a) \quad (15)$$

$$\mathbf{D}_a = \mathbf{R}_a - \mathbf{R}_{ref}$$

$$\mathbf{D}_d = \mathbf{R}_d - \mathbf{R}_{ref} \quad (16)$$

۲.۳. رفتار اجتناب از مانع

در رفتار اجتناب از مانع موقعیت مانع مشخص فرض می‌شود، ولی موقعیت و سرعت چهارپره با عدم قطعیت موجود است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود برای اعمال رفتار اجتناب از مانع، دو منطقه‌ی فرضی در اطراف هر مانع در نظر گرفته می‌شود. منطقه‌ی کوچک‌تر منطقه‌ی خطر است که چهارپره نباید وارد آن منطقه شود. منطقه‌ی بزرگ‌تر منطقه‌ی اجتناب است که رفتار اجتناب از مانع در آن فعال می‌شود. در حین عبور چهارپره از کنار مانع، رفتار تعقیب راهبر برداری تولید می‌کند که به سمت ربات راهبر است و رفتار اجتناب از مانع برداری تولید می‌کند که به سمت دور شدن از مانع است. برآیند این دو رفتار باعث می‌شود حداقل فاصله‌ی چهارپره تا مرکز مانع در طی مسیر از شعاع منطقه‌ی خطر کم‌تر نشود. در نتیجه چهارپره تا جای ممکن به ربات راهبر نزدیک می‌ماند و در عین حال از برخورد چهارپره با مانع جلوگیری می‌شود. فلوچارت رفتار اجتناب از مانع در شکل ۴ ارائه داده شده است. بردار تولید شده توسط رفتار اجتناب از مانع چنان تعریف می‌شود که با ورود چهارپره به منطقه‌ی اجتناب فعال شود و در صورت نزدیک شدن چهارپره

۳. سامانه‌ی هدایت

برای هدایت چهارپره از رویکرد رفتارمحور بهره می‌بریم که برگرفته از رویکرد میدان پتانسیل ارائه شده توسط پاتول و همکاران [۱۹] است. در این پژوهش با استفاده از یک الگوریتم رفتارمحور، فرض می‌شود مسیر ربات راهبر از قبل تعریف شده باشد. طرز کار این الگوریتم بدین شکل است که بردارهای حاصل از رفتار تعقیب راهبر و رفتار اجتناب از مانع و بردار موقعیت کنونی با یکدیگر جمع می‌شوند و بردار مرجع اولیه را برای چهارپره تشکیل می‌دهند (شکل ۲):

$$\mathbf{R}_{tot} = \mathbf{R}_{lf} + \mathbf{R}_{oa} + \mathbf{R}_a \quad (14)$$

۱.۳. رفتار تعقیب راهبر

در این رفتار، ربات راهبر را می‌توان به‌صورت واقعی یا مجازی در نظر گرفت. در روش پیشنهادی نوشتار حاضر، به جای استفاده از روش‌های پیچیده‌ی بهینه‌سازی برای طراحی مسیر ربات‌ها از میان مانع، یک ربات مجازی راهبر در نظر گرفته می‌شود که بدون توجه به موانع روی یک مسیر از پیش تعیین شده حرکت می‌کند. ربات راهبر یک هدف متحرک فرضی است که ممکن است مسیرش از درون موانع بگذرد ولی ربات تعقیب‌گر باید بتواند در عین تعقیب ربات راهبر از برخورد با موانع

را می توان براساس سرعت چهارپره تعریف کرد:

$$R_{az} = R_{az_{min}} + K_{az} \|\dot{\vec{R}}_{a,t}\| \quad (19)$$

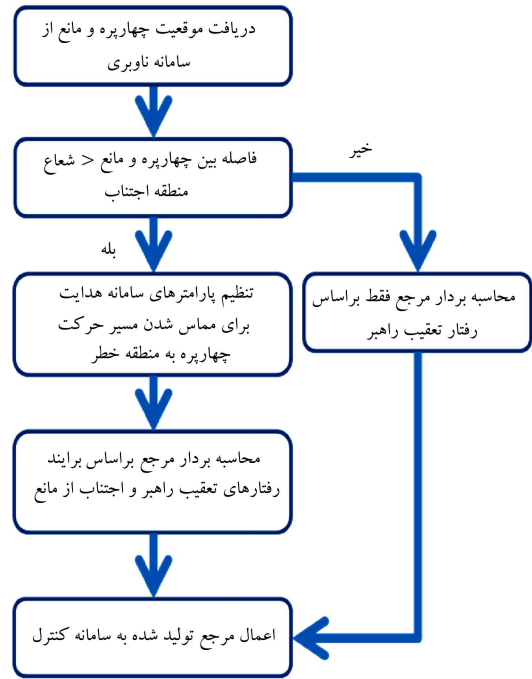
که در آن K_{az} ضریب و $R_{az_{min}}$ یک مقدار کمینه برای R_{az} است. برای جلوگیری از اشباع سامانه‌ی کنترل لازم است محدودیتی برای حداکثر اندازه بردار مرجع نهایی قرار دهیم:

$$\mathbf{R}'_{tot} = \min\{\|\mathbf{R}_{tot}\|, R_{max}\} \frac{\mathbf{R}_{tot}}{\|\mathbf{R}_{tot}\|} \quad (20)$$

که در آن \mathbf{R}'_{tot} بردار مرجع نهایی و R_{max} بیشینه اندازه‌ی قابل قبول برای بردار مرجع نهایی است. در شکل ۵، بلوک نمودار سامانه‌ی هدایت در داخل سامانه‌ی حلقه‌بسته نشان داده شده است.

۴. سامانه‌ی کنترل

چنان‌که از معادلات حرکت ربات استنباط می‌شود، چهارپره در راستای $[z \ \psi \ \theta \ \phi]$ ورودی کنترل مستقل دارد ولی برای حرکت در راستای $[y \ x]$ ، ورودی کنترل مستقیمی ندارد و لازم است با تغییر جهت بردار رانش در این دو راستا به حرکت درآید. در مأموریت‌هایی که نیاز به تعقیب مسیر در فضای سه‌بعدی دارد، تعقیب ورودی‌های $[z \ y \ x]$ ضرورت دارد و باید به‌گونه‌ی بر مشکل کم‌عملگر بودن فائق آید. برای این منظور دو رویکرد عمده پیشنهاد داده شده است. در رویکرد اول با استفاده از روش گام رو به عقب قانون کنترلی ساخته می‌شود. مزایای این روش در امکان اثبات آسان پایداری سامانه‌ی حلقه‌بسته است. با این وجود، به دلیل تولید قانون کنترلی پیچیده، که متغیرهای کنترلی را به صورت کوپل شده و غیرصریح ارائه می‌دهد، این رویکرد در عمل کاربرد گسترده‌ی نیافته است. به عبارت دیگر در پیاده‌سازی عملی باید با تنظیم متغیرهای کنترلی عملکرد سامانه‌ی حلقه‌بسته را تحلیل کرد، که با رویکرد گام رو به عقب این امر به راحتی ممکن نیست. در رویکرد دوم که رایج‌تر است با استفاده از تکنیک وارون‌سازی دینامیکی، شتاب‌های مجازی لازم در سه جهت $[z \ y \ x]$ به دست می‌آید. پس از آن براساس این نیروها مقدار رانش رو به بالا U_1 و مقادیر



