

طراحی و شبیه سازی کنترل کننده خطی سازی فیدبک جزئی و پسگام تطبیقی برای یک ربات پرنده خودکار دو ملخه هم محور

بهنام داداش زاده^{۱*}، اکبر اللهوردی زاده^۲، نیما ساعی^۳

۱- گروه مهندسی مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز - b.dadashzadeh@tabrizu.ac.ir

۲- گروه مهندسی مکترونیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز - allahverdizadeh@tabrizu.ac.ir

۳- کارشناس ارشد مهندسی مکترونیک، دانشگاه تبریز، nima.saei2@gmail.com

*نویسنده مخاطب

چکیده

در این پژوهش به مدلسازی دینامیکی و طراحی کنترلرهای غیرخطی برای یک ربات پرنده با دو ملخ هم محور و مجهز به سیستم گیمبال و قفس محافظ پرداخته شده است. در سیستم طراحی شده تنها از یک موتور دومحوره استفاده شده که نیروی لازم برای شناوری ربات را تامین می کند و برای کنترل پایداری و حرکت آن در دو جهت جانبی از دو بالک استفاده شده که توسط سروو موتور کنترل می شوند. پس از توصیف نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی موثر بر ربات، معادلات دینامیکی ربات با روش نیوتون اولر بدست آمده است. در ادامه دو استراتژی کنترل برای پایداری ربات در شرایط شناوری و رسیدن به موقعیت مطلوب پهباد، در حضور نیروهای اغتشاش خارجی (برخورد ضعیف و اثرات آیرودینامیکی مدل نشده) توصیف شده است. به منظور پایداری ربات در شرایط شناوری، روش خطی سازی فیدبک جزئی بکار گرفته شده است. بدلیل عدم امکان کنترل موقعیت مطلوب با روش خطی سازی فیدبک جزئی، با جداسازی دینامیک یاو سیستم از سایر بخشهای دینامیک سیستم و حذف دینامیک صفر سیستم و با بهره گیری از روش کنترل پسگام تطبیقی، به پایدارسازی و کنترل ربات در رسیدن به موقعیت مطلوب و پیمودن مسیر مطلوب پرداخته شده است. نتایج بدست آمده بیانگر توانایی هر دو روش کنترلی در پایدارسازی سیستم می باشد. روش خطی سازی فیدبک به شکل مناسبی امکان قرارگیری ربات در جهتگیری مطلوب را فراهم می کند و روش پسگام تطبیقی امکان پیمودن مسیر دلخواه و رسیدن به موقعیت مطلوب را فراهم می کند.

واژه های کلیدی: ربات پرنده، موتور دو ملخه هم محور، کنترل پسگام تطبیقی، خطی سازی فیدبک جزئی.

۱- مقدمه

پرنده های بدون سرنشین که در تجسس هوایی، شناسایی و بازرسی در محیط های خطرناک و پیچیده به کار می روند، دارای مزایای زیادی بوده و در سالهای اخیر گسترش یافته اند. در حقیقت پرنده های بدون سرنشین برای مأموریت در محیط های خطرناک و کم نور بهتر از هواپیماهای سرنشین دار هستند. ریسک شکست پایین و اعتماد بیشتر در موفقیت مأموریت، دو انگیزه قوی برای گسترش استفاده از پرنده های بدون سرنشین است. پرواز در نزدیکی موانع شامل چالش های مهمی است که هنوز یک مساله باز است. پرواز خودکار نزدیک موانع در محیط های محروم از GPS با چالش های بسیاری مواجه است. دو چالش اصلی عبارتند از اینکه ربات های پرنده به لحاظ ذاتی ناپایدار هستند و به برخورد بسیار حساس هستند که

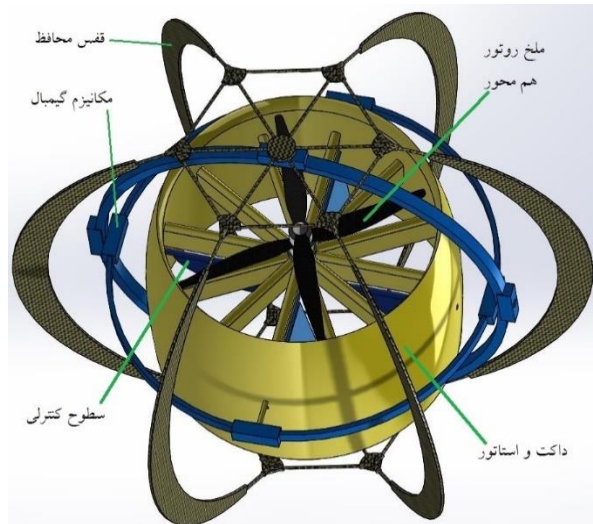
منجر به آسیب یا ناپایداری ربات می شود. کنترلر رباتهای پرنده به چهار دسته خطی، غیرخطی، سیستم های کنترل ترکیبی و سیستم های کنترل پرواز مبتنی بر یادگیری تقسیم می شوند.

۱-۱- پیشینه پژوهش

تحقیقات زیادی در زمینه کنترل ربات های پرنده کوادروتور انجام شده است. بوعبدلله و همکاران [1] با بدست آوردن معادله دینامیکی حرکت کوادروتور به کنترل زوایای آن از طریق روش کنترل کلاسیک مانند PID و روش کنترل بهینه LQ پرداختند. نتایج آزمایشات نشان دهنده این بود که کنترل کننده کلاسیک زوایای کوادروتور را در حضور اغتشاش جزئی می تواند کنترل کند اما در حضور اغتشاشات قوی مثل باد کارایی مناسبی ندارد. در ادامه بوعبدلله و سیگوارت [2] پس از مدلسازی ربات پرنده OS4 با روش نیوتون-اولر دو کنترل کننده غیرخطی مود لغزشی و پسگام را اعمال کردند. این سیستم دارای ۴ ورودی و ۶ خروجی است، بنابراین یک سیستم تحریک ناقص محسوب می شود. نتایج آزمایشات نشانگر این بود که کنترلر مود لغزشی به دلیل طبیعت نوسانی با فرکانس بالا نتایج متوسطی را فراهم می کند. از سوی دیگر، کنترل کننده پسگام توانایی کنترل زاویه های جهتگیری را در حضور اختلالات نسبتا بالا نشان می دهد که توسط برخی از مطالعات قبلی در مورد سیستم های تحریک ناقص تایید شده است.

