

کنترل یک پرنده بدون سرنشین نوین دوپره کنترل شونده از طریق جابجایی مرکز جرم به روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل مقید

شاهین درویش پور^{*}، جعفر روشنی یان^۱، طه یاسینی^۲

^۱ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، گروه دینامیک پرواز و کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۲ استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، گروه دینامیک پرواز و کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲

ویرایش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۸

چکیده: در این مقاله ایده جدیدی از یک پرنده بدون سرنشین دوپره که به کمک جابجایی مرکز جرم و توسط مکانیزم جرم متحرک کنترل می‌شود ارائه شده و سپس برای اولین بار طراحی کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل خطی برای چنین پرنده ای ارائه شده است. به دلیل مقید بودن شدید ورودی های کنترلی در این نوع پرنده، لازم است در طراحی کنترلر قیود کنترلی لحاظ شوند و به همین دلیل سایر روش های کنترل نامقید در این نوع پرنده قابل استفاده نیستند. کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل خطی طراحی شده بر مبنای قیود کنترلی، بر روی مدل دینامیکی غیرخطی حرکت در صفحه پرنده فوق پیاده سازی شده و با کنترلر LQR مقایسه شده است، همچنین اثر در نظر گرفتن قیود کنترلی بر عملکرد کنترلر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی عملکرد قابل توجه این نوع کنترلر را در کنترل پرنده ضمن رعایت قیود کنترلی نشان می دهد.

کلمات کلیدی: پهپاد، دوپره، مرکز جرم متغیر، کنترل، کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل

Model Predictive Controller Design for a Novel Moving Mass Controlled Bi-rotor UAV

Shahin Darvishpoor, Jafar Roshanian, Taha Yasini

Abstract: This paper presents design and implementation of Model Based Predictive Controller (MPC) for a novel Bi-Rotor Moving Mass Controlled (MMC) Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Due to the strict constrained control inputs in this type of UAV, it is necessary to take into account the constrained controller design and un-constrained control methods are not applicable. MPC controller which is designed based on the linear model by considering control constraints, is implemented on the nonlinear model of the UAV's planar motion and compared with LQR controller, the simulation results show significant performance of this controller in control of the UAV while respecting control constraints.

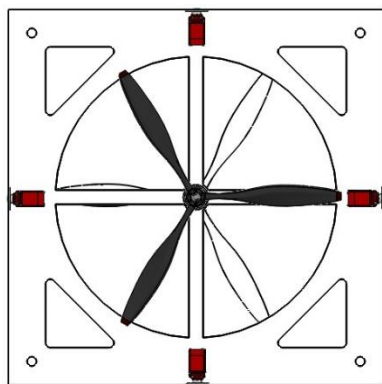
Keywords: UAV, Bi-Rotor, Moving Mass Control, Control, MPC

۱- مقدمه

موانع در پرنده های بدون سرنشین پرداخته اند [۷]. فعالیت مشابهی نیز توسط دیکسیت و همکارانش به منظور جلوگیری از برخورد با موانع در یک هشت پرّه انجام شده است [۸]. وانگ و همکارانش نیز به یک کنترل پیش بین مبتنی بر مدل بهینه به منظور کنترل یک چهارپرّه با وزن بار نامعلوم پرداخته اند [۹]. تلاش هایی نیز به منظور ترکیب کنترل پیش بین مبتنی بر مدل با سایر کنترلرها انجام گرفته است، از جمله باتاچارجی و همکارش با ترکیب کنترل پیش بین مبتنی بر مدل و کنترلر مدلفزشی به طراحی یک کنترلر مقاوم برای یک چهارپرّه پرداخته است [۱۰]. همچنین میلادی و همکارانش نیز با ترکیب یک مشاهده گر مدلفزشی و کنترل پیش بین مبتنی بر مدل غیرخطی به طراحی یک کنترلر تعقیب برای یک چهارپرّه پرداخته اند [۱۱]. کنترل پیش بین مبتنی بر مدل در سایر حوزه های هوافضا از جمله ماهواره ها، هواپیماها و فضاپیماها نیز کاربردهای گسترده ای دارد [۱۲]. با توجه به نوین بودن طرح دوبره عمودپرواز کنترل شونده از طریق جابجایی مرکز جرم، تا کنون فعالیت چندانی بر روی کنترل و هدایت آن انجام نشده است و طراحی کنترل پیش بین مبتنی بر مدل برای آن برای اولین بار در این مقاله مطرح می شود.

۲- دینامیک پرنده بدون سرنشین

پرنده مورد نظر این پژوهش از دو موتور و ملخ تشکیل شده است که در یک محور و در خلاف جهت یکدیگر نصب شده اند، به منظور حذف گشتاور عکس العملی و گشتاور ژيروسکوپی این دو موتور خلاف جهت یکدیگر می چرخند، بدنه پرنده به شکل یک قاب مربعی در نظر گرفته شده است که چهار جرم متحرک در اضلاع آن قرار گرفته اند، این چهار جرم که دو به دو باهم حرکت می کنند به همراه دو موتور که در مرکز بدنه قرار گرفته اند عملگرهای کنترلی پرنده محسوب می شوند. شکل ۱ تصویری نمادین از چنین پرنده ای را نشان می دهد.



شکل ۱ شماتیک پرنده بدون سرنشین دوبره کنترل شونده از طریق جابجایی مرکز جرم

با جابجایی جرم ها در راستای محور طولی، نیروی موتورها گشتاوری حول محور عرضی ایجاد می کند که برای کنترل کانال فراز مورد استفاده قرار می گیرد (شکل ۲-ب)، به همین ترتیب جابجایی جرم ها در راستای

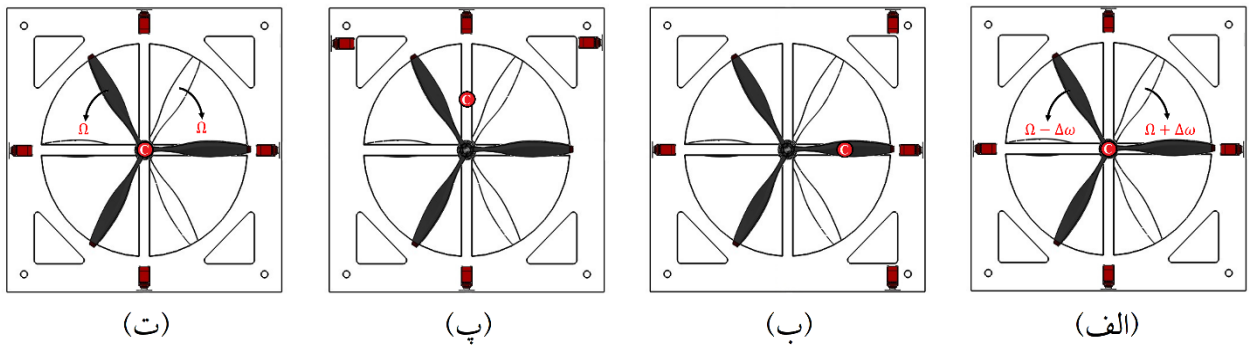
پرنده های بدون سرنشین در سالهای اخیر در بخش های مختلفی از صنعت از جنگل بانی، کشاورزی، تلوزیون و رسانه، ارائه اینترنت، جابجایی بسته های پستی تا نظارت و پایش مراکز صنعتی مانند پتروشیمی کاربرد داشته اند [۱]. با توجه به نیازهای متنوع موجود در هر یک از این بخش ها انواع مختلفی از پرنده های بدون سرنشین با ساختارهای متنوع توسعه داده شده اند، هر یک از این پرنده ها با توجه با پارامترهای پروازی مانند مداومت پروازی، وزن محموله، سرعت پرواز، میزان مانورپذیری و محدوده عملیاتی برای کاربردهای مختلفی مناسب خواهند بود [۲، ۳].

پرنده های بدون سرنشین به چند دسته مختلف تقسیم بندی می شوند، یکی از پرکاربردترین دسته ها، پرنده های عمودبرخاست هستند، این پرنده ها با توجه به عدم نیاز به باند نشست و برخاست در بیشتر بخش های صنعت قابل استفاده هستند، در این دسته از پرنده ها نیز چندپرّه ها به دلیل وزن کم، سادگی ساخت، ارزان قیمت بودن و محدوده عملیاتی مناسب بسیار پرطرفدار هستند [۱، ۳].

