

مدل سازی و کنترل مود لغزشی انتگرالی یک جستجوگر پیچ-یاو

مهسا قاسمی^۱، هادی نوبهاری^۲، حامد محمدکریمی^{۳*}

۱- دانشجو دکتری، مهندسی هوافضا، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، mahsa.ghasemi@aut.ac.ir

۲- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، nobahari@sharif.edu

۳- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، h.mohammadkarimi@aut.ac.ir

*نویسنده مخاطب

چکیده

در این پژوهش، مدل سازی و کنترل مود لغزشی یک جستجوگر پیچ-یاو بررسی شده است. ابتدا، مدل دینامیکی قاب های پیچ و یاو جستجوگر به روش نیوتون-اوایلر استخراج شده است. دینامیک جستجوگر پیچ-یاو رفتار غیرخطی و تداخل شدیدی دارد. به علاوه، با توجه به نامعینی ها و اغتشاشات مدل نشده، مدل دارای عدم قطعیت خواهد بود. به منظور کنترل دینامیک غیرخطی جستجوگر با وجود عدم قطعیت های مدل، یک کنترل کننده مود لغزشی انتگرالی دو ورودی-دو خروجی طراحی شده است. نتایج شبیه سازی عددی نشان دهنده عملکرد مناسب کنترل کننده در حلقه پایدارسازی، در هر دو کانال پیچ و یاو است. در ادامه، عملکرد کنترل کننده مود لغزشی انتگرالی با کنترل کننده PID مقایسه می شود. همچنین، عملکرد کنترل کننده طراحی شده در حضور عدم قطعیت در پارامتر لختی دورانی قاب ها بررسی و نشان داده شده است که این کنترل کننده نسبت به آن مقاوم است.

واژه های کلیدی: جستجوگر پیچ-یاو، مدل سازی دینامیکی، کنترل مود لغزشی انتگرالی، عدم قطعیت، پایدارسازی

۱- مقدمه

وسایل پرنده هواپه هوا اصولاً به مانور زیادی نیاز دارند. با توجه به نوع ماموریت پرنده، در بعضی از آن ها از جستجوگر اپتیکی برای تشخیص و ردگیری هدف و حرکت به سمت آن استفاده می شود. بعد از شناسایی هدف، جستجوگر رو به هدف قرار می گیرد. سپس، فرامین کنترلی سرووها بر اساس خطای ردگیری محاسبه و اعمال شده و نرخ چرخش خطدید هدف به رایانه هدایت رهگیر فرستاده می شود. جستجوگرهای طوقه دار از نظر ساختاری به دو دسته سه محوره و دومحوره تقسیم می شوند. نوع سه محوره در وسایلی استفاده می شود که نیاز به میدان نظر وسیع دارد. این جستجوگر به فضای نصب بزرگی نیاز دارد و در وسایل پرنده با قطر زیاد استفاده می شود اما، جستجوگر دومحوره به فضای کمتری نیاز داشته و در وسایل پرنده با قطر کمتر استفاده می شود. جستجوگر دو محوره به دلیل محدودیت در چرخش، میدان نظر کمتری نسبت به نوع سه محوره دارد [۱]. جستجوگرهای دومحوره به دو دسته ی رول-پیچ و پیچ-یاو تقسیم می شوند. نوع متداولی که در اغلب وسایل پرنده استفاده می شود، جستجوگر پیچ-یاو است [۱]. این نوع جستجوگر از طریق دو کانال کنترلی مستقل (کانال های پیچ و یاو) کنترل می شود که کوپلینگ کم و کنترل پذیری آسان تری دارد. در این نوع جستجوگر، طوقه بیرونی حرکت یاو و طوقه درونی حرکت پیچ انجام می دهد. دینامیک این دو کانال حرکتی با هم تداخل دارند و در معادلات دیفرانسیل

آن ها جملات غیرخطی وجود دارد. به علاوه، نامعینی هایی ناشی از اتصال کابل به هر یک از طوقه ها و همین طور، خطای مدل سازی گشتاورهای اصطکاکی و عوامل اغتشاشی نظیر مانور هدف وجود دارد. در این مقاله، کنترل جستجوگر پیچ-یاو، با در نظر گرفتن سرعت های زاویه ای و شتاب های زاویه ای رهگیر، به نحوی انجام می شود که در مقابل اغتشاشات و عدم قطعیت ها مقاوم باشد. با توجه به رفتار غیرخطی و کوپل سیستم و همچنین وجود نامعینی ها، از روش کنترل مود لغزشی انتگرالی چندورودی-چندخروجی برای کنترل دو کانال پیچ و یاو، در حلقه پایدارسازی، استفاده می شود.