بودای و همکاران [3] معادله دینامیکی کوادروتور را بسط دادند و گشتاور اصطکاکی آئرو دینامیکی و نیروی درگ را وارد معادلات کردند. آنها با استفاده از روش پسگام خطای ردیابی و تابع لیاپانوف را تحلیل کردند، سپس برای اطمینان از پایداری لیاپانوف، بررسی غیرخطی های سیستم و پیمودن مسیر مطلوب از کنترل کننده مود لغزشی استفاده نمودند و کنترل کننده مود لغزشی بر مبنای روش پسگام را اعمال کردند. مقایسه عملکرد کنترل کننده مود لغزشی انتگرالی و پسگام انتگرالی روی کوادروتور، توسط بوچوچا و همکاران [4] صورت گرفت. نتایج بدست آمده از آزمایشات بیانگر عملکرد مناسب هر دو کنترل کننده در پایداری و ردیابی جهتگیری با برتری اندک روش مود لغزشی انتگرالی (دقت و سرعت همگرایی) دارد. البته در حضور اغتشاشات خارجی کنترل کننده مود لغزشی انتگرالی مقاومت و کارایی بیشتری دارد. از دیگر روش های کنترل غیرخطی بر اساس مود لغزشی می توان به روش پسگام مود لغزشی انتگرالی اشاره کرد. این روش عاری از پدیده چترینگ بوده و بر کوادروتور در معرض اغتشاشات متغیر با زمان (باد و درگ جانبی) اعمال شده است [5]. همچنین روش مود لغزشی ترمینالی برای زیر سیستم تمام عملی و کنترل کننده مود لغزشی زیرسیستم زیرعملی در کوادروتور استفاده شده است [6]. یاسین و همکاران [7] نوع

هلیکوپتر نمی‌باشد. بنابراین تمام توان تولید شده صرف فراهم کردن نیروی برای موثر و افزایش کارایی آن می‌شود.



شکل ۱- مدل سه بعدی ربات پرنده مورد بررسی

معادلات دینامیکی انتقالی و دورانی ربات در دستگاه مختصات بدنی به ترتیب به صورت معادلات (۱) و (۲) نوشته می‌شود که دارای شش درجه آزادی است. از درجات آزادی مکانیزم گیمبال و قفس محافظ به خاطر جرم ناچیز آنها صرف نظر می‌شود.

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{F_{x-B}}{m} - qw + rv \\ \dot{v} = \frac{F_{y-B}}{m} - ru + pw \\ \dot{w} = \frac{F_{z-B}}{m} - pv + qu \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{p} = \frac{I_y - I_z}{I_x} qr + \frac{I_{xz}}{I_x} (pq + \dot{r}) + M_{x_B} \\ \dot{q} = \frac{I_z - I_x}{I_y} pr + \frac{I_{xz}}{I_y} (p^2 - r^2) + M_{y_B} \\ \dot{r} = \frac{I_x - I_y}{I_z} pq + \frac{I_{xz}}{I_z} (qr + \dot{p}) + M_{z_B} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن u, v, w نشان دهنده مولفه‌های سرعت خطی و p, q, r مولفه‌های سرعت زوایه‌ای در دستگاه مختصات متصل به بدنه هستند، m جرم ربات می‌باشد، و $I_z = 0.00822 \text{ kg.m}^2$ ممان اینرسی ربات حول محور عمودی بدنی و $I_x = I_y = 0.03435 \text{ kg.m}^2$ ممان اینرسی حول محورهای جانبی هستند، بدلیل متقارن بودن جسم I_{xy} صفر فرض می‌شود، F, M بیانگر نیروها و گشتاورهای وارد بر ربات در دستگاه مختصات بدنی می‌باشند که بر حسب سرعت زوایه‌ای روتور اصلی و زوایه‌های صفحات کنترلی و نیز نیروهای آئرو دینامیکی و خارجی وارد به ربات نوشته می‌شوند. این سیستم دارای ورودی‌های کنترلی کمتر از تعداد درجات آزادی بوده و یک سیستم تحریک ناقص است. همچنین با توجه به اینکه سرعت دوران دو روتور هم اندازه و در خلاف جهت یکدیگر است اثر ژيروسکوپی آنها خنثی می‌شود.

جدیدی از کنترل مود لغزشی فازی با ترکیب منطق فازی به منظور حذف پدیده چترینگ را برای کنترل جهتگیری کوادروتور معرفی کردند. تانگ و همکاران [8] در پژوهشی کنترل مود لغزشی فازی تطبیقی را برای ردیابی جهتگیری کوادروتور مورد استفاده قرار دادند. در پژوهشی دیگر برای تنظیم جهتگیری کوادروتور بدون سرنشین، کنترل مود لغزشی تقویت ضرایب فازی تطبیقی (AFGS-SMC) پیشنهاد شده است [9]. سانگ و سان [10] روش کنترل جبرانی تطبیقی را بر پایه روش پسگام تطبیقی برای مدل جهتگیری کوادروتور، که با کاهش جزئی سرعت چرخش، آشفته‌گی جریان هوا و عدم قطعیت پارامترهای اینرسی همراه است، پیشنهاد کردند. تانگ و همکاران [11] از قانون فیدبک حالت برای کنترل کوادروتور استفاده کرده‌اند، حالت‌های غیر قابل اندازه‌گیری را به وسیله مشاهده‌گر مرتبه کاهش یافته تخمین زده‌اند و ضرایب کنترل و مشاهده‌گر را با بهره‌گیری از روش تنظیم درجه دوم خطی بهینه کرده‌اند. مدل ارائه شده در عین حال که پایداری سیستم را حفظ می‌کند، موجب می‌شود زمان پاسخ کاهش یابد.

تحقیقاتی نیز در مورد کنترل ربات‌های تک موتور هم محور وجود دارد. لیمناپوس و همکاران [12] کنترلی بر مبنای منطق فازی را روی میکرو هلیکوپتر هم محور با کاربری محیط داخلی اعمال کردند که برای کنترل موقعیت، جهتگیری و ارتفاع روی مدل غیرخطی هلیکوپتر شبیه سازی شده است. اگر چه کنترل کننده ویژگی‌های مقاومت یک کنترل کننده قوی را ندارد، اما نسبت به اغلب تغییرات پارامتری نسبتاً مقاوم است. وی و همکاران [13] یک الگوریتم کنترلی مود لغزشی PID برای یک ربات پرنده با موتور هم محور و دارای مکانیزم پایدارساز ارائه کرده‌اند و روی مدل آدامز و متلب و نیز تست تجربی پیاده سازی نموده‌اند. شو و همکاران [14] نیز روی یک مکانیزم ربات مشابه کنترلر مود لغزشی پسگام مقاوم با تقسیم به دو بخش کنترل زاویه و کنترل موقعیت طراحی و تست نموده‌اند.