یکی از ایده هایی که در پرنده های بدون سرنشین چندپرّه مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده از مکانیزم جابجایی مرکز جرم به عنوان مکانیزم کنترلی است، در این روش یک یا چند جرم متحرک در سازه پرنده تعبیه می شوند، با جابجایی این اجرام متحرک مرکز جرم پرنده نیز جابجا می شود، در نتیجه نیروی پیشران پرّه ها حول مرکز جرم گشتاوری تولید می کند که برای کنترل پرنده مورد استفاده قرار می گیرد، این مکانیزم تا پیش از این در تک پرّه ها و چهارپرّه ها مورد استفاده قرار گرفته است و ایده استفاده از آنها در ساختاری جدید به صورتی که در بخش های آتی ذکر می شود برای اولین بار توسط نگارندگان این مقاله مطرح شده است [۲، ۴].

استفاده از مکانیزم جابجایی مرکز جرم برای کنترل پرنده چند مزیت عمده خواهد داشت، اولاً این ساختار امکان بهره برداری حداکثری از نیروی موتورها را در پرواز سیر ممکن می کند، که این موضوع به نوبه خود مداومت پروازی و سرعت سیر بالا را به همراه خواهد داشت، دوماً امکان اصلاح انحراف مرکز جرم از مرکز سطح را که به دلیل نامعینی های ساخت غالباً پیش می آید فراهم می کند [۵]. استفاده از دوبره، مانند آنچه در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است، علاوه بر مزایای فوق امکان صرفه جویی در مصرف انرژی و کاهش هزینه ها را نیز فراهم خواهد کرد.

به دلیل پرکاربرد بودن پرنده های بدون سرنشین چندپرّه تا کنون تحقیقات مختلفی بر روی کنترل آنها انجام شده است، که شامل انواع مختلف کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل نیز می شود، به عنوان مثال دانیالی به طراحی یک کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل سریع برای یک چهارپرّه پرداخته است و کنترلر طراحی شده را بر روی یک مدل آزمایشگاهی آزمایش کرده است [۶]. همچنین آما تو و همکارانش به طراحی یک سامانه بر اساس کنترل پیش بین مبتنی بر مدل به منظور جلوگیری از برخورد با



شکل ۴ نحوه کنترل پرنده در کانال های مختلف

۲-۱- دستگاه های مختصات

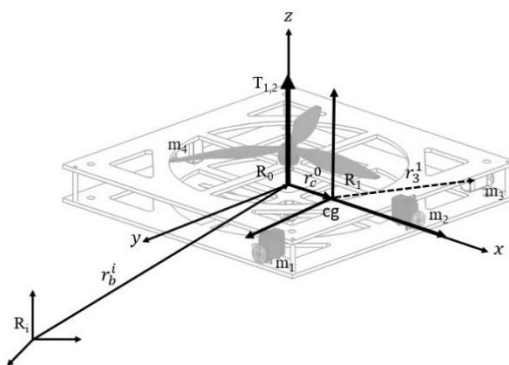
پیش از پرداختن به مدل سازی پرنده لازم است دستگاه های مختصات مورد استفاده در مدل سازی را تعریف کنیم، برای مدل سازی ما سه دستگاه مختصات اصلی لازم خواهیم داشت، دستگاه مختصات اینرسی زمینی، دستگاه مختصات بدنی و دستگاه مختصات مرکز جرم، حرکت دورانی پرنده در دستگاه مرکز جرم و حرکت انتقالی آن در دستگاه مرجع اینرسی بیان می شود.

دستگاه مرجع ما برای محاسبه موقعیت پرنده، دستگاه اینرسی ثابت در زمین است که با R_i نمایش داده می شود، از این پس بردارهایی که در این دستگاه بیان شده اند را با بالانویس i مشخص خواهیم کرد.

دستگاه مختصات بدنی دستگاه مختصات دوار متصل به بدنه است که در مرکز سطح پرنده قرار دارد و با R_0 نمایش داده می شود، از این پس بردارهایی که در این دستگاه بیان می شوند را با بالانویس 0 نمایش خواهیم داد.

دستگاه مختصات مرکز جرم، دستگاهی موازی با دستگاه مختصات بدنی است که به مرکز جرم منتقل شده است، این دستگاه را با R_1 نمایش می دهیم و از این پس بردارهایی که در این دستگاه بیان می شوند را با بالانویس 1 نمایش خواهیم داد.

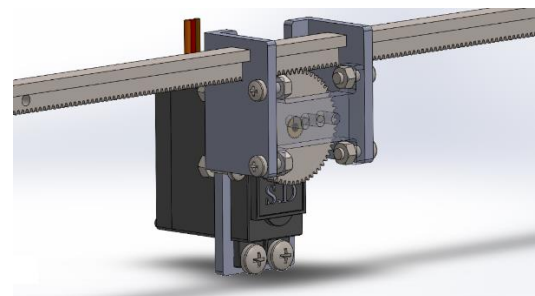
در شکل ۵ پایین وند معرف جسم یا المان و بالانویس معرف دستگاه مختصات است. به عنوان مثال T^3_1 به معنای بردار موقعیت جرم شماره ۳ در دستگاه مرکز جرم است.



شکل ۵ دستگاه های مختصات در نظر گرفته شده در مدل سازی پرنده

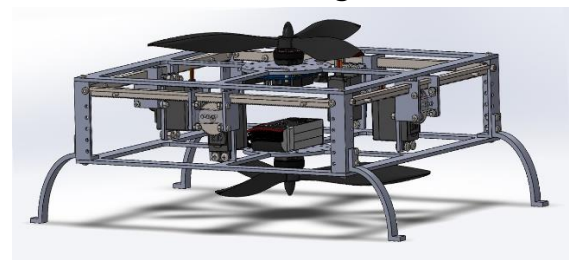
محور عرضی برای کنترل کانال غلت مورد استفاده قرار می گیرد (شکل ۲-ب)، به منظور کنترل کانال سمت نیز از ایجاد اختلاف در سرعت دورانی موتورهای مرکزی استفاده می شود (شکل ۲-الف). همچنین برای کاهش و افزایش ارتفاع نیز سرعت دورانی موتورهای مرکزی افزایش یا کاهش می یابد (شکل ۲-ت).

جرم های متحرک به صورت موتورهای کوچکی در بال های بدنه در نظر گرفته شده اند که به کمک مکانیزم چرخ دنده شانه ای حرکت می کنند. جابجایی جرم می تواند توسط سرووهای خطی، تسمه یا سایر مکانیزم ها انجام شود، شکل ۳ طرحی از مکانیزم سروو خطی قابل پیاده سازی را نشان می دهد که برای این نوع پرنده طراحی شده است.



شکل ۲ طرحی از مکانیزم سروو خطی برای جابجایی جرم ها به کمک چرخ دنده شانه ای

این طراحی دینامیک ساده ای دارد و به سهولت قابل پیاده سازی است، همچنین نسبت به سایر راه حل ها مانند استفاده از سروو های خطی موجود در بازار هزینه کمتری دارد و دقت مناسبی نیز به همراه خواهد داشت. شکل ۴ طرح مفهومی از پرنده بدون سرنشین دوبره کنترل شونده از طریق مرکز جرمی که به کمک طرح فوق ایجاد شده است را نشان می دهد.