در ادامه، به بررسی چند نمونه پژوهش در رابطه با جستجوگر پیچ-یاو پرداخته شده است:

در مرجع [۲] مدل سازی ریاضی جستجوگر پیچ-یاو به روش نیوتون-اوایلر و لاگرانژ انجام شده است. به این منظور، ابتدا معادلات حرکتی بدون در نظر گرفتن نامیزانی جرمی در ماتریس های ممان اینرسی هر دو طوقه پیچ و یاو استخراج شده است. در مرجع [۳] به پایدارسازی خطدید در حضور نامیزانی جرمی و همچنین در نظر گرفتن سرعت های زاویه ای وسیله پرنده پرداخته است. معادلات دینامیکی با در نظر گرفتن نامیزانی جرمی در ماتریس ممان اینرسی به روش لاگرانژ استخراج شده است. به منظور پایدارسازی خطدید از یک کنترل کننده آشناری استفاده شده است. مرجع [۴] نیز به پایدارسازی نرخ چرخش خطدید هدف و وسیله پرنده پرداخته است. ابتدا مدل سازی ریاضی سیستم با در نظر گرفتن نامیزانی جرمی به روش لاگرانژ استخراج شده است. در حلقه های کنترلی پیچ و یاو در حلقه پایدارسازی از روش کنترلی PID فازی خود تنظیم استفاده شده است. در انتها، این روش کنترلی با کنترل کننده PID مقایسه شده که برتری PID فازی را نشان می دهد.

در مرجع [۵] به منظور پایدارسازی خطدید برای جستجوگر دو محوره پیچ-یاو، ابتدا مدل سازی دینامیکی به روش نیوتون-اوایلر انجام شده است. سپس، هر دو کانال کنترلی پیچ و یاو با رویکرد کنترلی مود لغزشی کنترل شده اند. دینامیک غیرخطی و عدم قطعیت هایی در غالب اغتشاش شبیه سازی در نظر گرفته شده است. در مرجع [۶] به منظور به صفر رساندن خطای فراز و سمت هدف در حلقه پایدارسازی، از کنترل کننده مود لغزشی مرتبه کسری در حضور اغتشاشات گشتاور استفاده شده است. شبیه سازی عددی نشان می دهد این رویکرد کنترلی در برابر تغییرات گشتاور مقاوم است. در مرجع [۷] برای پایدارسازی نرخ چرخش خطدید از کنترل کننده های مختلفی استفاده شده است و مقایسه ای بین

قاب بدنی متصل به بدنه پرنده است که همراه با پرنده حرکت می کند. مرکز این قاب بر مرکز جرم پرنده منطبق است. محور اول قاب بدنی (یعنی X_B) رو به جلو و به سمت دماغه پرنده، محور دوم (یعنی Y_B) به سمت راست و محور سوم (یعنی Z_B)، طبق قانون دست راست، به سمت پایین است. قاب های بدنی و اینرسی، با استفاده از ماتریس تبدیل $[T]^{BI}$ با یکدیگر مرتبط می شوند. $[T]^{BI}$ ماتریس تبدیل از قاب اینرسی به قاب بدنی است.

(۱)

$$[T]^{BI} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi - \cos\phi\cos\psi & \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}$$

در رابطه فوق ϕ ، θ و ψ به ترتیب بیانگر زوایای رول، پیچ و یاو قاب بدنی نسبت به قاب اینرسی است. در شکل ۲، علاوه بر قاب بدنی، قاب های درونی و بیرونی نیز نشان داده شده است. مرکز مختصات هر سه قاب روی مرکز جرم پرنده و ثابت است. در این شکل X_B ، Y_B و Z_B بردارهای یک (محورهای اصلی) قاب بدنی را نشان می دهد.