در پژوهش حاضر به طراحی و شبیه سازی کنترل کننده خطی سازی فیدبک جزئی و پسگام تطبیقی برای یک ربات پرنده با موتور هم محور و بدون مکانیزم پایدارساز در ملخ‌ها پرداخته شده است. در عوض برای پایدارسازی از دو بالک در قسمت پایین ربات استفاده شده است که هر کدام توسط یک سروموتور کنترل می‌شوند. نتایج شبیه سازی نشان دهنده کارایی کنترلر ها می‌باشد و در انتها کارایی دو کنترلر باهم مقایسه شده‌اند.

۲- مدل دینامیکی ربات

ساختار ربات پرنده مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. بخش پیشران و کنترل ربات شامل دو ملخ هم محور (که برای سادگی در شکل یک ملخ نمایش داده شده) و دو جفت بالک پایینی (سطوح کنترلی) است که در یک مجرای آیرودینامیکی بنام داکت فن قرار گرفته و با یک مکانیزم گیمبال به قفس کروی متصل شده است. در این ربات روتور هم محور وظیفه تامین نیروی تراست در راستای محور یابو برای غلبه بر نیروی وزن و بالا بردن ربات را برعهده دارد و سطوح کنترلی نیروی لازم برای حرکت در محورهای x و y و دوران پیچ و رول را تامین می‌کنند. مکانیزم گیمبال یک سیستم غیرفعال سه محوری است که اجازه دوران آزاد قفس محافظ نسبت به بدنه ربات را فراهم می‌کند. یکی از مزایای روتور هم محور این است که تنها یک موتور تراست عمودی را فراهم می‌کند و ابعاد روتورها کاهش می‌یابد. همچنین بدلیل عدم نیاز به تامین گشتاور معکوس برای خنثی کردن گشتاور پیچشی ناشی از دوران روتور اصلی، نیازی به قرار دادن روتور بر دم

اگر D نقطه ای روی بدنه ربات به فاصله d از مبدا در راستای Z باشد می توان d را طوری انتخاب نمود که دینامیک صفر حذف شود و معادلات دینامیکی به فرم زیر درآید.

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_D \\ m\dot{v}_D \\ \dot{R} \\ I\dot{\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_D \\ \bar{u}Re_3 - mge_3 + F_{ext} \\ R\tilde{\Omega} \\ \tau_{CS} + \tilde{e}_3 R^T M_{ext} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن $\bar{u} = Tmd(p^2 + q^2)$ بوده و τ_{CS} گشتاور تولید شده توسط صفحات کنترلی است.

با فرض $I_x = I_y$ معادله حرکت دورانی حول Z به صورت زیر درمی آید.

$$I_z \dot{r} = \tau_{CSz} \quad (7)$$

که با قانون کنترلی زیر به نقطه $r = 0$ همگرا می شود. بدین ترتیب دینامیک یا از دینامیک سیستم جدا می شود.

$$\tau_{CSz} = -k_r r \quad (8)$$

سپس می خواهیم کنترلی طراحی کنیم که موقعیت ξ_D نقطه کنترل D را در یک موقعیت مطلوب پایدارسازی کند. با تعریف توابع خطا به صورت

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \xi_D - \xi_r \\ \delta_2 &= m(K_1 \delta_1 + v_D) \\ \delta_3 &= \bar{u} Re_3 - \alpha_1 \\ \delta_4 &= \bar{u} Re_3 + \bar{u} Rsk(\Omega) e_3 - \alpha_2 \end{aligned} \quad (9)$$

و فیلترهای تخمین به صورت

$$\begin{cases} \dot{\hat{F}}_{ext} = \Gamma_F (\delta_2 - (K_1 + K_2) \delta_3 - G_4 \delta_4) \\ \dot{\hat{M}}_{ext} = \Gamma_M (\bar{u}/I_x) \pi_{Re_3} \delta_4 \end{cases} \quad (10)$$

با استفاده از توابع لیاپانوف مناسب می توان قانون کنترلی به صورت زیر استخراج نمود که موقعیت سیستم را پایدارسازی کند.

$$\begin{bmatrix} \bar{u} \\ I_x \tau_x \\ -\bar{u} \\ I_4 \tau_y \\ \ddot{u} \end{bmatrix} = R^T (-\alpha_3 + v) \quad (11)$$

در روابط فوق ξ_r موقعیت مطلوب ثابت نقطه D است، $K_i > 0$ ضرایب ثابت هستند، Γ_M و Γ_F اسکالرهای ثابت برای تنظیم دینامیک تطبیقی هستند و

$$\begin{cases} \chi_1 = \delta_1 \\ \alpha_1 = \left(\frac{1}{m} - mK_1^2\right)\delta_1 + (K_1 + K_2)\delta_2 + mge_3 + \hat{F}_{ext} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= -K_1 \left(\frac{2}{m} - mK_1^2\right) - \frac{K_2}{m} \\ C_2 &= \frac{1}{m^2} - K_1^2 - K_1 K_2 - K_2^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \chi_2 = \chi_1 + (K_1 + K_2)\delta_3 \\ \alpha_2 = C_1 \delta_1 + (1 + C_2)\delta_2 - (K_1 + K_2 + K_3)\delta_3 + \Gamma_F \chi_2 \end{cases} \quad (14)$$

۳- طراحی کنترل کننده و پایدارسازی

۳-۱- کنترل خطی سازی فیدبک جزئی

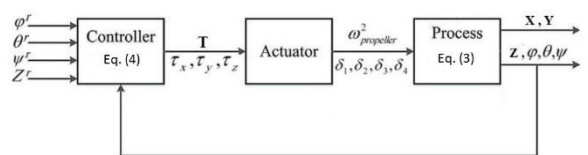
معادلات دینامیکی (۱ و ۲) بر حسب زوایای اولر رول، پیچ و یاو می توانند به دستگاه مختصات زمین تصویر شوند و برای حرکت در حوالی حالت شناوری، یعنی حالتی که زوایای اولر کمتر از ۶ درجه باشند با صرف نظر از سینوس زوایا معادلات به فرم زیر نوشته می شوند.

$$\begin{cases} m\ddot{x} = 0 \\ m\ddot{y} = 0 \\ m\ddot{z} + mg = T \\ I_x \ddot{\phi} + (I_z - I_y) \dot{\theta} \dot{\psi} = \tau_x \\ I_y \ddot{\theta} + (I_x - I_z) \dot{\phi} \dot{\psi} = \tau_y \\ I_y \ddot{\psi} = \tau_z \end{cases} \quad (3)$$