شکل ۳ طرح مفهومی از دوبره کنترل شونده از طریق جابجایی مرکز

جرم

۱-۱- معادلات حرکت پرنده

$$I_s^1 = \bar{I}_b + 4\bar{I}_m + \begin{bmatrix} \sigma_{10} + \sigma_6 + \sigma_5 & \sigma_1 & 0 \\ +\sigma_3 - \sigma_8 & \sigma_9 + \sigma_6 + \sigma_4 & 0 \\ \sigma_1 & +\sigma_2 - \sigma_7 & ml^2 + \sigma_{10} + \sigma_9 \\ 0 & 0 & +\sigma_5 + \sigma_4 + \sigma_3 \\ & & +\sigma_2 - \sigma_8 - \sigma_7 \end{bmatrix} \quad (۳)$$

که در آن داریم:

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= 4m_b\mu^2\chi^2 & \sigma_3 &= 4m_b\mu^2Y^2 & \sigma_4 &= 16m\mu^2\chi^2 \\ \sigma_5 &= 16m\mu^2Y^2 & \sigma_6 &= ml^2/2 & \sigma_7 &= 8m\mu Y^2 \\ \sigma_8 &= 8m\mu\chi^2 & \sigma_9 &= 2m\chi^2 & \sigma_{10} &= 2mY^2 \\ \sigma_1 &= -4\mu\chi Y(4m\mu - 2m + m_b\mu) \end{aligned} \quad (۴)$$

در نتیجه مشتق ماتریس ممان اینرسی به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$I_s^1 = \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_{10} + \dot{\sigma}_6 + \dot{\sigma}_5 & \dot{\sigma}_1 & 0 \\ +\dot{\sigma}_3 - \dot{\sigma}_8 & \dot{\sigma}_9 + \dot{\sigma}_6 + \dot{\sigma}_4 & 0 \\ \dot{\sigma}_1 & +\dot{\sigma}_2 - \dot{\sigma}_7 & \dot{\sigma}_{10} + \dot{\sigma}_9 + \dot{\sigma}_5 \\ 0 & 0 & +\dot{\sigma}_4 + \dot{\sigma}_3 \\ & & +\dot{\sigma}_2 - \dot{\sigma}_8 - \dot{\sigma}_7 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

که در آن داریم:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_2 &= 8m_b\mu^2\chi\dot{\chi} & \dot{\sigma}_3 &= 8m_b\mu^2Y\dot{Y} & \dot{\sigma}_4 &= 32m\mu^2\chi\dot{\chi} \\ \dot{\sigma}_5 &= 32m\mu^2Y\dot{Y} & \dot{\sigma}_6 &= 0 & \dot{\sigma}_7 &= 16m\mu Y\dot{Y} \\ \dot{\sigma}_8 &= 16m\mu\chi\dot{\chi} & \dot{\sigma}_9 &= 4m\chi\dot{\chi} & \dot{\sigma}_{10} &= 4mY\dot{Y} \\ \dot{\sigma}_1 &= -4\mu\dot{\chi}Y(4m\mu - 2m + m_b\mu) \\ &-4\mu\chi\dot{Y}(4m\mu - 2m + m_b\mu) \end{aligned} \quad (۶)$$

که در آنها \bar{I}_i ممان اینرسی جرم i ام حول مرکز جرم خودش است.

۱-۱-۲ معادلات حرکت

با توجه به مرجع [4] معادلات غیرخطی حرکت انتقالی پرنده به صورت کلی به شکل زیر نوشته خواهد شد:

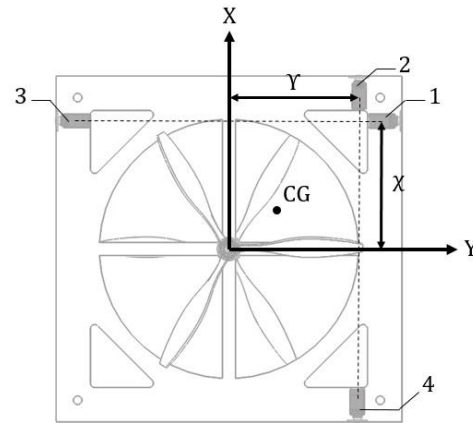
$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{b}{M}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2)(c(\varphi)s(\theta)c(\psi) \\ &+ s(\varphi)s(\psi) \\ &- \mu(2\ddot{\chi} - 2r\dot{Y}) \\ &- (-2\dot{r}\mu Y - 2r\mu\dot{Y}) \\ &- (2\mu Ypq - 2\mu\chi q^2 \\ &- 2\mu\chi r^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= \frac{b}{M}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2)(c(\varphi)s(\theta)s(\psi) \\ &- s(\varphi)c(\psi) \\ &- \mu(2\ddot{Y} + 2r\dot{\chi}) \\ &- (2\dot{r}\mu\chi + 2r\mu\dot{\chi}) \\ &- (-2\mu Yq^2 \\ &- 2\mu Yp^2 - 2\mu\chi pq) \end{aligned}$$

معادلات حرکت پرنده در این بخش بر اساس مقاله ای که پیشتر توسط نگارندگان منتشر شده است به صورت مختصر بیان می شوند. برای اطلاع دقیق از چگونگی استخراج معادلات خواننده به مقاله مذکور ارجاع داده می شود [4].

۱-۱-۱ مرکز جرم و ممان اینرسی

فرض می کنیم وزنه های طولی به اندازه χ و وزنه های عرضی به اندازه Y جابجا شده اند، در این صورت موقعیت وزنه ها و مرکز جرم به صورتی که در شکل ۶ نشان داده شده است خواهند بود.



شکل ۶ جابجایی کلی وزنه ها

با توجه به شکل فوق خواهیم داشت:

$$r_c^0 = \frac{\sum_{n=1}^4 m_n r_n^0}{M} = \mu \cdot [2\chi \quad 2Y \quad 0]^T \quad (۱)$$

که در آن μ برابر $\frac{m_n}{M}$ است، همچنین برای موقعیت وزنه ها در دستگاه مرکز جرم خواهیم داشت:

برای محاسبه ممان اینرسی پرنده حول مرکز جرم، لازم است ابتدا ممان اینرسی بدنه و وزنه ها را حول مرکز جرم پرنده محاسبه کنیم، از قضیه محورهای موازی خواهیم داشت [13]:

$$\begin{aligned} I_b^1 &= \bar{I}_b + m_b (r_b^{1T} \cdot r_b^1 E_3 - r_b^1 \cdot r_b^{1T}) \\ &= \bar{I}_b \\ &+ m_b \left(\mu^2 [2\chi \quad 2Y \quad 0] \begin{bmatrix} 2\chi \\ 2Y \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right. \\ &- \mu^2 \begin{bmatrix} 2\chi \\ 2Y \\ 0 \end{bmatrix} [2\chi \quad 2Y \quad 0] \left. \right) \\ &= \bar{I}_b \\ &+ \begin{bmatrix} 4m_b\mu^2Y^2 & -4m_b\mu^2\chi Y & 0 \\ -4m_b\mu^2\chi Y & 4m_b\mu^2\chi^2 & 0 \\ 0 & 0 & -4m_b\mu^2(\chi^2 + Y^2) \end{bmatrix} \quad (۲) \end{aligned}$$

ممان اینرسی چهار جرم متحرک نیز به ترتیبی مشابه محاسبه می شوند، پس از جاگذاری خواهیم داشت:

۱-۲- حرکت در صفحه

در این بخش حرکت پرنده در صفحه Y-Z را در نظر می گیریم، حرکت در این صفحه با کنترل زاویه φ و نیروی پیشران موتورها ممکن خواهد بود، با در نظر گرفتن این حرکت ضمن صرف نظر از سایر معادلات حالت می توانیم فرآیند طراحی کنترل را برای یکی از مانورهای مهم سیستم بررسی کنیم. در صورت جابجایی حداکثری وزنه ها، با در نظر گرفتن مقادیر زیر:

جدول ۱- پارامترهای عددی پرنده

پارامتر	علامت	مقدار
جرم وزنه ها	m	0.05kg
جرم پرنده	M	2kg
نسبت جرم وزنه به جرم کل	μ	0.025
جابجایی وزنه ها در راستای Y	γ	0.04m
جابجایی وزنه ها در راستای X	χ	0.04m

تغییرات ماتریس ممان اینرسی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Delta(I) = \begin{bmatrix} 0.0008 & 0.00004 & 0 \\ 0.00004 & 0.0008 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0016 \end{bmatrix} (kgm^2) \quad (14)$$

که کمتر از 3 درصد مقدار اولیه ماتریس ممان اینرسی است، بنابراین می توان از تغییرات ماتریس ممان اینرسی در اثر جابجایی وزنه ها صرف نظر کرد و ماتریس ممان اینرسی را ثابت در نظر گرفت.