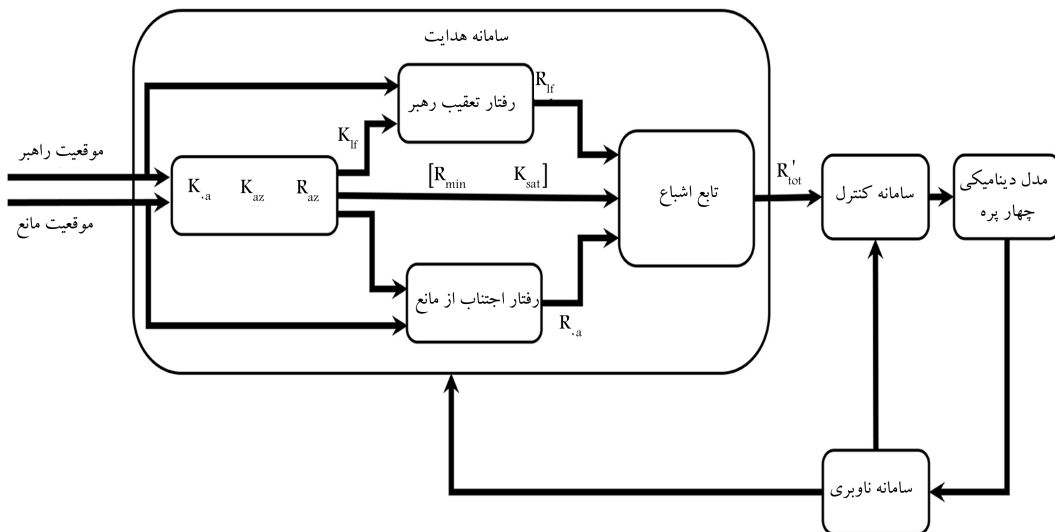
شکل ۴. فلوجارت رفتار اجتناب از مانع.

به مانع به‌طور پیوسته افزایش یابد. یعنی:

$$\mathbf{R}_{oa,i} = \begin{cases} K_{oa} \left(\frac{R_{az}}{\|\mathbf{D}_o\|} - 1 \right) \frac{\mathbf{D}_o}{\|\mathbf{D}_o\|} & \text{for } \|\mathbf{D}_o\| < R_{az} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

$$\mathbf{D}_o = \mathbf{R}_a - \mathbf{R}_o \quad (18)$$

که در آن بردار حاصل از رفتار اجتناب از مانع، K_{oa} ضریب رفتار اجتناب از مانع برای چهارپره‌ی رهرو، \mathbf{D}_o بردار فاصله بین چهارپره‌ی رهرو با مرکز مانع، \mathbf{R}_o بردار موقعیت مرکز مانع استوانه‌ی R_{az} شعاع منطقه‌ی اجتناب است. R_{az}



شکل ۵. بلوک نمودار سامانه‌ی هدایت به صورت جداگانه در داخل سامانه‌ی حلقه‌بسته.

همچنین باید یک تابع اشباع مطابق رابطه ۲۷ قائل شد تا فرض کوچک بودن زوایای رول و پیچ از بین نرود.

$$\phi_{d_{new}} = \begin{cases} \phi_{max} & \phi_d > \phi_{max} \\ \phi_{d_{new}} & -\phi_{max} < \phi_d < \phi_{max} \\ -\phi_{max} & \phi_d < -\phi_{max} \end{cases}$$

$$\theta_{d_{new}} = \begin{cases} \theta_{max} & \theta_d > \theta_{max} \\ \theta_{d_{new}} & -\theta_{max} < \theta_d < \theta_{max} \\ -\theta_{max} & \theta_d < -\theta_{max} \end{cases} \quad (27)$$

در برخی از مقالات از فرض زوایای کوچک استفاده شده است. [۱۸، ۲۱] از آنجا که مأموریت چهارپره‌ها بیشتر در محیط‌های خارج از آزمایشگاه انجام می‌گیرد -- که در این صورت تجهیزات بسیار دقیق آزمایشگاهی در دسترس نخواهد بود و انجام مانورهای شدید ضروری نیست -- در این پژوهش از وارون‌سازی دینامیکی با زوایای کوچک استفاده شده است. به بیان دیگر، چهارپره می‌تواند مانورهای کم‌شتاب را با داشتن زوایای کوچک اوایلر به انجام برساند و در نتیجه زوایای اوایلر در طی مأموریت کوچک باقی می‌مانند. بنابراین در طراحی کنترل‌گر می‌توان برای ساده شدن معادلات از فرض کوچک بودن زوایای اوایلر استفاده کرد:

$$\ddot{\phi} \approx \dot{\theta}\dot{\psi} \left(\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \right) + \frac{J_r \dot{\theta} \Omega_r}{I_{xx}} + \frac{U_r}{I_{xx}}$$

$$\ddot{\theta} \approx \dot{\phi}\dot{\psi} \left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \right) - \frac{J_r \dot{\phi} \Omega_r}{I_{yy}} + \frac{U_r}{I_{yy}}$$

$$\ddot{\psi} \approx \dot{\theta}\dot{\phi} \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \right) + \frac{U_r}{I_{zz}} \quad (28)$$

۱.۴. اعمال سامانه‌ی کنترل

با تعیین رویکرد کنترل، نوبت به تعیین روش کنترل می‌رسد. روش‌های مختلف خطی و غیرخطی برای کنترل چندپره‌ها پیشنهاد شده است که در بخش پیشینه‌ی تحقیق مرور شد. برای انتخاب روش کنترل مصالحه بین عملکرد و پیچیدگی پیاده‌سازی آن ضرورت می‌یابد. با توجه به این که قابلیت پیاده‌سازی از جمله معیارهای اصلی این پژوهش است، ساده‌ترین کنترل‌گر از لحاظ پیاده‌سازی یعنی کنترل‌گر تناسبی - مشتقی انتخاب می‌شود. در برخی از مطالعات انجام شده، کاربرد روش کنترلی تناسبی - انتگرالی - مشتقی برای کنترل چهارپره‌ها موفقیت‌آمیز بوده است [۱۲، ۲۳] در بسیاری از خلبان خودکارهای موجود در بازار نیز از این روش کنترلی بهره برده شده است. دلیل این امر، پیاده‌سازی آسان و امکان تنظیم قانون کنترلی بر مبنای عملکرد سامانه است. با توجه به این که جمله‌ی انتگرالی پایداری سامانه را کاهش می‌دهد و احتمال اشباع را بالا می‌برد، از این جمله صرف‌نظر می‌کنیم. مقدار شتاب‌های مجازی و گشتاورها از طریق روش تناسبی - مشتقی به صورت رابطه ۲۹ تولید می‌شود. در ادامه، ضرایب تناسبی و مشتقی کنترل را می‌توان با در نظر گرفتن معیارهایی همچون زمان نشست و فراجش تنظیم کرد. با این حال در این پژوهش، ضرایب تناسبی و مشتقی با اجرای یک سناریوی مشخص به شیوه دستی تنظیم می‌شود.