که در آن T نیروی تراست خالص وارده بر ربات بوده و τ_x, τ_y, τ_z گشتاورهای ناشی از نیروهای لیفت وارده بر بالک های پایینی هستند. سیستم فوق دارای ۶ درجه آزادی با ۴ ورودی کنترلی می باشد. براساس این رابطه $q_1 = [x \ y]^T$ و $q_2 = [z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ بردار حالت های فعال بوده و $U = [T \ \tau_x \ \tau_y \ \tau_z]^T$ بردار ورودی های کنترلی سیستم می باشد. بنابراین این روش قادر به کنترل پایداری سیستم است و از آن نمی توان برای کنترل موقعیت ربات در صفحه افقی بهره برد. با اعمال کنترلر خطی سازی فیدبک تناسبی و مشتقی برای قسمت فعال سیستم قانون کنترلی به صورت زیر نوشته می شود.

$$\begin{bmatrix} T \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mk_{p1}(z^r - z_D) - mk_{d1}\dot{z} \\ I_x k_{p2}(\phi^r - \phi) - I_x k_{d2} \dot{\phi} + (I_z - I_y) \dot{\theta} \dot{\psi} + mg \\ I_y k_{p3}(\theta^r - \theta) - I_y k_{d3} \dot{\theta} + (I_x - I_z) \dot{\phi} \dot{\psi} \\ I_z k_{p4}(\psi^r - \psi) - I_z k_{d4} \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در آن مقادیر k_{pi} ضرایب تناسبی و k_{vi} ضرایب مشتقی هستند و بالابویس r نشان دهنده مقادیر مطلوب درجات آزادی هستند. می توان اثبات نمود که نقطه $\dot{x}_D = 0, \dot{y}_D = 0$ نقطه تعادل دینامیک صفر سیستم است. دیاگرام بلوکی این کنترل کننده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- بلوک دیاگرام کنترل کننده خطی ساز فیدبک جزئی

۳-۲- کنترل پسگام تطبیقی

معادلات دینامیکی (۱) و (۲) بر حسب دستگاه مختصات زمین به فرم زیر نوشته می شوند.

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ m\dot{v} \\ \dot{R} \\ I\dot{\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ RF_B \\ R\tilde{\Omega} \\ -\Omega \times I\Omega + M_B \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن ξ موقعیت ربات در دستگاه مختصات زمین، Ω سرعت دورانی ربات در دستگاه مختصات متصل به بدنه، $\tilde{\Omega}$ ماتریس پادمقارن آن و R ماتریس دوران (کسینوس های هادی) دستگاه بدنی نسبت به زمین می باشد.

10, $i = 1, \dots, 4$ را به دست می‌آوریم. سپس سیستم حلقه بسته را با شرایط اولیه

$$\begin{aligned} X(0) = 0, Y(15) = 1, Z(0) = 1 \text{ m} \\ \phi(0) = 2^\circ, \theta(0) = 15^\circ, \psi(0) = 5^\circ \end{aligned} \quad (18)$$

و مقادیر مطلوب

$$\phi^r = 0, \theta^r = 0, \psi^r = 0, Z^r = 3 \quad (19)$$

شبیه سازی می‌کنیم که نتیجه پیاده سازی الگوریتم کنترلی برای ربات در نمودار شکل‌های ۴ و ۵ و ۶ نشان داده شده است.

مطابق نتایج شبیه سازی، کنترل‌کننده فیدبک جزئی قادر به پایدارسازی جهت‌گیری و موقعیت عمودی سیستم است. پهباد پس از گذشت حدود ۵۰ ثانیه به نقطه مطلوب (۱۹) می‌رسد که ملاحظه می‌شود مدت زمان مورد نیاز جهت کنترل پایداری طولانی است و این از معایب این روش کنترلی می‌باشد. ارتفاع پهباد پس از گذشت زمانی کمتر از ۵۰ ثانیه از مقدار اولیه به مقدار مطلوب می‌رسد و موقعیت در راستای محورهای X و Y در محدوده $|\Delta| < 1 \text{ m}$ پایدار می‌شود. از این روش کنترلی برای آغاز حرکت ربات و رسیدن به شرایط شناوری می‌توان استفاده کرد.

جدول ۱- پارامترهای هندسی و سینتیکی ربات

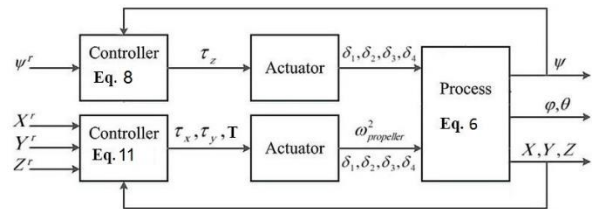
مقدار	نماد	پارامتر
0.837	$m \text{ (kg)}$	جرم بدنه ربات
0.47	$D_c \text{ (m)}$	قطر قفس محافظ
0.0064	$S \text{ (m}^2\text{)}$	مساحت سطوح کنترلی
0.05	$L \text{ (m)}$	موقعیت عمودی سطوح کنترلی نسبت به مرکز جرم
0.03	$l \text{ (m)}$	موقعیت افقی سطوح کنترلی نسبت به مرکز جرم
0.0614	$A \text{ (m}^2\text{)}$	مساحت دایره ای ملخ‌ها
0.2	C_L	ضریب لیفت
0.05	C_D	ضریب درگ

$$\begin{cases} \chi_3 = \chi_2 - G_4 \delta_4 \\ \alpha_3 = -G_1 \delta_1 - G_2 \delta_2 + (1 - G_3) \delta_3 + (K_4 + G_3) \delta_4 \\ -\bar{u}(p^2 + q^2) \text{Re}_3 - G_5 \Gamma_F (\chi_3 - \chi_2) \\ + 2\bar{u} Rsk(\Omega) e_3 + (\bar{u} / I_x) \pi_{\text{Re}_3} \hat{M}_{ext} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} G_1 = -K_1 C_1 - \frac{1}{m} (C_2 + 1 + \Gamma_F) \\ G_2 = \frac{C_1}{m} - K_1 (C_2 + 1 + \Gamma_F) - G_5 \\ G_3 = -(C_2 + 1 + \Gamma_F) + G_5 K_3 \\ G_4 = C_2 + 1 + \Gamma_F + G_5 (K_1 + K_2) \\ G_5 = (K_1 + K_2) (1 + \Gamma_F) + K_3 \end{cases} \quad (16)$$