با توجه به کوچک بودن نسبت جرم وزنه ها به وزن کل پرنده و همچنین جابجایی وزنه ها، عبارت هایی مانند $m\mu\chi$ که حاصل ضرب این مقادیر هستند، مقدار بسیار کوچکی خواهد داشت، بنابراین سایر عبارات مربوط به شتاب زاویه ای در مقابل شتاب حاصل از گشتاور پره ها مقدار قابل توجهی نخواهند داشت، در نهایت می توان تمام حرکت دورانی را حاصل از گشتاور پره ها و گشتاور نیروی ملخ دانست و از گشتاور تولید شده در اثر حرکت وزنه ها صرف نظر کرد در نتیجه می توان معادلات غیرخطی فضای حالت حرکت دورانی را به صورت زیر خلاصه کرد:

معادلات حرکت در صفحه برای پرنده ما از روابط ۷ و ۱۱ به صورت زیر خواهند بود:

$$\ddot{y} = \frac{b}{M}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2)(\cos(\varphi)\sin(\theta)\sin(\psi) - \sin(\varphi)\cos(\psi)) \quad (15)$$

$$\ddot{z} = \frac{b}{M}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2)(\cos(\varphi)\cos(\theta)) - g \quad (16)$$

$$\dot{\varphi} = p + r(\cos(\varphi)\tan(\theta)) + q(\sin(\varphi)\tan(\theta)) \quad (17)$$

$$\ddot{z} = \frac{b}{M}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2)(c(\varphi)c(\theta)) - g - \mu(2p\dot{\gamma} - 2q\dot{\chi}) - (2\dot{p}\mu\dot{\gamma} - 2\dot{q}\mu\dot{\chi} + 2p\mu\dot{\gamma} - 2q\mu\dot{\chi}) - (2\mu\dot{\gamma}qr + 2\mu\dot{\chi}pr) \quad (7)$$

معادلات فوق با صرف نظر کردن از اصطکاک هوا در مقابل حرکت انتقالی به دست آمده اند.

همچنین معادلات حرکت دورانی پرنده نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{p} = -\frac{I_{xy}\dot{q}}{I_{xx}} - \frac{I_{xz}\dot{r}}{I_{xx}} - \frac{\dot{I}_{xx}p}{I_{xx}} - \frac{\dot{I}_{xy}q}{I_{xx}} - \frac{\dot{I}_{xz}r}{I_{xx}} - \frac{q(I_{zx}p + I_{zy}q + I_{zz}r)}{I_{xx}} + \frac{r(I_{yx}p + I_{yy}q + I_{yz}r)}{I_{xx}} - \frac{q(4m\mu\dot{\gamma}\dot{\chi} - 4m\mu\dot{\chi}\dot{\gamma})}{I_{xx}} - \frac{2b\mu\dot{\gamma}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2)}{I_{xx}} \quad (8)$$

$$\dot{q} = -\frac{I_{yx}\dot{p}}{I_{yy}} - \frac{I_{yz}\dot{r}}{I_{yy}} - \frac{\dot{I}_{yx}p}{I_{yy}} - \frac{\dot{I}_{yy}q}{I_{yy}} - \frac{\dot{I}_{yz}r}{I_{yy}} - \frac{r(I_{xx}p + I_{xy}q + I_{xz}r)}{I_{yy}} + \frac{p(I_{zx}p + I_{zy}q + I_{zz}r)}{I_{yy}} - \frac{p(4m\mu\dot{\gamma}\dot{\chi} - 4m\mu\dot{\chi}\dot{\gamma})}{I_{yy}} + \frac{2b\mu\dot{\chi}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2)}{I_{yy}} \quad (9)$$

$$\dot{r} = -\frac{I_{zx}\dot{p}}{I_{zz}} - \frac{I_{zy}\dot{q}}{I_{zz}} - \frac{\dot{I}_{zx}p}{I_{zz}} - \frac{\dot{I}_{zy}q}{I_{zz}} - \frac{\dot{I}_{zz}r}{I_{zz}} - \frac{p(I_{yx}p + I_{yy}q + I_{yz}r)}{I_{zz}} + \frac{q(I_{xx}p + I_{xy}q + I_{xz}r)}{I_{zz}} - \frac{4m\mu\dot{\gamma}\dot{\chi}}{I_{zz}} - \frac{4m\mu\dot{\chi}\dot{\gamma}}{I_{zz}} + \frac{d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2)}{I_{zz}} \quad (10)$$

که معادلات سینماتیکی پرنده نیز به آنها اضافه می شود:

$$\dot{\varphi} = p + r(\cos(\varphi)\tan(\theta)) + q(\sin(\varphi)\tan(\theta)) \quad (11)$$

$$\dot{\theta} = q(\cos(\varphi)) - r(\sin(\varphi)) \quad (12)$$

$$\dot{\psi} = r\left(\frac{\cos(\varphi)}{\cos(\theta)}\right) + p\left(\frac{\sin(\varphi)}{\cos(\theta)}\right) \quad (13)$$

در حرکت در صفحه زوایای ψ و θ برابر صفر هستند بنابراین معادلات فوق به صورت زیر بازنویسی می شوند:

$$\ddot{y} = \frac{b}{M}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2)(-\sin(\varphi)) \quad (18)$$

$$\ddot{z} = \frac{b}{M}(\Omega_1^2 + \Omega_2^2)(\cos(\varphi)) - g \quad (19)$$

$$\ddot{\varphi} = \dot{p} \quad (20)$$

از رابطه ۸ برای \dot{p} با در نظر گرفتن $\theta = \psi = r = q = 0$ داریم:

$$\dot{p} = -\frac{2b\mu\gamma(\Omega_1^2 + \Omega_2^2)}{I_{xx}} \quad (21)$$

ورودی های سیستم به صورت زیر خواهند بود:

$$u_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2) \quad (22)$$

$$u_2 = \gamma \quad (23)$$

۱-۳- خطی سازی معادلات حرکت در صفحه

پیش از ادامه خطی سازی بار دیگر معادلات غیرخطی را با کمک روابط ۲۲ و ۲۳ بازنویسی می کنیم:

$$\dot{y} = f_1(\varphi, u_1, u_2) = -\frac{\sin(\varphi)}{M}u_1 \quad (24)$$

$$\dot{z} = f_2(\varphi, u_1, u_2) = -g + \frac{\cos(\varphi)}{M}u_1 \quad (25)$$

$$\dot{\varphi} = f_3(\varphi, u_1, u_2) = -\frac{2\mu}{I_{xx}}u_1u_2 \quad (26)$$

بنابراین معادلات خطی شده حرکت در صفحه در شرایط پرواز ایستا به صورت زیر محاسبه خواهند شد [4]:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \\ \varphi \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & 0 \\ 0 & \frac{-2\mu}{I_{xx}}Mg \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

با در نظر گرفتن خروجی به صورت زیر:

$$Y = \begin{bmatrix} y \\ z \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (28)$$

ماتریس های C و D نیز به صورت زیر به دست خواهند آمد:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

۲- کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل خطی

کنترلر پیش بین یک استراتژی بهینه است که با استفاده از پیش بینی مدل دینامیکی سیستم، می تواند به صورت همزمان چندین هدف کنترلی را با در نظر گرفتن قیود سخت، تحقق بخشد. کنترلر پیش بین در هر گام زمانی مسئله بهینه سازی را با در نظر گرفتن قیود حاکم بر سیستم حل می کند و دنباله ای از ورودی های کنترلی بهینه را برای اعمال به سیستم بدست می آورد. سپس بر مبنای افق کاهنده^۱ فقط جمله اول را به عنوان ورودی به سیستم اعمال می کند و رفتار دینامیکی سیستم را بر حسب افق پیش بین^۲ پیش بینی می نماید. مسئله کنترل پیش بین یک مسئله کنترل بهینه افق محدود است که با در نظر گرفتن قیود در هر گام زمانی حل می شود. تابع هزینه افق محدود در کنترلر پیش بین به صورت زیر در نظر گرفته می شود [7]:

$$J = \phi(\tilde{\eta}_{N_p}) + \sum_{k=0}^{N_p-1} L(\xi_k, \tilde{\eta}_k, u_k) \quad (31)$$