لازم ϕ_d و θ_d محاسبه می‌شود. در این رویکرد ۴ متغیر حالت $[x \ y \ z \ \psi]$ کنترل، و متغیرهای حالت $[\phi \ \theta]$ به طور خودکار پایدار می‌شوند. محاسبه‌ی وارون‌سازی دینامیکی می‌تواند به صورت غیرخطی یا خطی‌سازی شده حول حالت هاور باشد. در این پژوهش با استفاده از تکنیک وارون‌سازی دینامیکی، ابتدا شتاب‌های مجازی لازم برای رسیدن به موقعیت مطلوب به دست می‌آید. سپس از روی شتاب‌های مجازی تولید شده مقدار رانش و زوایای رول و پیچ به طور خودکار محاسبه می‌شوند. این محاسبات می‌تواند به صورت غیرخطی یا خطی‌سازی شده حول حالت پرواز ایستا انجام بگیرد که در ادامه راجع به هر یک صحبت می‌کنیم. شتاب‌های مجازی μ_x ، μ_y و μ_z براساس دینامیک انتقالی محاسبه می‌شود:

$$\mu_x = \frac{-U_\lambda}{m} (\cos \psi_d \sin \theta_d \cos \phi_d + \sin \psi_d \sin \phi_d)$$

$$\mu_y = \frac{-U_\lambda}{m} (\sin \psi_d \sin \theta_d \cos \phi_d - \cos \psi_d \sin \phi_d)$$

$$\mu_z = -\frac{U_\lambda}{m} (\cos \theta_d \cos \phi_d) + g \quad (29)$$

سپس مقدار رانش مورد نیاز از روی این سه شتاب مجازی به دست می‌آید:

$$U_\lambda = m \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2 + (g - \mu_z)^2} \quad (22)$$

در ادامه برای محاسبه‌ی مقادیر لازم ϕ_d و θ_d داریم:

$$\phi_d = \arcsin \left(-m \frac{\mu_x \sin \psi_d - \mu_y \cos \psi_d}{U_\lambda} \right)$$

$$\theta_d = \arctan \left(-\frac{\mu_x \cos \psi_d + \mu_y \sin \psi_d}{g - \mu_z} \right) \quad (23)$$

پایداری و همگرایی این رویکرد به صورت تحلیلی اثبات شده است [۲۴] یادآور می‌شود در مأموریت‌هایی که نیاز به مانورهای شدید نباشد می‌توان با اعمال فرض کوچک بودن زوایای رول و پیچ، این معادلات را ساده‌تر کرد. در نتیجه ابتدا باید مقدار شتاب‌های مورد نیاز محاسبه شود:

$$\mu_{x_{new}} = \frac{U_\lambda}{m} [\sin \phi_d \sin \psi + \cos \phi_d \sin \theta_d \cos \psi]$$

$$\approx \frac{U_{\lambda_{new}}}{m} [\phi_d \sin \psi + \theta_d \cos \psi]$$

$$\mu_{y_{new}} = \frac{U_\lambda}{m} [\sin \phi_d \cos \psi - \cos \phi_d \sin \theta_d \sin \psi]$$

$$\approx \frac{U_{\lambda_{new}}}{m} [\phi_d \cos \psi - \theta_d \sin \psi]$$

$$\mu_{z_{new}} = -\frac{U_\lambda}{m (\cos \phi_d \cos \theta_d)} + g \approx -\frac{U_{\lambda_{new}}}{m} + g \quad (24)$$

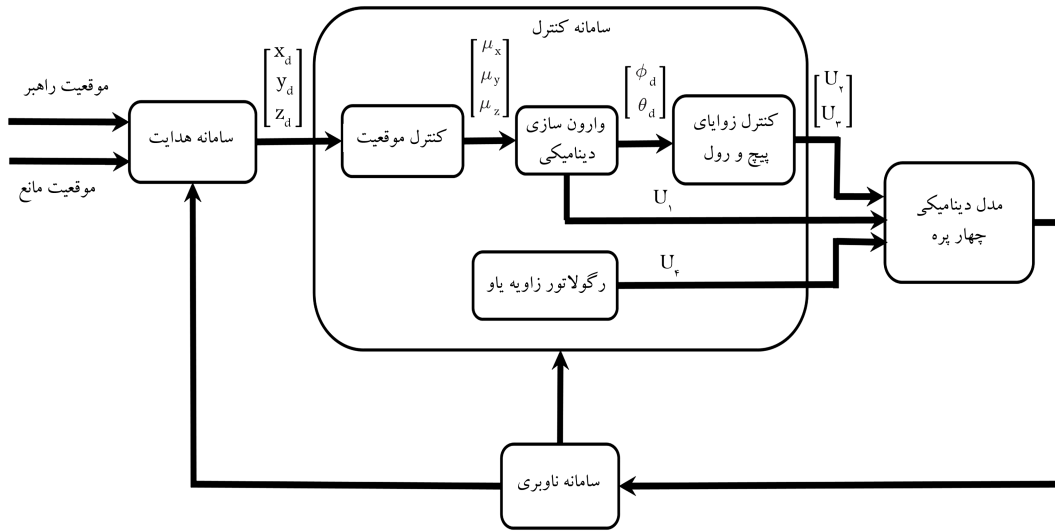
حال مقدار رانش از روی شتاب مورد نیاز عمودی محاسبه می‌شود:

$$U_{\lambda_{new}} = m(g - \mu_z) \quad (25)$$

و سپس می‌توان نوشت:

$$\phi_{d_{new}} = \frac{m}{U_{\lambda_{new}}} [-\mu_{x_{new}} \sin \psi_d + \mu_{y_{new}} \cos \psi_d]$$

$$\theta_{d_{new}} = \frac{m}{U_{\lambda_{new}}} [-\mu_{x_{new}} \cos \psi_d - \mu_{y_{new}} \sin \psi_d] \quad (26)$$



شکل ۶. بلوک نمودار سامانه‌ی کنترل به صورت جداگانه در داخل سامانه‌ی حلقه بسته.

جدول ۱. مشخصات چهارپره مورد استفاده در شبیه سازی. [۲۲]

واحد	مقدار	پارامتر
(kgm ^۲)	۰٫۰۷۵	I_{xx}
(kgm ^۲)	۰٫۰۷۵	I_{yy}
(kgm ^۲)	۰٫۱۳	I_{zz}
kg	۱٫۶۵	m
(kgm ^۲)	۰٫۰۰۰۰۰۶	J_{ψ}
(m)	۰٫۲۳	l
(Ns ^۲)	۰٫۰۰۰۰۳۱۳	b
(Nms ^۲)	۰٫۰۰۰۰۰۰۷۵	d

جدول ۲. مقدار بهره‌های سامانه‌ی کنترل.