$$v = -G_4 \Gamma_F \delta_3 \quad (17)$$

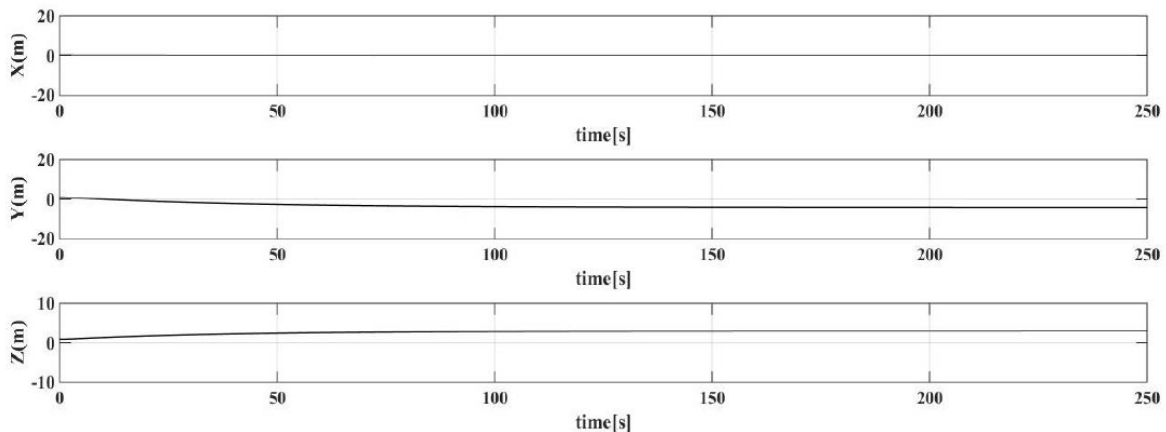
بلوک دیاگرام الگوریتم کنترلی طراحی شده با استفاده از قانون کنترلی (۱۱) در شکل ۳ نشان داده شده است.



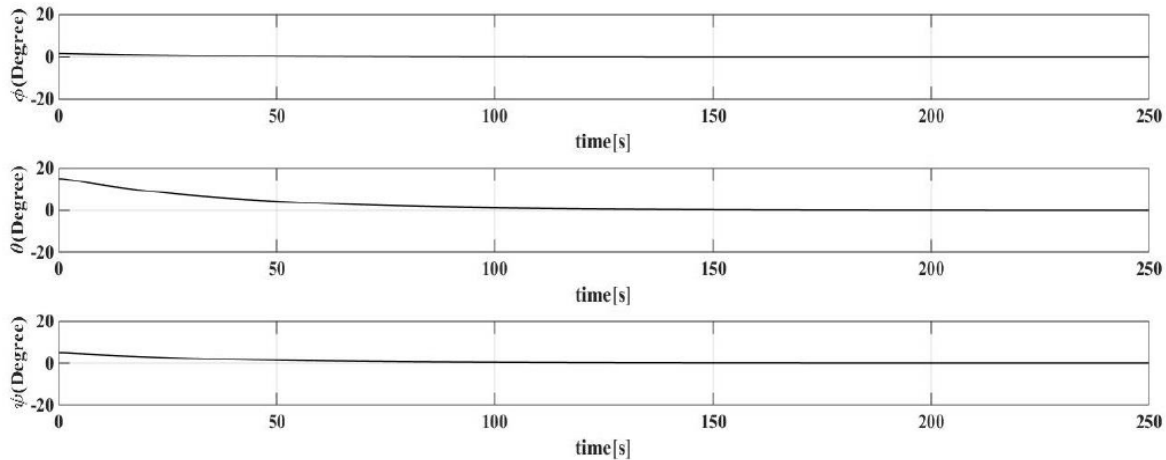
شکل ۳- بلوک دیاگرام کنترل‌کننده پسگام تطبیقی

۴- نتایج شبیه سازی

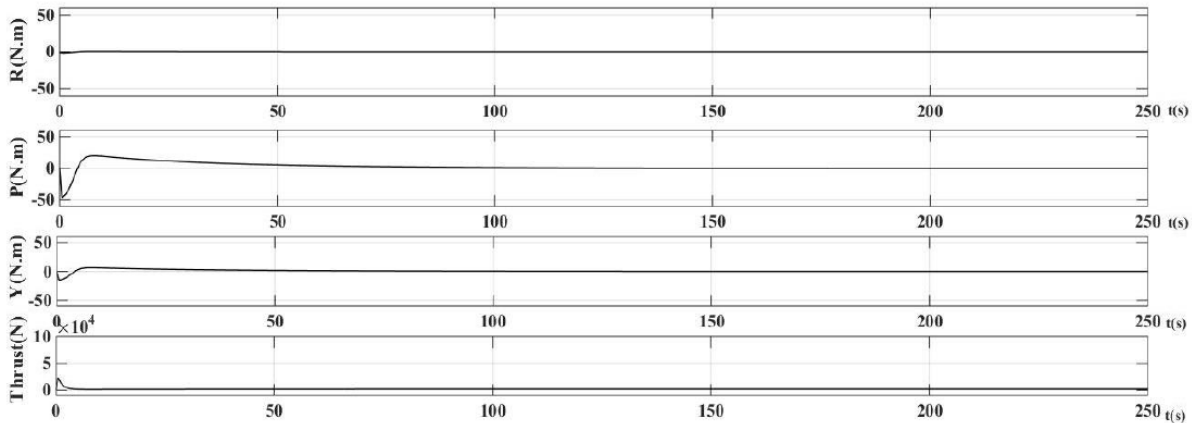
در این بخش معادلات دینامیکی ربات را با پارامترهای ذکر شده در جدول ۱ و به ازای دو کنترلر طراحی شده در بخش قبل شبیه سازی می‌کنیم. ابتدا کنترلر خطی ساز فیدبک جزئی را بررسی می‌کنیم. با استفاده از روش آزمون و خطا برای عملکرد مطلوب کنترلر ضرایب $k_{p,i} = 11, k_{d,i} =$