که در آن $(\tilde{\eta}_{N_p})$ تابع هزینه شرایط نهایی و $L(\xi_k, \tilde{\eta}_k, u_k)$ تابع هزینه شامل خطای ردیابی مسیر و مصرف انرژی است. در واقع کنترلر پیش بین با در نظر گرفتن تابع هزینه و قیود حاکم بر آن که شامل قیود فیزیکی بر روی ورودی ها و خروجی ها و معادلات دینامیکی سیستم است، ورودی های بهینه را برای اعمال به سیستم به دست می آورد. مسئله بهینه سازی افق محدود در کنترلر پیش بین به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{aligned} \min J \\ \text{s. t:} \\ \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX \\ \text{constraint} \end{aligned} \quad (32)$$

که پیش بینی حالت سیستم به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\begin{aligned} x(k+1|k) &= Ax(k) + B\Delta u(k) \\ x(k+2|k) &= A^2x(k) + AB\Delta u(k) \\ &\quad + B\Delta u(k+1) \\ &\vdots \\ x(k+N_p|k) &= A^{N_p}x(k) \\ &\quad + A^{N_p-1}B\Delta u(k) + \dots \\ &\quad + A^{N_p-N_c}B\Delta u(k+N_c) \\ &\quad - 1 \end{aligned} \quad (33)$$

و همچنین پیش بینی خروجی سیستم به صورت زیر بیان می شود:

$$Y = [y(k+1|k) \quad \dots \quad y(k+N_p|k)] \quad (34)$$

$$Y = Fx(k) + \phi\Delta u(k) \quad (35)$$

² Prediction horizon

¹ Receding horizon control

$$\Delta U = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \dots \quad \Delta u(k+N_c-1)]^T \quad (38)$$

در نتیجه قید مذکور را می توان به کمک رابطه ۳۷ به فرم زیر

$$\Delta U_{min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{max} \quad (39)$$

بازنویسی کرد:

$$-\Delta U \leq -\Delta U_{min} \quad (40)$$

$$\Delta U \leq \Delta U_{max}$$

کیود فوق نیز قابل بازنویسی به فرم قیدهای نابرابری زیر خواهند بود:

$$\begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix} \Delta U \leq \begin{bmatrix} -\Delta U_{min} \\ \Delta U_{max} \end{bmatrix} \quad (41)$$

این فرم برای تمام قیود دیگر از جمله قید خروجی و قید اندازه ورودی کنترلی نیز قابل اعمال خواهد بود. به طور کلی قیود باید بر تمامی گام های آینده اعمال شوند، در مورد ورودی های کنترلی خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+N_c-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ I \\ I \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} u(k-1) + \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & \dots & 0 \\ I & I & 0 & \dots & 0 \\ I & I & I & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I & I & I & \dots & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \Delta u(k+2) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c-1) \end{bmatrix} \quad (42)$$

اگر به کمک ماتریس های C_1 و C_2 معادله فوق را به صورت مختصر بازنویسی کنیم، روابط مربوط به قیود کنترلی به فرم زیر تبدیل خواهند شد:

$$-(C_1 u(k-1) + C_2 \Delta U) \leq -U_{min} \quad (43)$$

$$(C_1 u(k-1) + C_2 \Delta U) \leq U_{max} \quad (44)$$

که در آن U_{min} و U_{max} بردارهای ستونی با N_c المان U_{min} و U_{max} هستند. همچنین قیود مربوط به تغییرات متغیرهای کنترلی در رابطه ۴۰ نیز چنین خواهند بود. در نتیجه کنترل پیش بین مبتنی بر مدل در حضور قیود کنترلی به مسئله یافتن بردار پارامتر ΔU تبدیل می شود که تابع هزینه زیر را:

$$J = (R_s - Fx(k))^T (R_s - Fx(k)) - 2\Delta U^T \phi^T (R_s - Fx(k)) + \Delta U^T (\phi^T \phi + \bar{R}) \Delta U \quad (45)$$

با در نظر گرفتن اینکه قیود نابرابری زیر وجود دارند:

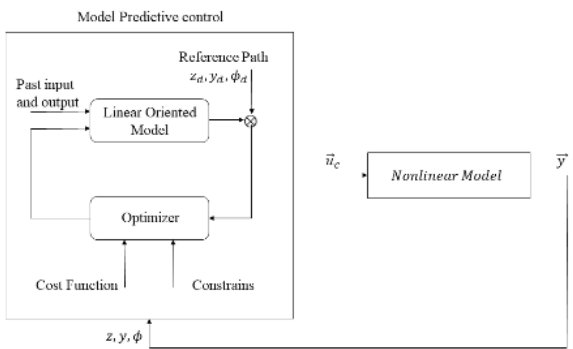
$$F = \begin{bmatrix} CA \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}$$

N_c افق کنترل^۱ نامیده می شود که بیانگر این است که سیستم با اعمال N_c ورودی کنترلی به مرجع اصلی در N_p گام خواهد رسید. کنترل بهینه افزایشی در پنجره بهینه سازی به صورت زیر داده شده است:

$$\Delta U = (\phi^T \phi)^{-1} (\phi^T \bar{R}_s r(k) - \phi^T Fx(k)) \quad (36)$$

ماتریس وزنی R ماتریسی هم مرتبه با $\phi^T \phi$ است همچنین بردار r بردار خروجی مطلوب در پنجره بهینه سازی است. در پیاده سازی کنترل، m پارامتر اول بردار ΔU برداشته می شوند تا کنترل بهینه افزایشی را تشکیل دهند.

در این مقاله کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل بر اساس مدل خطی طراحی و بر روی مدل غیرخطی پیاده سازی می شود. در شکل ۷ بلوک دیاگرام کنترلر طراحی شده نشان داده شده است.



شکل ۷ روند نمای کنترل پیش بین مبتنی بر مدل طراحی شده تابع هزینه و قیود

قیود کنترلی همزمان در اندازه و سرعت متغیرهای کنترلی وجود خواهند داشت، در مسئله ما به دلیل استفاده از سروو موتورها، حداکثر سرعت دورانی موتورها و در نتیجه حداکثر سرعت جایجایی جرم های متحرک مقید(به صورت اشباع) خواهند بود، بنابراین برای ورودی کنترلی در گام k ام خواهیم داشت:

$$\Delta u_{min} < \Delta u(k) < \Delta u_{max} \quad (37)$$

$$u_{min} < u(k) < u_{max}$$

کنترل پیش بین به وضعیت آینده سیستم نظر دارد، بنابراین در گام k در صورتی که افق مورد نظر N_c باشد، بردار پارامترهایی که باید بهینه سازی شوند به صورت زیر خواهد بود:

¹ Control horizon

کنترل یک پرنده بدون سرنشین نوین دویژه کنترل شونده از طریق جابجایی مرکز جرم به روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل مقید شاهین درویش پور، جعفر روشنی یان، طه یاسینی

آن سرعت موتورهای مرکزی و در نتیجه حداکثر نیروی برآر نیز محدود است، قیود در نظر گرفته شده در این مسئله در جدول ۲ آورده شده اند.

مقدار	قیود
۰.۰۴ متر	حداکثر جابجایی وزنی و ها $(\max(Y))$
۹۰۰۰	حداکثر سرعت دورانی
دوربرد دقیقه	موتورها $(\max(\Omega_i))$

۳- نتایج شبیه سازی

در این بخش عملکرد کنترل پیش بین مبتنی بر مدل خطی در کنترل پرنده مورد بررسی قرار می گیرد، بررسی ها شامل اثر افق های پیش بین و کنترل و در نظر گرفتن قیود کنترلی در طراحی کنترل بر عملکرد سیستم می شود، همچنین عملکرد کنترلر LQR به منظور مقایسه با کنترلر پیش بین طراحی شده مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱ اثر افق پیش بین و افق کنترل بر عملکرد سیستم

انتخاب پارامترهای کنترلی افق پیش بین و افق کنترلی مسئله ای است که می تواند به کمک سعی و خطا، تجربه یا روش های بهینه سازی به دست آید، شکل ۸ نتایج شبیه سازی برای سه افق کنترلی مختلف و افق پیش بین $N_p=45$ را نشان می دهد.