بهره	$Kp_{x,y}$	$Kd_{x,y}$	Kp_z	Kd_z	$Kp_{\phi,\theta,\psi}$	$Kd_{\phi,\theta,\psi}$
مقدار	۰٫۵	۱٫۹	۲٫۹	۸٫۹	۰٫۹	۰٫۳

دوازده بهره کنترلی تناسبی - مشتقی است. با توجه به این که تمرکز این مقاله بر سامانه‌ی هدایت و به خصوص عملکرد اجتناب از برخورد است تنها به تنظیم دستی بهره‌های سامانه‌ی کنترل اکتفا می‌کنیم. توضیح این که مقادیر بهره‌های سامانه‌ی کنترل با الگوبرداری از مطالعات انجام شده [۲۲] بر مبنای سعی و خطا تنظیم شده است. مقادیر تنظیم شده‌ی بهره‌های کنترل در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

دلیل دیگر تنظیم دستی بهره‌های کنترل این است که نشان دهیم سامانه‌ی هدایت توانایی سازگاری با انواع سامانه‌های کنترل را دارد. چنان که در ادامه نیز نشان داده خواهد شد سامانه‌ی هدایت کمبودهای موجود در سامانه‌ی کنترل را جبران می‌کند و مسیر پیموده شده‌ی نهایی مطلوب خواهد بود. شایان ذکر است که محاسبه‌ی

$$\mu_{xnew} = K_{px}e_x + K_{dx}\dot{e}_x$$

$$\mu_{ynew} = K_{py}e_y + K_{dy}\dot{e}_y$$

$$\mu_{znew} = K_{pz}e_z + K_{dz}\dot{e}_z$$

$$U_{\phi} = K_{p\phi}e_{\phi} + K_{d\phi}\dot{e}_{\phi}$$

$$U_{\theta} = K_{p\theta}e_{\theta} + K_{d\theta}\dot{e}_{\theta}$$

$$U_{\psi} = K_{p\psi}e_{\psi} + K_{d\psi}\dot{e}_{\psi}$$

(۲۹)

که در آن e مقدار خطای موجود در متغیرهای حالت، K_p ضریب جمله‌ی تناسبی و K_d ضریب جمله‌ی مشتقی است. اطلاعات مربوط به تنظیم ضرایب کنترل در بخش شبیه سازی آمده است. همچنین، در شکل ۶، بلوک نمودار سامانه‌ی کنترل در داخل سامانه‌ی حلقه بسته نشان داده شده است.

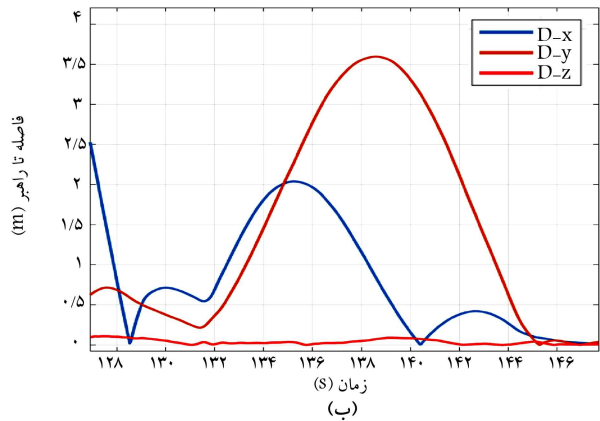
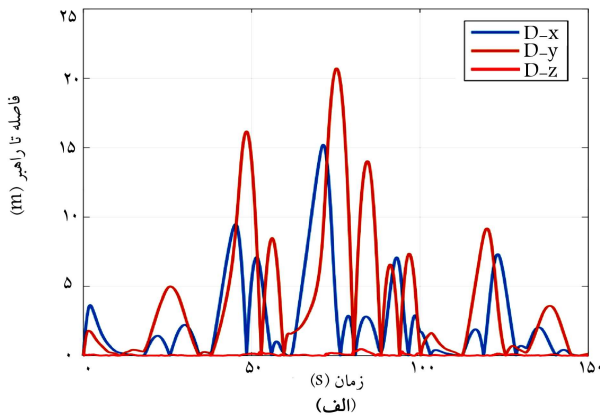
۵. نتایج شبیه سازی

در این پژوهش برای شبیه سازی از محیط نرم افزار متلب بهره می‌بریم. معادلات دینامیک چهارپره، اغتشاش حس گرها و تأخیر موجود در روتورها مهم ترین قسمت‌هایی هستند که باید در شبیه سازی مورد توجه قرار بگیرند. معادلات دینامیکی چنان که در بخش شبیه سازی ذکر شد وارد محیط شبیه سازی می‌شوند. پارامترهای سازه‌ی و آیرودینامیکی موجود در معادلات دینامیکی [۲۲] در جدول ۱ نشان داده شده است.

بر اساس مطالب گفته شده در بخش مدل سازی، معادله‌ی دینامیکی روتور به صورت یک تابع تبدیل مرتبه اول وارد سامانه می‌شود. برای اعمال تأخیر موتور و اغتشاش سامانه‌ی ناوبری از منابع مشابه کمک می‌گیریم. مقدار تأخیر موتور به میزان ۰٫۰۵ ثانیه مناسب به نظر می‌رسد [۱۱] همچنین اغتشاشی با میانگین صفر و واریانس ۰٫۰۱ به سیگنال‌های موقعیت و سرعت، و اغتشاشی با میانگین صفر و واریانس ۰٫۰۰۰۱ به سیگنال‌های زاویه اضافه می‌شود [۲۰] بنابراین قادر خواهیم بود عوامل اصلی تضعیف کننده‌ی عملکرد چهارپره را در شبیه سازی‌ها لحاظ کرده و به نتایج دقیق تری برسیم. سامانه‌ی کنترل متشکل از

جدول ۳. مقدار بهره‌ها و پارامترهای سامانه‌ی هدایت.

پارامتر	K_{lf}	K_{oa}	R_{min}	K_{sat}	R_{az}	K_{az}
مقدار	۱٫۲	۲۱٫۸	۳٫۵	۰٫۱۵	۲۵٫۳	۰٫۲۵

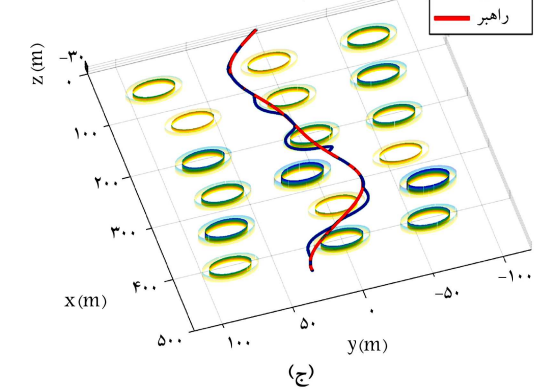
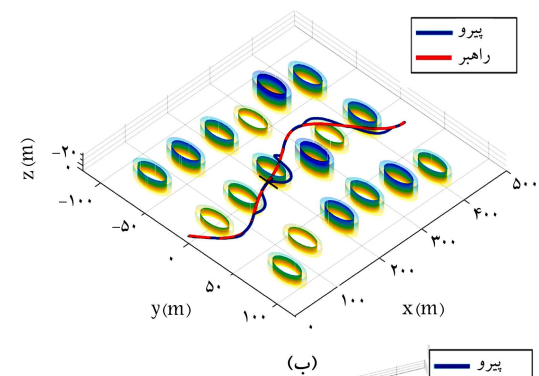
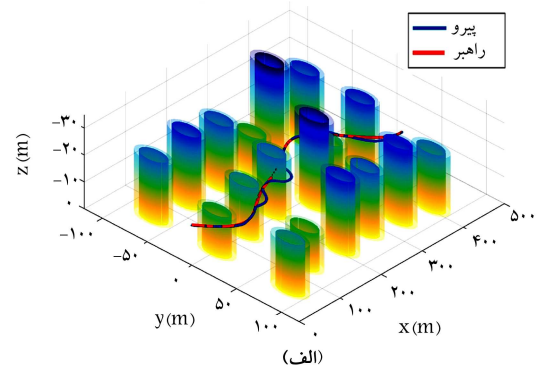


شکل ۸. تاریخچه فاصله از ربات راهبر.