شکل ۴- نمودار مولفه های مسیر ربات بر حسب زمان برای کنترلر خطی ساز فیدبک جزئی



شکل ۵- نمودار زوایای اولر ربات بر حسب زمان برای کنترلر خطی ساز فیدبک جزئی



شکل ۶- نمودار ورودی های کنترلی بر حسب زمان برای کنترلر خطی ساز فیدبک جزئی

$$\xi_r = \left[8 \sin(0.1t), 8 \sin(0.1t) + \frac{\pi}{2}, 0.2t - 8 \right]^T$$

می‌باشد. در این حالت نیز مانند حالت قبل، در زمان ۲۵ ثانیه از شروع پرواز یک نیروی خارجی $5 N$ موجب آشفتگی به ربات می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی کنترل کننده برای موقعیت، جهت‌گیری و ورودی‌های کنترلی ربات به ترتیب در نمودار شکل‌های ۹ و ۱۰ و ۱۱ قابل مشاهده است. مطابق این نمودارها با اعمال نیروی خارجی مزاحم، ربات همچنان پایداری خود را حفظ می‌کند اما در عوض مقداری آفست نسبت به موقعیت مطلوب ایجاد می‌شود. مقدار خطای ایجاد شده برای مولفه‌های مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است که مطابق آن پس از اعمال نیروی آشفتگی و رسیدن سیستم به حالت پایا خطای $0.5 m$ در راستای x و y و خطای $5 m$ در راستای z در طول زمان در طی مسیر متغیر بعدی به وجود می‌آید.

اکنون به شبیه‌سازی و بررسی کنترل کننده پسگام تطبیقی می‌پردازیم. الگوریتم کنترلی با پارامترهای زیر شبیه‌سازی می‌شود.

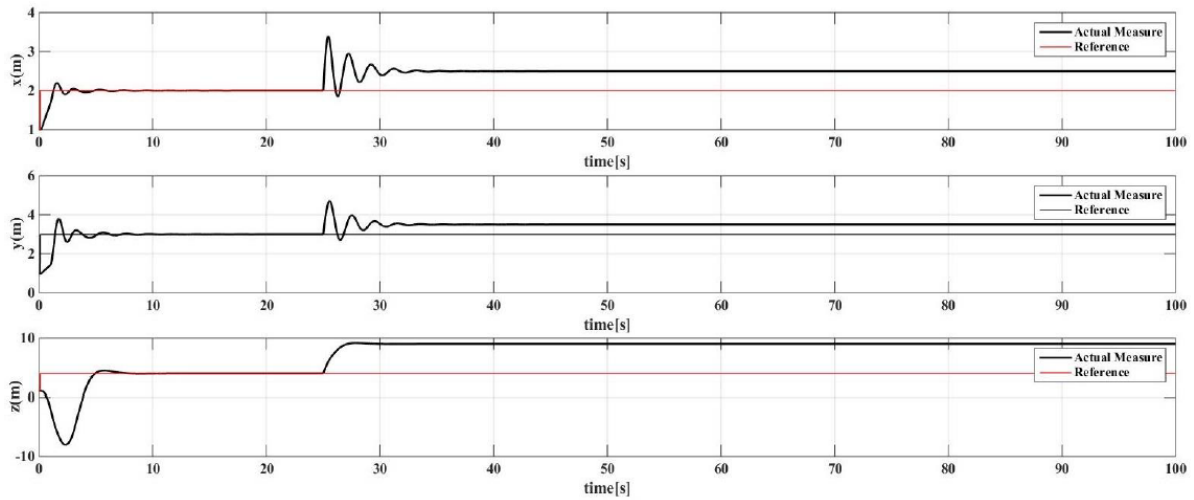
$$K_1 = 0.4, K_2 = 1, K_3 = 4, K_4 = 6 \quad (18)$$

$$k_r = 10, \Gamma_F = 0.0374, \Gamma_M = 4.8 \times 10^{-5}$$

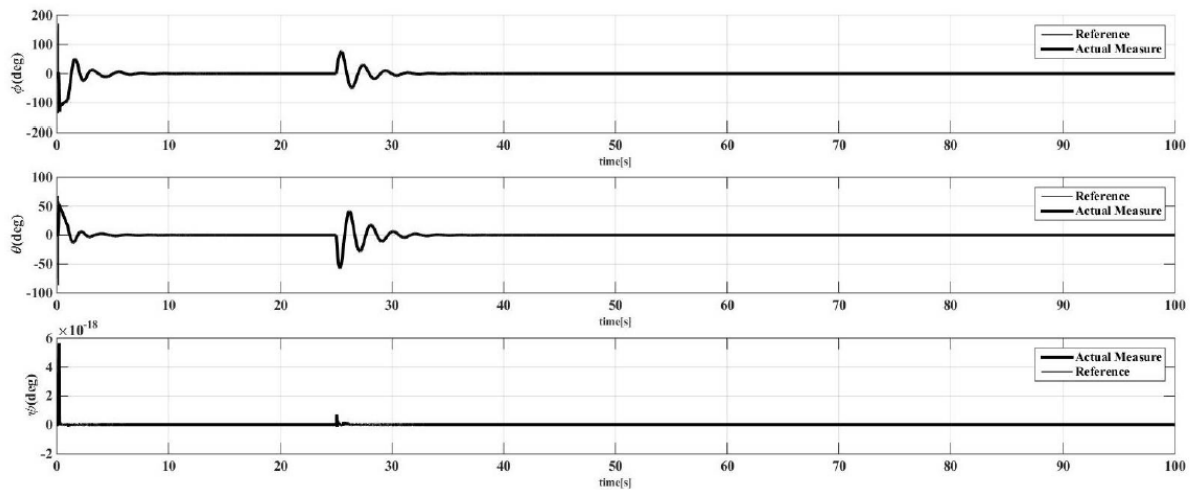
ربات پرند در ابتدا در موقعیت $\xi(0) = [0, 1, 1]^T$ قرار دارد. هدف رسیدن به موقعیت مطلوب $\xi_r = [2, 3, 5]^T$ است. در ثانیه ۲۵ پرواز، یک نیروی $F_y = 5 N$ موجب آشفتگی به ربات اعمال می‌شود که تقریباً معادل نیروی برخورد ربات با یک مانع در سرعت پرواز $0.1 m/s$ است. نمودار موقعیت و جهت‌گیری ربات حاصل از شبیه‌سازی و پیاده‌سازی کنترل کننده به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

همانطور که در نمودارها ملاحظه می‌شود قبل از اعمال نیروی آشفتگی به سیستم خطای موقعیت به صفر میل می‌کند اما پس از اعمال آن پس از گذشت ۵ ثانیه سیستم به حالت پایدار می‌رسد ولی یک خطای حالت ماندگار در موقعیت سیستم به وجود می‌آید که در راستای محور x و y مقدار آن $0.5 m$ است و در راستای z خطای $5 m$ نسبت به نقطه مرجع مشاهده می‌شود.