همانطور که مشخص است در این افق پیش بین تغییرات افق کنترلی تاثیر چندانی بر رفتار کلی سیستم ندارد، شکل ۹ اثر تغییرات افق پیش بین بر رفتار سیستم را در افق کنترل $N_c=15$ نشان می دهد. همانطور که مشخص است تاثیر افق پیش بین در این افق کنترلی بر رفتار سیستم قابل ملاحظه است و با افزایش افق پیش بین شاهد رفتار بهتری از سیستم خواهیم بود. این موضوع اهمیت انتخاب صحیح این دو پارامتر را به خوبی نشان می دهد.

۳-۲ نتایج پیاده سازی کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل

پس از چند مرتبه سعی و خطا با در نظر گرفتن شرایطی که امکان مقایسه با کنترلر LQR را فراهم کند، پارامترهای کنترلی به صورت سعی و خطا تنظیم شده اند، شکل ۱۰ خروجی سیستم را نشان می دهد. در این حالت برای γ مقدار اولیه -0.05 و ارتفاع Z را حول 1.5 در نظر گرفته ایم

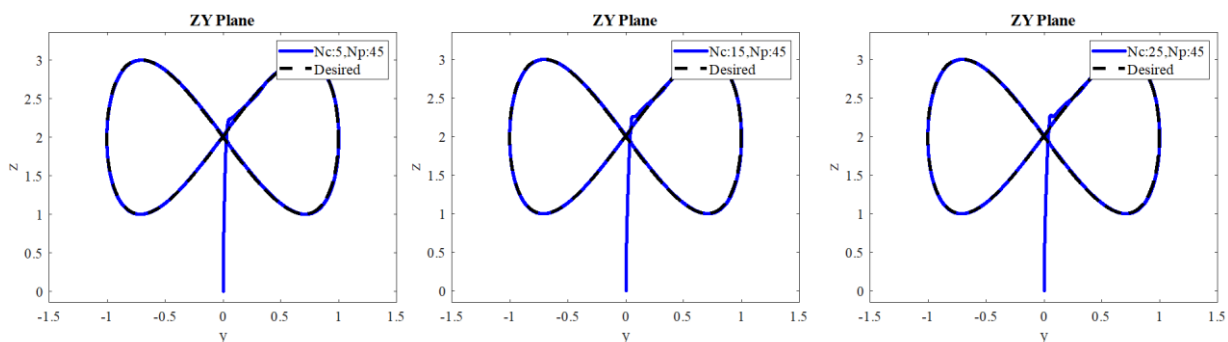
$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \Delta U \leq \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} \quad (۴۶)$$

بهینه کند، در روابط فوق داریم داریم:

$$\begin{aligned} M_1 &= \begin{bmatrix} -C_2 \\ C_2 \end{bmatrix}; N_1 \\ &= \begin{bmatrix} -U_{min} + C_1 u(k-1) \\ U_{max} - C_1 u(k-1) \end{bmatrix}; M_2 \\ &= \begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix}; N_2 = \begin{bmatrix} -\Delta U_{min} \\ \Delta U_{max} \end{bmatrix}; M_3 \\ &= \begin{bmatrix} -\phi \\ \phi \end{bmatrix}; N_3 = \begin{bmatrix} -Y_{min} + Fx(k) \\ Y_{max} - Fx(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (۴۷)$$

ماتریس $\phi^T \phi + \bar{R}$ یک ماتریس هسین^۱ است که فرض می شود مثبت معین باشد، بنابراین با توجه به اینکه L یک تابع کوادراتیک (مربعی) است حل مسئله کنترل بهینه فوق حل یک مسئله استاندارد کوادراتیک خواهد بود که به روش های مختلفی قابل حل است، نکته مهم در حل مسئله ۴۵ (حل) شدنی بودن مسئله بهینه سازی است، تابع هزینه در نظر گرفته شده به صورت مربعی می باشد که یک تابع محدب می باشد. همچنین کنترلر طراحی شده بر اساس مدل خطی است که این دو عامل تضمینی برای محدب بودن مساله خواهند بود. همچنین از آنجایی که تابع هزینه مربعی با قیود خطی است، مساله بهینه سازی محدب و همواره یک جواب خواهد داشت [14]. برای حل مسئله QP روش های مختلفی وجود دارد که پرداختن به آنها موضوع اصلی این مقاله نیست، در ادامه ما از نرم افزار متلب و الگوریتم KWIK برای حل مسئله بهینه سازی کنترل پیش بین مبتنی بر مدل طراحی شده استفاده خواهیم کرد، مسائل مربوط به حل مسئله بهینه سازی و اثبات ریاضی همگرایی الگوریتم به صورت مفصل توسط اشמיד و بیگلر مورد بررسی قرار گرفته اند [15].

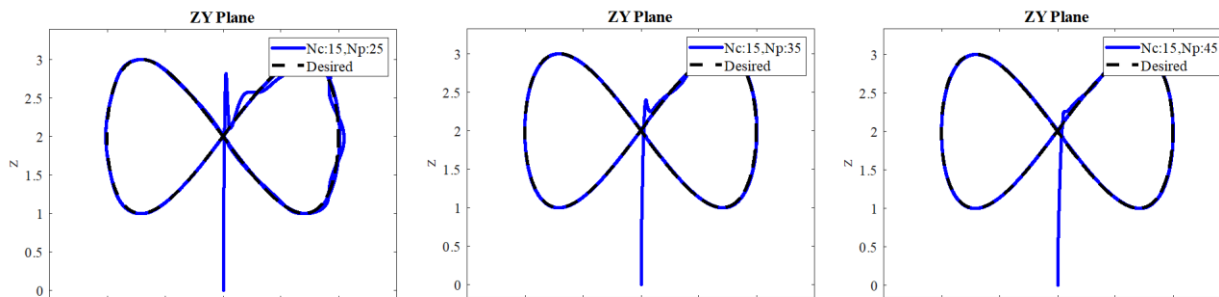
اهمیت در نظر گرفتن قیود کنترلی در این مسئله از آنجاست که محدوده جابجایی جرم های متحرک محدود است و این مسئله حداکثر گشتاور در دسترس در کانال های غلت و فراز را محدود می کند، علاوه بر



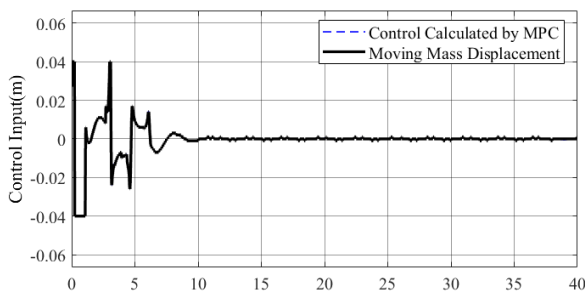
شکل ۸ مقایسه اثر افق کنترلی بر رفتار سیستم