ساختمان‌ها رد شود تا هوشمندی سامانه‌ی هدایت مورد ارزیابی قرار گیرد. در این سناریو فاصله‌ی مطلوب بین ربات تعقیب‌گر و راهبر برابر صفر در نظر گرفته می‌شود:

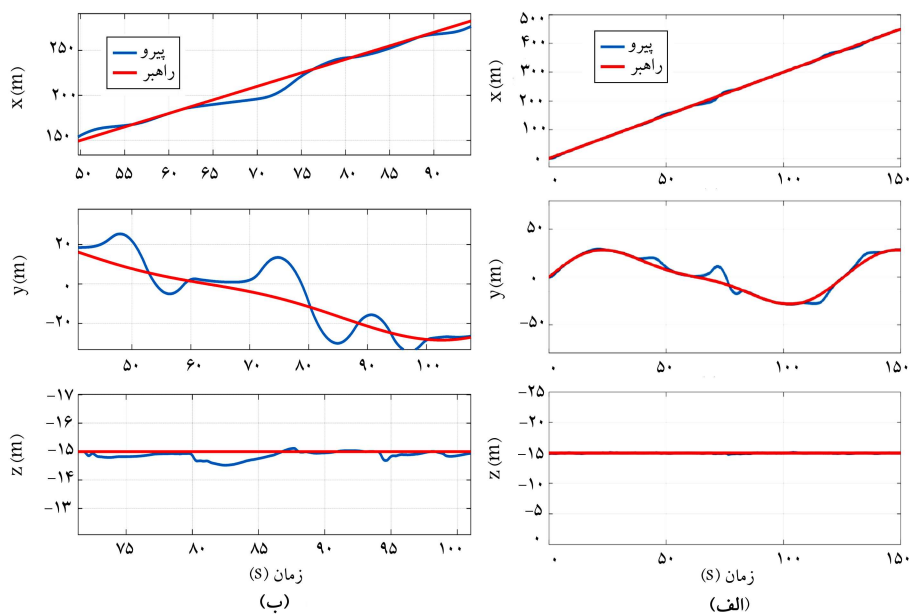
$$D_d = R_d - R_{ref} = 0$$

چنان‌که در شکل ۷ مشاهده می‌شود چهارپره توانسته است به‌خوبی ربات راهبر مجازی را طی ۱۵ ثانیه تعقیب، و نیز در طی مسیر از موانع متعدد موجود اجتناب کند. فاصله‌ی میان چهارپره‌ی تعقیب‌گر و ربات راهبر مجازی در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که فاصله در راستای z تقریباً نزدیک صفر باقی می‌ماند، که مطلوب است. در راستای x و y نیز تنها در بخش‌هایی از مسیر که برخورد با مانع محتمل است، فاصله بین دو ربات به وجود آمده و سریعاً برطرف شده است. تاریخچه‌ی موقعیت چهارپره‌های راهبر و تعقیب‌گر در شکل ۹ نشان داده شده است. از این شکل نیز مشخص است که با وجود سرعت بالا در راستای x و حرکت نوسانی در راستای y سامانه‌ی هدایت و کنترل به‌خوبی توانسته چهارپره‌ی دنبال‌کننده را در مسیر درست به حرکت درآورد. چنان‌که در بخش طراحی سامانه‌ی کنترل ذکر شد مقادیر مطلوب زوایای رول و پیچ به‌طور اتوماتیک محاسبه می‌شود تا در نهایت چهارپره در راستای x و y به حرکت درآید. در شکل ۱۰ تاریخچه‌ی وضعیت چهارپره مشاهده می‌شود که در آن زوایای رول و پیچ بین 10° و -10° تغییر کرده‌اند ولی تغییرات زاویه‌ی یاب بسیار کم ترو بین 1 و -1 است. دلیل این امر این است که زاویه‌ی یاب مطلوب در طی مأموریت صفر فرض شده ولی چهارپره برای اجتناب از موانع لازم است زوایای رول و پیچ خود را تغییر دهد. تاریخچه‌ی چهار ورودی کنترلی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ورودی U_1 که برای تنظیم ارتفاع به کار می‌رود به دلیل ثابت بودن ارتفاع مطلوب، تغییرات

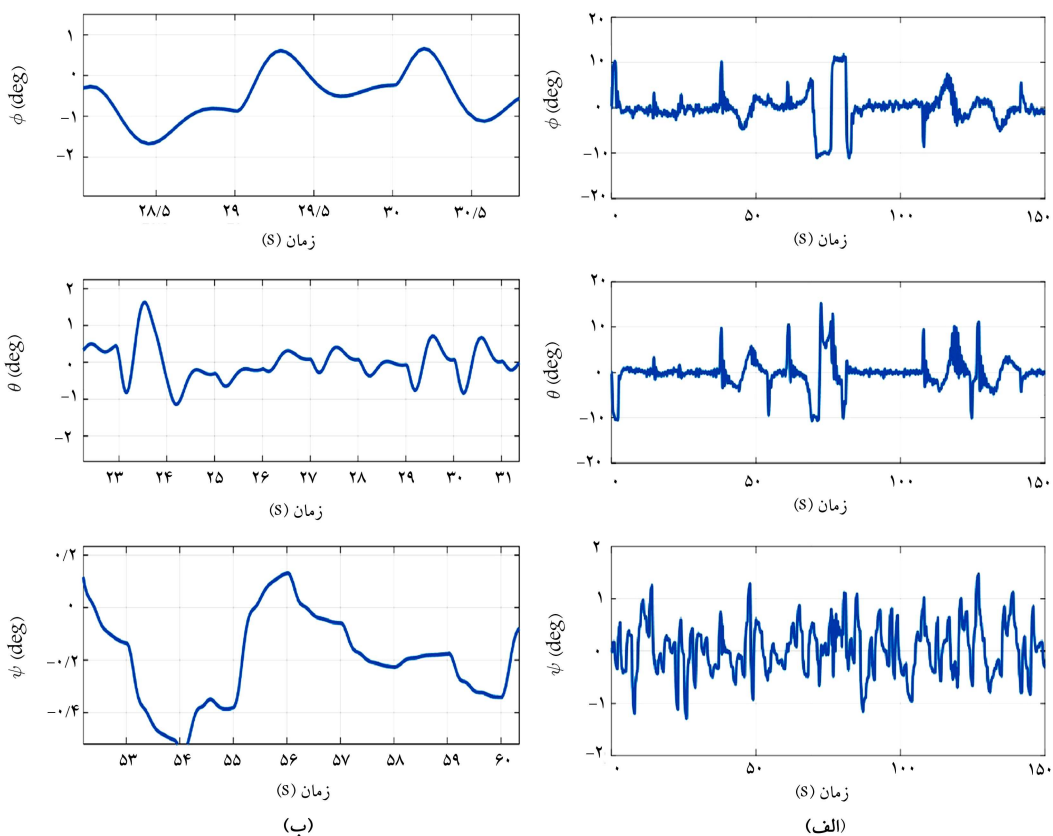


شکل ۷. مسیر سه‌بعدی چهارپره از نماهای مختلف.