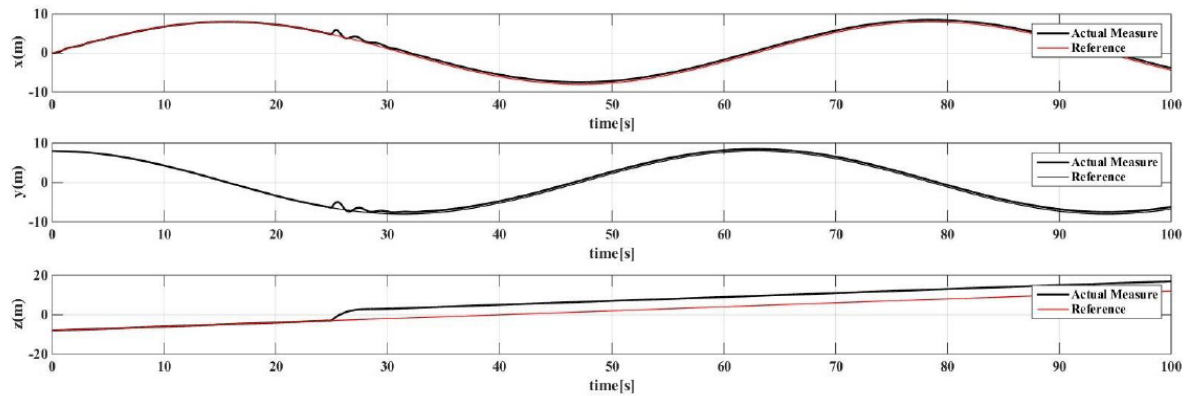
در شبیه‌سازی بعدی پهباد در ابتدا در موقعیت $\xi(0) = [0, 8, -8]^T$ قرار دارد. هدف طی کردن مسیر مطلوب



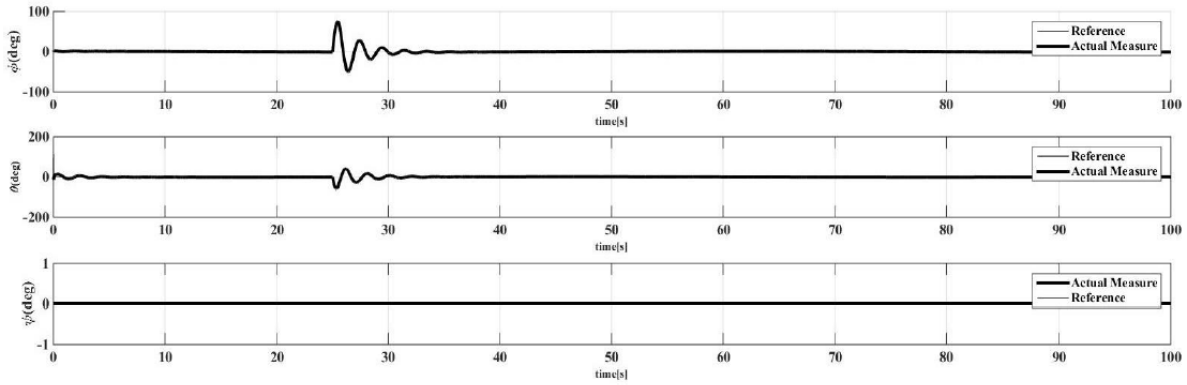
شکل ۷- نمودار مولفه های موقعیت ربات بر حسب زمان برای رسیدن به نقطه هدف با کنترلر پسگام تطبیقی



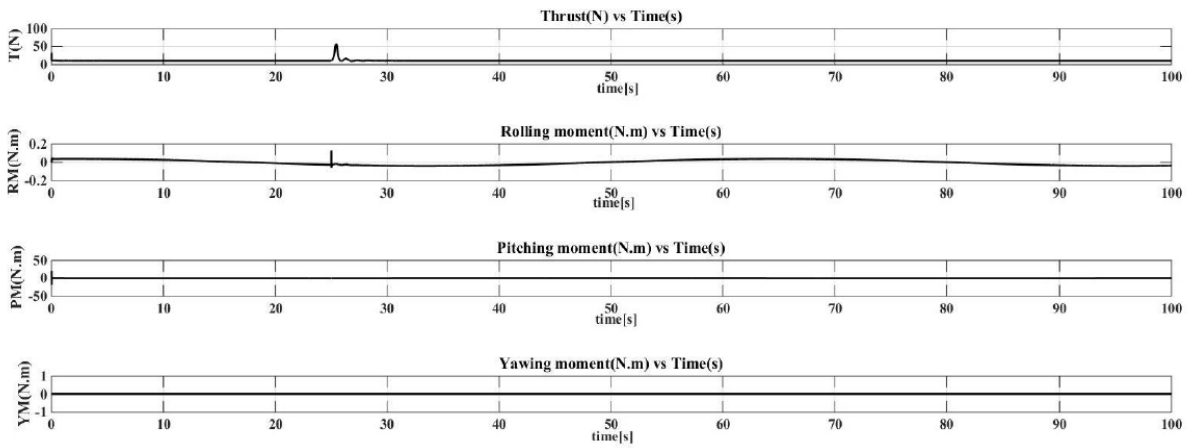
شکل ۸- نمودار زوایای اولر ربات بر حسب زمان برای رسیدن به نقطه هدف با کنترلر پسگام تطبیقی