² Feasibility

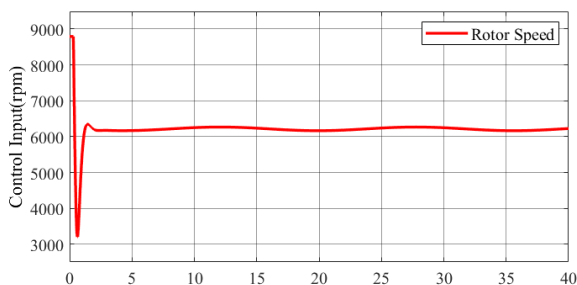
¹ Hessian



شکل ۱۱ اثر تغییرات افق پیش بین بر رفتار سیستم

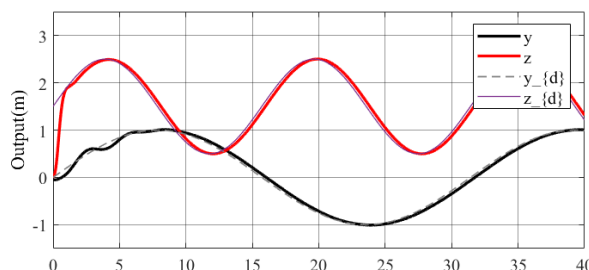


شکل ۱۲ جابجایی جرم های متحرک در تعقیب مسیر هشتی



شکل ۱۳ دور موتور پره های اصلی در تعقیب مسیر هشتی

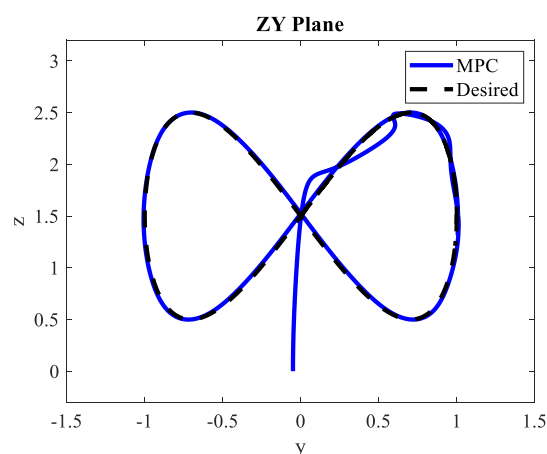
و به منظور ایجاد شرایطی برای استفاده از حداکثر جابجایی جرم، فرانکس مانورها را دو برابر کرده ایم. همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است پرنده به خوبی در مسیر طراحی شده قرار گرفته است، همچنین طبق شکل ۱۰ در بررسی عملکرد کنترلر در دامنه زمان نیز تاخیر قابل ملاحظه ای مشاهده نمی شود. در این حالت کنترل اعمال شده بر پرنده به صورتی که در اشکال ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده، بوده است. همانطور که مشخص است کنترلر طراحی شده در تعقیب مسیر هشتی ضمن رعایت قیود کنترلی در موتور مرکزی و جرم های متحرک عملکرد مناسبی نیز از خود نشان داده است.



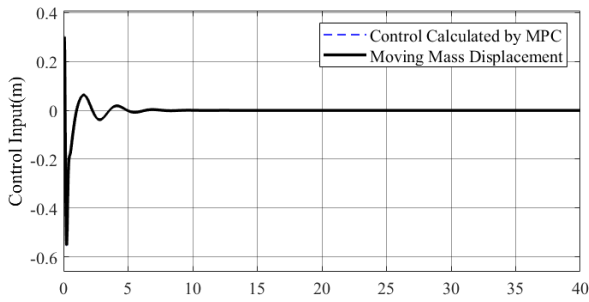
شکل ۹ عملکرد کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل در دامنه زمان

۳-۴ بررسی اثر در نظر گرفتن قیود در طراحی کنترلر

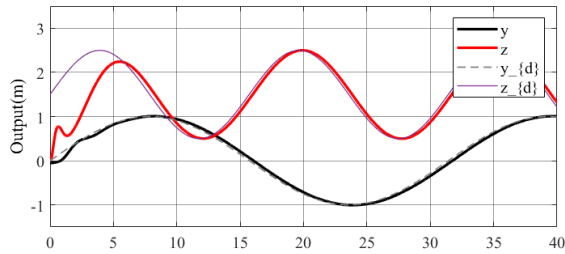
به منظور بررسی اثر در نظر گرفتن قیود در طراحی کنترلر، نتایج شبیه سازی کنترلر پیش بین نامقید مبتنی بر مدل در این بخش مورد بررسی قرار می گیرند، در صورت عدم وجود قیود در سیستم و کنترلر خروجی سیستم مطابق شکل ۱۴ خواهد بود. هرچند عملکرد سیستم در این حالت مشابه قبل بوده است اما در این حالت جابجایی های وزنه ها به صورت شکل ۱۷ خواهد بود که از مقدار 0.04 متر مشخص شده در قیود سیستم به مراتب بیشتر است (حدود ۸ برابر)، در این حالت همچنین قید 9000rpm موتوره های مرکزی نیز به میزان 4000rpm نقض می شود و حداکثر سرعت موتوره های مرکزی به 13000rpm می رسد. این مقادیر البته با توجه به ماموریت فعلی به دست آمده اند و برای ماموریت های دیگر متفاوت خواهند بود. در صورت پیاده سازی کنترلر نامقید مبتنی بر مدل فوق بر روی سیستم غیرخطی مقید، خروجی سیستم به صورت شکل ۱۴ خواهد بود. در این حالت عملکرد سیستم تا اندازه ای دچار اختلال می شود، خروجی های سیستم در دامنه زمان نیز این موضوع را به خوبی نشان می دهند. جابجایی جرم های متحرک و ورودی کنترلی محاسبه شده توسط کنترلر پیش بین در این حالت مقادیر اشباع شده حالت نامقید



شکل ۱۰ عملکرد کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل خطی در تعقیب یک مسیر هشتی سریع



شکل ۱۷ جابجایی وزنه ها در کنترلر پیش بین نامقید

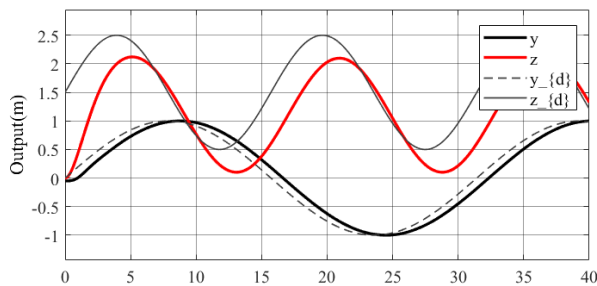


شکل ۱۸ خروجی کنترلر پیش بین نامقید بر روی سیستم مقید در دامنه

زمان

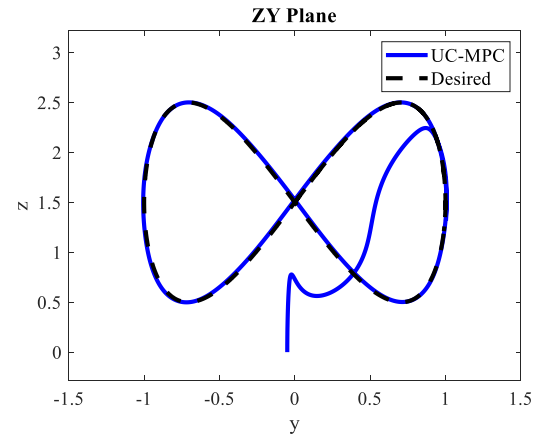
۴-۴ مقایسه با کنترلر LQR

در مقایسه با کنترلر LQR در تعقیب مسیر مشابه نیز کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل عملکرد بهتری از خود نشان داده است. کنترلر LQR به نحوی طراحی شده است که در همان ماموریت کنترلر پیش بین، قيود کنترلی را رعایت کند. همانطور که از شکل ۲۰ مشخص است کنترلر LQR در تعقیب مسیر مشابه دارای خطای قابل توجهی است. همچنین با بررسی خروجی در دامنه زمان طبق شکل ۱۹، کنترلر LQR در مقایسه با کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل خطای ماندگار بیشتری نیز دارد. سیگنال خطا در کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل در شکل ۲۲ رسم شده است. در مقایسه با سیگنال خطای کنترلر LQR که در شکل ۲۱ آمده است عملکرد بسیار مناسب تری از خود نشان می دهد، عملکرد کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل در این نوع پرنده در مقایسه با کنترلر LQR مشابه (از نظر رعایت قيود کنترلی) بسیار قابل قبول تر است، این عملکرد بهتر، هم در حداکثر خطا و هم در خطای ماندگار به وضوح قابل رویت است.

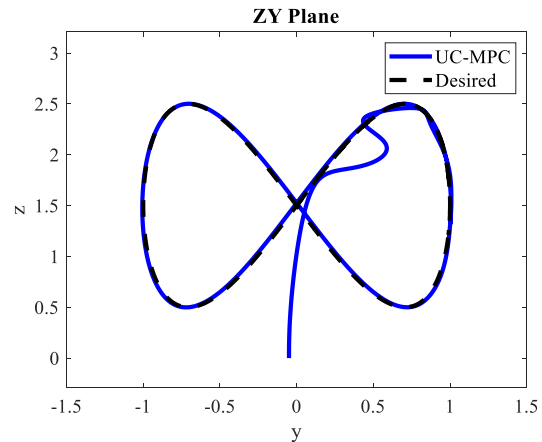


شکل ۱۹ عملکرد کنترلر LQR در دامنه زمان

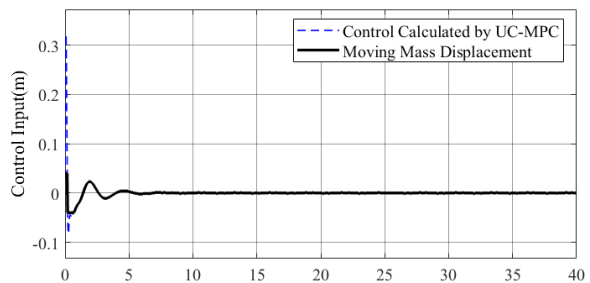
خواهند بود که در شکل ۱۶ نشان داده شده است. دو شبیه سازی فوق اهمیت در نظر گرفتن قيود کنترلی در طراحی کنترلر پیش بین را از دو جهت مشخص می کنند، ابتدا به منظور رعایت قيود کنترلی و حفظ ایمنی و طول عمر عملگرها و دوم از نظر بهبود عملکرد کنترلر و پرنده.