بهره‌های سامانه‌ی هدایت از طریق حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی در محیط متلب انجام شده است. به‌دلیل محدودیت در تعداد صفحات، صرفاً به ذکر نتایج حل که در جدول ۳ قابل ملاحظه است، اکتفا می‌شود. در سناریویی که برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده، ربات راهبر را به‌صورت مجازی در نظر می‌گیریم. در نتیجه با این که ربات راهبر مجازی می‌تواند از میان موانع عبور کند ربات تعقیب‌گر باید در عین تعقیب ربات راهبر مجازی، از موانع اجتناب کند. تعداد زیادی مانع استوانه‌یی که در واقع شکل ساده شده‌ی ساختمان‌ها در محیط شهری هستند در مسیر حرکت چهارپره قرار داده شده است تا عملکرد اجتناب از مانع به‌خوبی آزموده شود. برای این منظور یک مسیر سینوسی برای ربات راهبر مجازی در نظر گرفته می‌شود، به‌گونه‌یی که از داخل



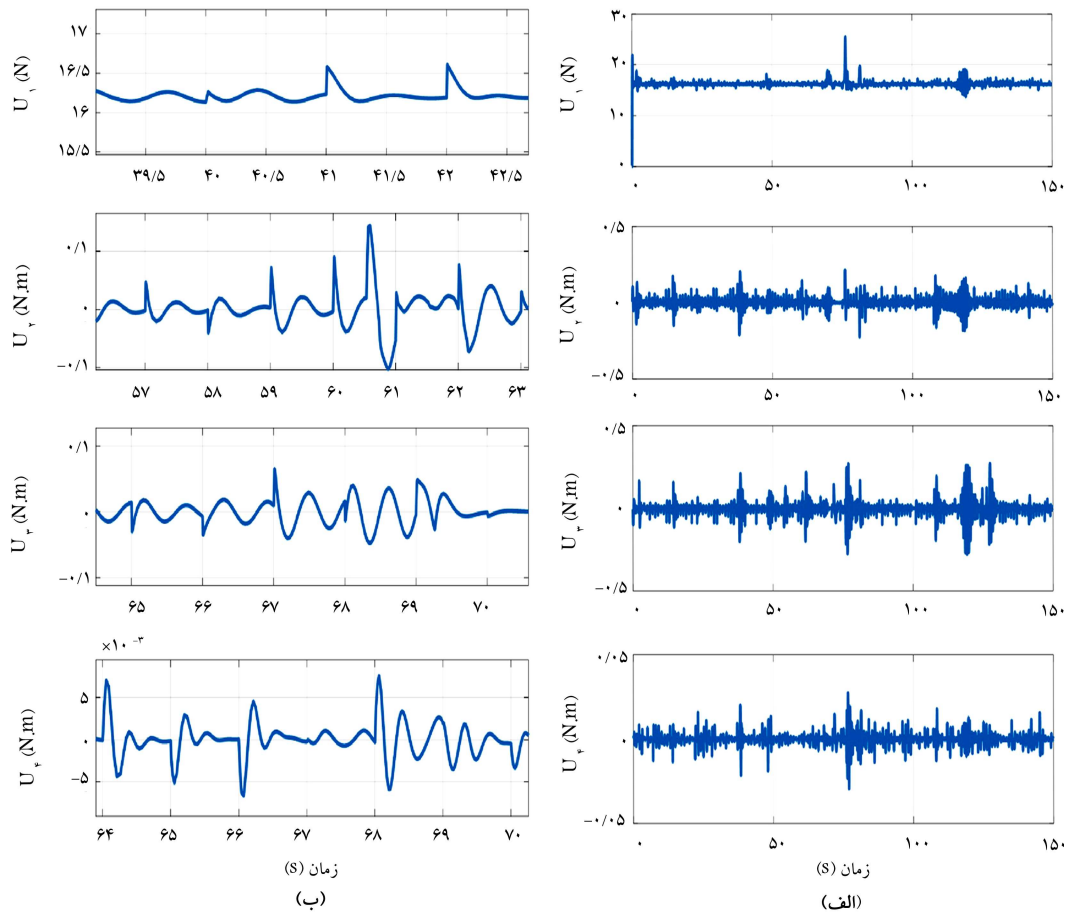
شکل ۹. تاریخچه‌ی موقعیت چهارپره.



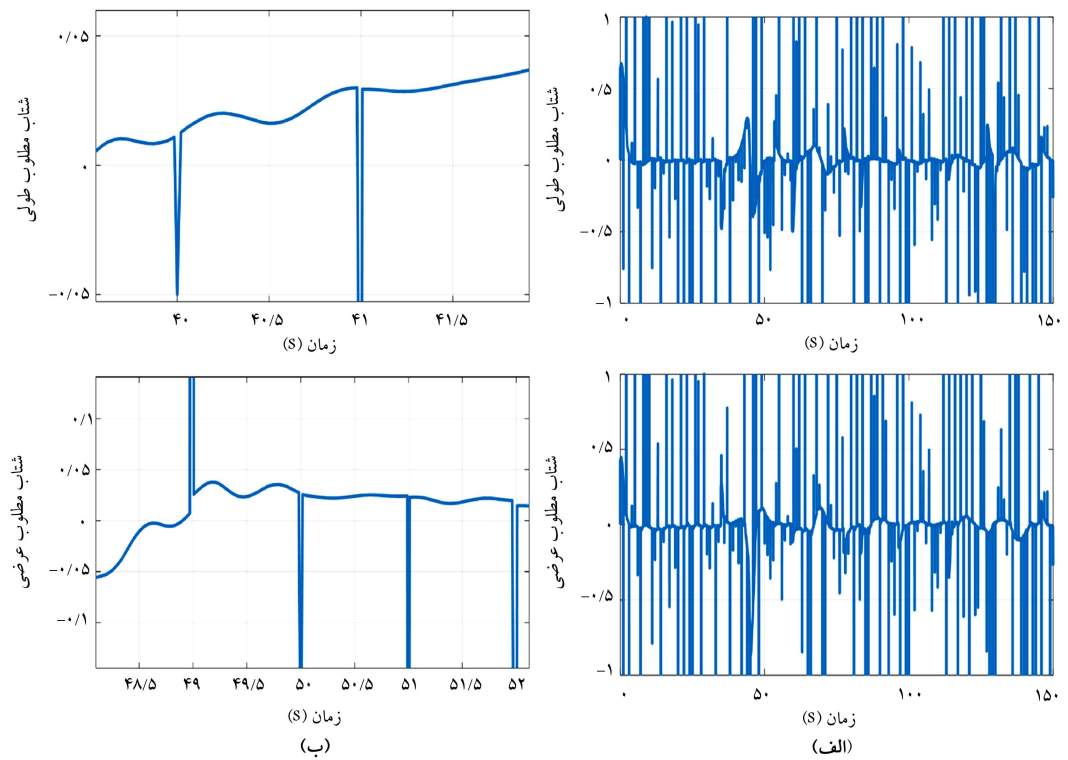
شکل ۱۰. تاریخچه‌ی وضعیت چهارپره.