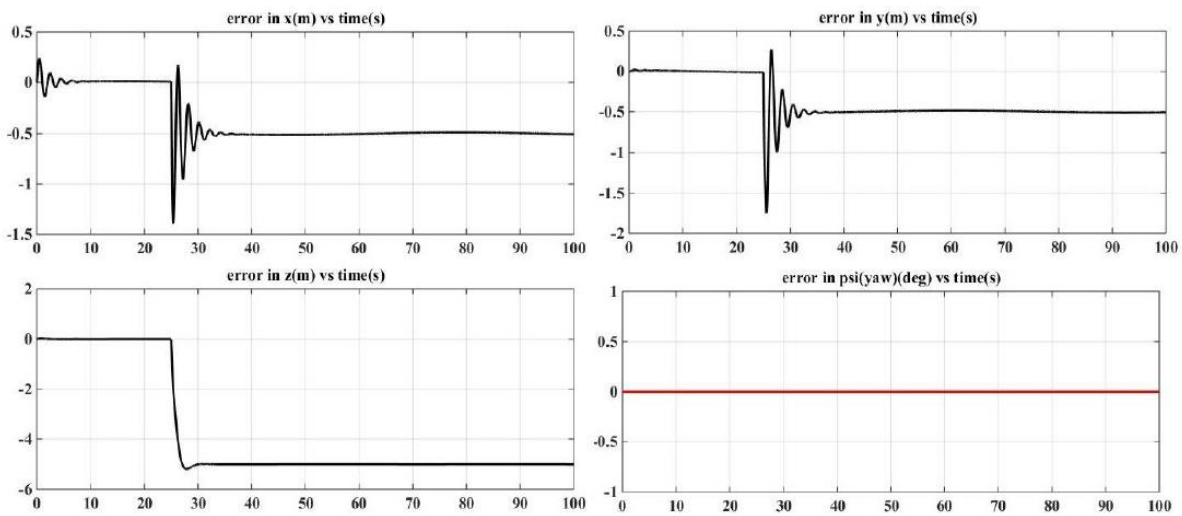
شکل ۹- نمودار مولفه های موقعیت ربات بر حسب زمان برای تعقیب مسیر با کنترلر پسگام تطبیقی



شکل ۱۰- نمودار زوایای اولر ربات بر حسب زمان برای تعقیب مسیر با کنترلر پسگام تطبیقی



شکل ۱۱- نمودار ورودی‌های کنترلی ربات بر حسب زمان برای تعقیب مسیر با کنترلر پسگام تطبیقی



شکل ۱۲- نمودار خطاهای موقعیت و زاویه یاو بر حسب زمان برای تعقیب مسیر با کنترلر پسگام تطبیقی

- [6] Jing-Jing Xiong, En-Hui Zheng, "Position and attitude tracking control for a quadrotor UAV", *ISA Transactions*, 2014.
- [7] Y. Deia, M. Kidouche, A. Ahriche. Boumerdes, Algeria, "Fully decentralized fuzzy sliding mode control with chattering elimination for a Quadrotor attitude", *4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2016.
- [8] Y. Tang, H. Zhang, J. Gong, "Adaptive-fuzzy Sliding-mode Control for the Attitude System of a Quadrotor", *Chinese Automation Congress (CAC)*, Wuhan, China, 2016.
- [9] Y. Yang, Y. Yan, "Attitude regulation for unmanned quadrotors using adaptive fuzzy gain-scheduling sliding mode control", *Aerospace Science and Technology*, 2016.
- [10] Z. Song, K. Sun, "Adaptive compensation control for attitude adjustment of quadrotor unmanned aerial vehicle," *ISA Transactions*, No. 69, pp.242-255, 2017.
- [11] Y. Tang, X. Xiao, Y. Li, "Nonlinear dynamic modeling and hybrid control design with dynamic compensator for a small-scale UAV quadrotor," *Measurement*, Vol. 109, 2017.
- [12] George Limnaios, N. Tsourveloudis, "Fuzzy Logic Controller for a Mini Coaxial Indoor Helicopter," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Corpus ID: 14961571, 2012.
- [13] Y. Wei, H. Chen, K. Li, H. Deng, D. Li, "Research on the Control Algorithm of Coaxial Rotor Aircraft based on Sliding Mode and PID", *Electronics*, 8, 1428, 2019.
- [14] J. Xu, Y. Hao, J. Wang, L. Li, "The Control Algorithm and Experimentation of Coaxial Rotor Aircraft Trajectory Tracking Based on Backstepping Sliding Mode," *Aerospace*, 8, 337, 2021.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش با معرفی نیروها و گشتاورهای موثر بر ربات پرنده داکتدفن با روتور هم محور و محفظه محافظ گیمبال، معادلات دینامیکی حرکت آن بیان شد. دو نوع کنترل کننده غیرخطی بر روی سیستم پیاده سازی شد. در روش اول که با استفاده از روش فیدبک خطی سازی جزئی هدف پایدارسازی سیستم حول حالت شناوری سیستم دنبال شد. مزایا و معایب روش فیدبک خطی سازی جزئی انباشته عبارتند از: با این روش کنترل ارتفاع و جهتگیری ربات امکانپذیر است و امکان کنترل موقعیت X و Y ربات فراهم نیست، با توجه به نمودارهای حاصل از پیاده سازی کنترل کننده، می توان بیان نمود که این روش فقط قابلیت پایدار سازی سیستم را دارد و امکان کنترل مسیر ربات را فراهم نمی کند، همچنین در این روش مدت زمان رسیدن به مقادیر مطلوب پایداری طولانی است. از مزایای این روش می توان به سادگی فرایند کنترلی در مقایسه با سایر روشهای کنترل غیرخطی برای سیستم های تحریک ناقص اشاره کرد.

در روش دوم به منظور رسیدن به نقاط مطلوب موقعیت، کنترل کننده غیرخطی با روش پسگام تطبیقی معرفی شد. مزایا و معایب روش کنترلی اعمال شده به پهباد عبارتند از: در این روش کنترل کننده قادر به هدایت سیستم به مقادیر و مسیر مطلوب بوده و قابلیت حفظ پایداری سیستم را دارا می باشد، مزیت دیگر این روش مقاوم بودن آن در برابر نیروهای خارجی مدل نشده و محدود اعمالی به سیستم است. اعمال نیروی خارجی به سیستم موجب خطای پایدار در تعقیب مسیر می شود. با افزایش مقدار نیروی خارجی دقت کنترل کننده کاهش می یابد.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از کمک های آقای مجید امانی در محاسبات عددی و رسم نمودارها تشکر و قدردانی می نمایند.

۷- مراجع

- [1] S. Bouabdallah, A. Noth, R. Siegwart, "PID vs LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor," *intelligent robots and Systems (IROS)*, Sendai, Japan, 2004.
- [2] S. Bouabdallah, R. Siegwart, "Backstepping and Sliding-mode Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor," *International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005.
- [3] H. Bouadi, M. Bouchoucha, and M. Tadjine, "Sliding Mode Control based on Backstepping Approach for an UAV Type-Quadrotor", *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Vol:1, No:2, 2007.
- [4] S. Seghour, M. Bouchoucha, H. Osmani, "From integral backstepping to integral sliding mode attitude stabilization of a quadrotor system: Real time implementation on an embedded control system based on a dsPIC micro controller," *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics*, Istanbul, Turkey, 2011.
- [5] H. Ramirez-Rodriguez, V. Parra-Vega, A. Sanchez and O. Garcia, "Integral Sliding Mode Backstepping Control of Quadrotors for Robust Position Tracking", *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2013.