شکل ۱۴ عملکرد کنترلر پیش بین نامقید بر روی سیستم مقید



شکل ۱۵ عملکرد کنترلر پیش بین نامقید

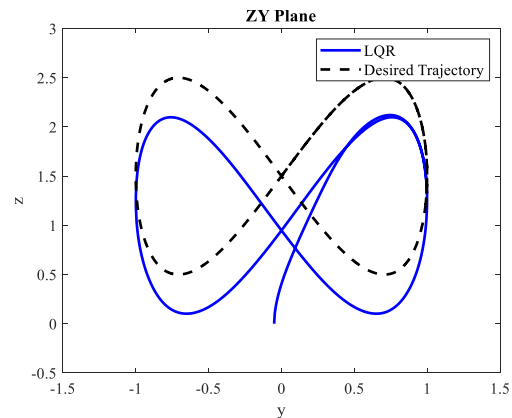


شکل ۱۶ جابجایی جرم های متحرک در پیاده سازی کنترلر پیش بین نامقید بر روی سیستم مقید

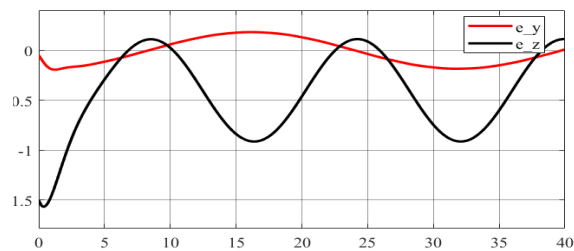
عملکرد بهتری از خود نشان داده است، تنها ضعف قابل توجه این کنترلر، مبتنی بر مدل بودن است که از قوام کنترلر در برابر نامعینی ها و اغتشاشات می‌کاهد.

مراجع

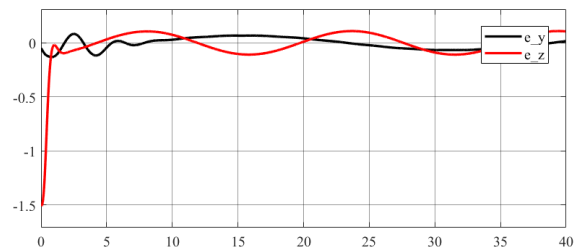
- [1] S. Darvishpoor, J. Roshanian, A. Raissi, and M. Hassanalian, "Configurations, flight mechanisms, and applications of unmanned aerial systems: A review," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 121, p. 100694, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.paerosci.2020.100694.
- [2] S. Darvishpoor and J. Roshanian, "A Survey on Unmanned Aerial Vehicles : Scheme Approach," in *The 18th International Conference of Iranian Aerospace Society*, 2020.
- [3] M. Hassanalian and A. Abdelkefi, "Classifications, applications, and design challenges of drones: A review," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 91, pp. 99–131, May 2017, doi: 10.1016/j.paerosci.2017.04.003.
- [4] S. Darvishpoor, J. Roshanian, and M. Tayefi, "A novel concept of VTOL bi-rotor UAV based on moving mass control," *Aerosp. Sci. Technol.*, p. 106238, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ast.2020.106238.
- [5] J. Li, C. Gao, C. Li, and W. Jing, "A survey on moving mass control technology," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 82–83, no. September, pp. 594–606, 2018, doi: 10.1016/j.ast.2018.09.033.
- [6] H. Mohammadi Daniali, "Fast Nonlinear Model Predictive Control of Quadrotors: Design and Experiments," 2020, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10012/15519>.
- [7] E. D'Amato, M. Mattei, and I. Notaro, "Distributed Reactive Model Predictive Control for Collision Avoidance of Unmanned Aerial Vehicles in Civil Airspace," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 97, no. 1, pp. 185–203, Jan. 2020, doi: 10.1007/s10846-019-01047-5.
- [8] A. Dixit, A. Misra, and S. E. Talole, "Model Predictive Control based Collision Avoidance Controller for Octocopter," in *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Feb. 2020, pp. 630–635, doi: 10.1109/SPIN48934.2020.9071236.
- [9] Y. Wang, H. Cai, J. Zhang, and X. Li, "Disturbance Attenuation Predictive Optimal Control for Quad-Rotor Transporting Unknown Varying Payload," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 44671–44686, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977681.
- [10] D. Bhattacharjee and K. Subbarao, "Robust Control Strategy for Quadcopters using Sliding Mode Control and Model Predictive Control," in *AIAA Scitech 2020 Forum*, Jan. 2020, doi: 10.2514/6.2020-2071.
- [11] N. Miladi, H. Dimassi, S. Hadj Said, and F. M'Sahli, "Explicit nonlinear model predictive control tracking control based on a sliding mode



شکل ۲۰ عملکرد کنترلر LQR در تعقیب مسیر هشتی



شکل ۲۱ سیگنال خطای کنترلر LQR



شکل ۲۲ سیگنال خطا در کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به معرفی یک پرنده بدون سرنشین نوین کنترل شونده از طریق جابجایی مرکز جرم پرداخته شده است، که به کمک جرم های متحرکی مرکز جرم و در نتیجه پرنده را کنترل می‌کند، طرح چنین پرنده ای برای نخستین بار توسط نگارندگان این مقاله ارائه شده است، با توجه به محدودیت جابجایی جرم ها، ورودی های کنترلی کانال های غلت و فراز در این نوع پرنده بسیار مقید هستند، به همین منظور لازم است برای کنترل آنها از تئوری های کنترل مقید استفاده شود، در این مقاله برای اولین بار از کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل خطی برای کنترل چنین پرنده ای استفاده شده است که ضمن بهینه بودن، قیود کنترلی را نیز رعایت می‌کند، طراحی کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل خطی و پیاده سازی آن بر روی مدل غیرخطی حرکت در صفحه پرنده، عملکرد قابل قبول این کنترلر را نشان می‌دهد، بررسی نتایج پیاده سازی کنترلر نامقید بر روی سیستم مقید عملکرد ضعیف سیستم و خطر شکست عملگرها را نشان می‌دهد که لزوم در نظر گرفتن قیود کنترلی در طراحی کنترلر برای چنین پرنده ای را می‌رساند. کنترلر پیش بین مبتنی بر مدل در مقایسه با کنترلر LQR نیز

observer for a quadrotor subject to disturbances,”
Trans. Inst. Meas. Control, vol. 42, no. 2, pp. 214–
227, Jan. 2020, doi: 10.1177/0142331219865816.

- [12] S. Darvishpoor, J. Roshanian, and T. Yasini, “Model Predictive Control Based on Intelligent model for Low Earth Orbit Satellite,” J. Technol. Aerosp. Eng., vol. 5, no. 1, 2021.
- [13] T. Haus, M. Orsag, and S. Bogdan, “Design considerations for a large quadrotor with moving mass control,” 2016 Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst. ICUAS 2016, pp. 1327–1334, 2016, doi: 10.1109/ICUAS.2016.7502680.
- [14] D. Bertsekas, A. Nedic, and A. E. Ozdaglar, “Convex Analysis and Optimization.”
- [15] C. Schmid and L. T. Biegler, “Quadratic programming methods for reduced hessian SQP,” Comput. Chem. Eng., vol. 18, no. 9, pp. 817–832, Sep. 1994, doi: 10.1016/0098-1354(94)E0001-4.