است. در ادامه، در شکل ۱۳، تاریخچه‌ی مقادیر مطلوب کنترلی زوایا قابل ملاحظه است. در پایان در شکل ۱۴ تاریخچه دور موتورهای ربات پرنده جهت اعتبارسنجی نتایج ورودی‌های کنترلی قابل ملاحظه است. نکته‌ی قابل توجه در مورد تاریخچه‌ی کنترلی، فرکانس بالای سیگنال کنترلی است که روتورهای چهارپره باید توانایی ایجاد آن را داشته باشند، در غیر این صورت چهارپره توانایی پرواز نخواهد داشت.

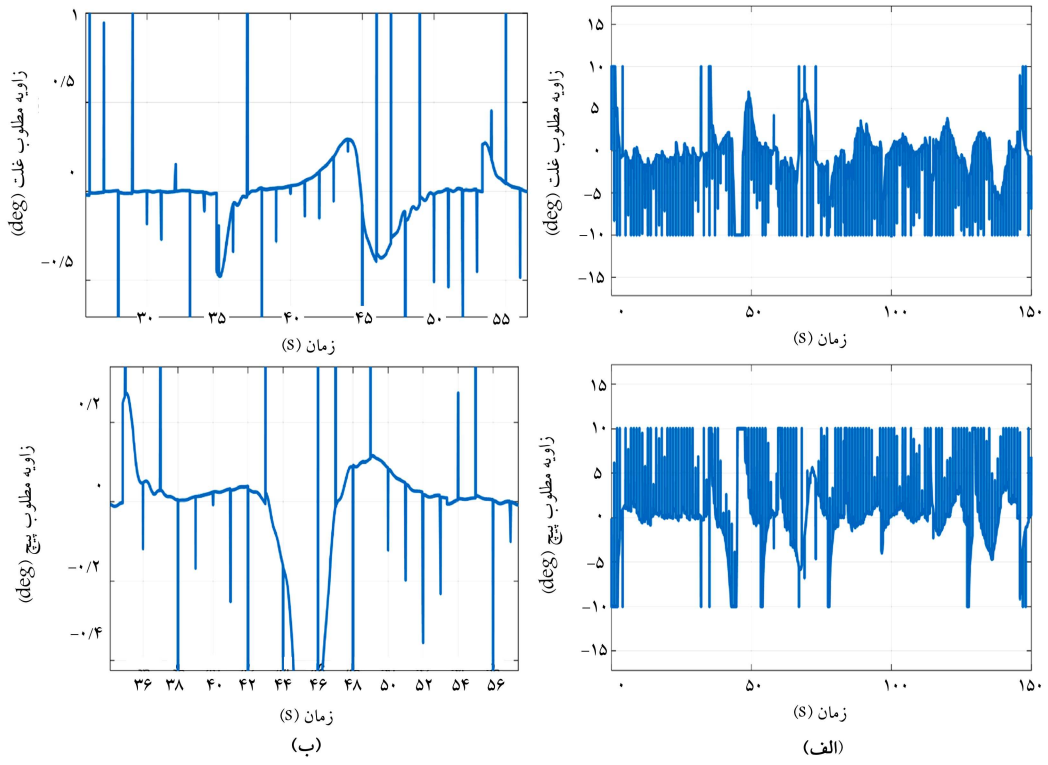
چندانی نداشته است. ولی ورودی‌های کنترلی U_2 و U_3 به‌خصوص هشگام عبور چهارپره از کنار موانع به شدت مورد استفاده بوده است. ورودی کنترلی U_4 نیز به دلیل صفر بودن زاویه‌ی یاو مطلوب کم‌تر از ورودی‌های کنترلی U_2 و U_3 کاربرد داشته است. در شکل ۱۲ مقادیر شتاب‌های مجازی مطلوب در راستای x و y نشان داده شده



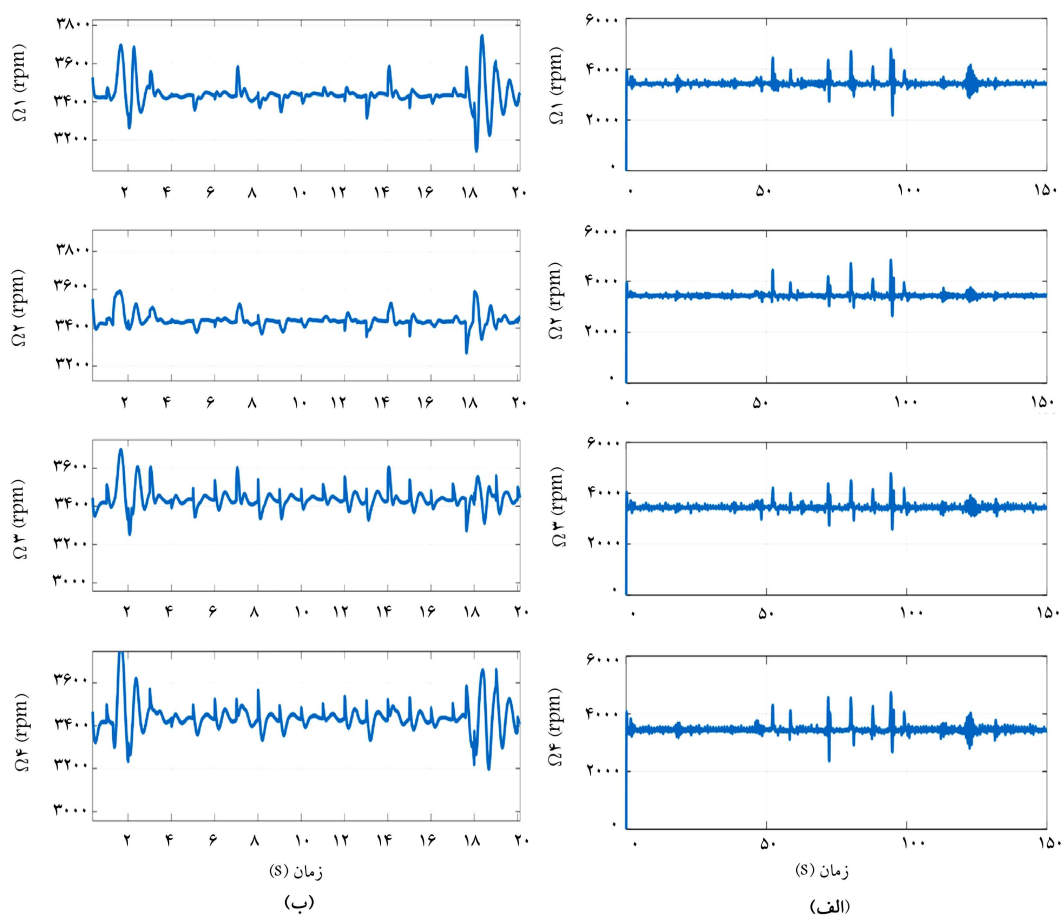
شکل ۱۱. تاریخچه متغیرهای کنترلی.



شکل ۱۲. تاریخچه مقادیر مطلوب کنترلی شتاب‌ها بر واحد شتاب جاذبه.



شکل ۱۳. تاریخچه‌ی مقادیر مطلوب کنترلی زوایا.



شکل ۱۴. تاریخچه زمانی دور موتورهای ربات پرنده.

راهبر و اجتناب از مانع را به طور هم‌زمان برآورده سازد. در طراحی سامانه‌ی کنترل از روش وارون‌سازی دینامیکی استفاده شد تا بر کم‌عملگر بودن دینامیک چهارپره غالبه شود. سامانه‌ی هدایت براساس الگوریتم رفتارمحور طراحی شد تا در کنار عبور ایمن از کنار موانع، فاصله میان چهارپره و مرجع اصلی تا حد ممکن کوچک باقی بماند. هماهنگی و کارآمدی سامانه‌های کنترل و هدایت از طریق شبیه‌سازی یک مأموریت با وجود موانع متعدد بررسی شد. لازم به ذکر است که در این تحقیق، موقعیت و سرعت ربات پرنده با عدم قطعیت وارد سیستم حلقه بسته شده است. در نتیجه نادقیق بودن اطلاعات ناوبری تا حدودی در مقاله گنجانده شده است. البته در فعالیت‌های آتی می‌توان با لحاظ کردن شبیه‌ساز سامانه‌ی ناوبری و همچنین مشخص نبودن موقعیت موانع در حلقه هدایت و کنترل، خطاهای محتمل را نیز دقیق‌تر ارزیابی کرد. همچنین می‌توان با اضافه کردن رفتار حفظ چیدمان، مانور پرواز آرایش یافته را برای تعداد زیادی چهارپره به انجام رساند.

گفتنی است شتاب‌های مجازی توسط الگوریتم وارون‌سازی دینامیکی تولید می‌شود تا مقدار زوایای لازم برای رسیدن به این شتاب‌ها محاسبه شود. همانطور که در شکل ۱۳ مشخص است چهارپره باید با فرکانس بالایی زوایای رول و پیچ را تغییر دهد تا شتاب‌های مجازی لازم ایجاد شود. همانطور که مشاهده می‌شود، ربات رهرو زمان‌هایی که به موانع می‌رسد، هر دو رفتار اجتناب از مانع و تعقیب راهبر را بروز می‌دهد و پس از عبور ایمن از مانع، صرفاً تعقیب ربات راهبر توسط سامانه‌ی هدایت در دستور کار قرار می‌گیرد.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش سامانه‌ی کنترل و هدایت برای چهارپره طراحی شد تا رفتارهای تعقیب

پانویس

1. traffic collision avoidance system

منابع (References)

1. Yun, B., Chen, B.M., Lum, K.Y. and Lee, T.H. "Design and implementation of a leader-follower cooperative control system for unmanned helicopters", *J. Control Theory Appl.*, **8**(1), pp. 61-68 (Jan. 2010).
2. Lavaei Yanesi, A. and Amiri Atashgah, M.A. "Three-dimensional constrained optimal motion planning for a six-degree-of-freedom quadrotor helicopter for urban traffic purposes", *Modares Mech. Eng.*, **15**(5), pp. 13-24 (Apr. 2015).
3. Naderi Javad, D.-A. "Mobile robot path planning in unknown dynamic environment using velocity obstacle", *Yektaweb*, **13**(2), pp. 13-21 (Jul. 2017).
4. Asgari, M., Jahed Motlagh, M.R. and Alipour, K. "Leader-follower flexible formation control of wheeled mobile robots based on an integrated bio-inspired neurodynamics approach and backstepping scheme", *Modares Mech. Eng.*, **16**(4), pp. 88-98 (Apr. 2016).
5. Aflakiyan, A., Tale Masouleh, M., Bayani, H. and Sadeghian, R. "Path planning of cable driven parallel robots in the presence of dynamic obstacles via potential field using computed torque control method", *Modares Mech. Eng.*, **16**(4), pp. 109-118 (Apr. 2016).
6. Bouabdallah, S., Noth, A. and Siegwart, R. "PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor", in *Intelligent Robots and Systems, (IROS 2004), Proceedings, 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, **3**, pp. 2451-2456 (2004).
7. How, J.P., Bethke, B., Frank, A., Dale, D. and Vian, J. "Real-time indoor autonomous vehicle test environment", *Control Syst. IEEE*, **28**(2), pp. 51-64 (2008).
8. Cowling, I. "Towards autonomy of a quadrotor UAV", PhD thesis, Cranfield University (2008).
9. Chen, M. and Huzmezan, M. "A combined MBPC/2 DOF H8 controller for a quad rotor UAV", in *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit* (2003).
10. Milhim, A., Zhang, Y. and Rabbath, C.-A. "Gain scheduling based PID controller for fault tolerant control of quad-rotor UAV", in *AIAA Infotech@Aerospace 2010 Atlanta, Georgia, American Institute of Aeronautics and Astronautics* (2010).
11. Michael, N., Mellinger, D., Lindsey, Q. and Kumar, V. "The grasp multiple micro-uav testbed", *Robot. Autom. Mag. IEEE*, **17**(3), pp. 56-65 (2010).
12. Kendoul, F., Yu, Z. and Nonami, K. "Guidance and nonlinear control system for autonomous flight of minirotorcraft unmanned aerial vehicles", *J. F. Robot.*, **27**(3), pp. 311-334 (2010).
13. Bouabdallah, S. and Siegwart, R. "Full control of a quadrotor", in *Intelligent Robots and Systems, IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 153-158 (2007).
14. Xu, R. and Özgüner, Ü "Sliding mode control of a quadrotor helicopter", in *Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on*, pp. 4957-4962 (2006).
15. Santos, M., López, V. and Morata, F. "Intelligent fuzzy controller of a quadrotor", in *Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE), 2010 International Conference on*, pp. 141-146 (2010).
16. Dierks, T. and Jagannathan, S. "Output feedback control of a quadrotor UAV using neural networks", *Neural Networks, IEEE Trans.*, **21**(1), pp. 50-66 (2010).
17. Hoffmann, G.M., Huang, H., Waslander, S.L. and Tomlin, C.J. "Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment", in *Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, **2**, pp. 1-20 (2007).

18. Mahony, R., Kumar, V. and Corke, P. "Multirotor aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor", *IEEE Robot. Autom. Mag.*, **19**(3), pp. 20-32 (2012).
19. Paul, T., Krogstad, T.R. and Gravdahl, J.T. "Modelling of UAV formation flight using 3D potential field", *Simul. Model. Pract. Theory*, **16**(9), pp. 1453-1462 (2008).
20. Kendoul, F., Fantoni, I. and Lozano, R. "Asymptotic stability of hierarchical inner-outer loop-based flight controllers", in *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, pp. 1741-1746 (2008).
21. Nagaty, A., Saeedi, S., Thibault, C., Seto, M. and Li, H. "Control and navigation framework for quadrotor helicopters", *J. Intell. Robot. Syst.*, **70**(1-4), pp. 1-12 (2013).
22. Bouabdallah, S. "Design and control of quadrotors with application to autonomous flying", *École Polytechnique Federale de Lausanne* (2007).