قاب بیرونی جستجوگر (نسبت به بدنه پرنده) قادر به حرکت یکدرجه آزادی یاو است. با چرخش به اندازه زاویه ψ_s حول محور Z_B ، قاب بدنی بر قاب بیرونی منطبق می شود. X_Y ، Y_Y و Z_Y بیانگر بردارهای یک قاب بیرونی (قاب یاو) هستند. ماتریس تبدیل از قاب بدنی به قاب بیرونی به صورت زیر است:

$$[T]^{YB} = \begin{bmatrix} \cos\psi_s & \sin\psi_s & 0 \\ -\sin\psi_s & \cos\psi_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۲)$$

با چرخش قاب بیرونی به اندازه زاویه θ_s حول محور Y_Y ، قاب درونی (قاب پیچ) با بردارهای یک X_P ، Y_P و Z_P به دست می آید. به قاب درونی قاب خط دید نیز گفته می شود. ماتریس تبدیل از قاب بیرونی به قاب درونی از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$[T]^{PY} = \begin{bmatrix} \cos\theta_s & 0 & -\sin\theta_s \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_s & 0 & \cos\theta_s \end{bmatrix} \quad (۳)$$

بنابراین، برای انتقال از دستگاه مختصات بدنی به دستگاه خط دید از ماتریس تبدیل زیر استفاده می شود.

$$[T]^{PB} = [T]^{PY}[T]^{YB} = \begin{bmatrix} \cos\theta_s & 0 & -\sin\theta_s \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_s & 0 & \cos\theta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi_s & \sin\psi_s & 0 \\ -\sin\psi_s & \cos\psi_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_s\cos\psi_s & \sin\psi_s\cos\theta_s & -\sin\theta_s \\ -\sin\psi_s & \cos\psi_s & 0 \\ \cos\psi_s\sin\theta_s & \sin\psi_s\sin\theta_s & \cos\theta_s \end{bmatrix}$$

۲-۱- معادلات دینامیکی جستجوگر

در این بخش، معادلات دینامیکی جستجوگر استخراج می شود. از آن جا که قاب خارجی جستجوگر حرکت یاو و قاب داخلی حرکت پیچ انجام می دهد، ابتدا سرعت زاویه ای هر یک از قاب ها به دست آمده است. بردار سرعت زاویه ای قاب بدنی نسبت به قاب اینرسی، بیان شده در دستگاه بدنی عبارت است از:

$$[\omega]^{BI} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (۵)$$

که مولفه های p ، q و r به ترتیب بیانگر نرخ های رول، پیچ و یاو رهگیر است. سرعت زاویه ای قاب بیرونی نسبت به قاب اینرسی، بیان شده در قاب بیرونی

کنترل کننده های خطی و یک کنترل کننده هوشمند (پیش فاز-پس فاز، PID، PI و کنترل کننده فازی) انجام شده است.

با توجه به پژوهش های پیشین، در هیچ یک از مقالات از رویکرد کنترلی مودلگزشی انتگرالی استفاده نشده است. نحوه مدل سازی ریاضی نیز به صورت دقیق و با نحوه نوشتاری مرجع [۹] است که در مقالات دیگر استفاده نشده است.

در این مقاله، کنترل جستجوگر پیچ-یاو برای یک وسیله پرنده هوا به هوا، به نحوی انجام می شود که در مقابل اغتشاشات و عدم قطعیت ها مقاوم باشد. با توجه به این که این جستجوگر دینامیک غیرخطی و کوپل داشته و مدل آن با نامعینی هایی همراه است، از روش کنترل مودلگزشی انتگرالی چندرودی- چندخروجی استفاده می شود. در نهایت، عملکرد کنترل مودلگزشی با کنترل PID مقایسه می شود و در حضور نامعینی بررسی می شود. در بخش ۲ پس از تعریف دستگاه های مختصات موجود در مسئله حاضر، معادلات سینماتیکی و دینامیکی جستجوگر استخراج خواهد شد.

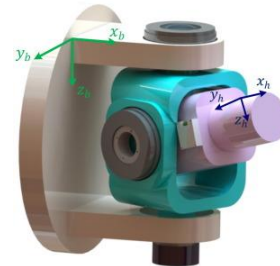
در بخش ۳ روش کنترل مودلگزشی انتگرالی معرفی می شود و در ادامه، برای دو کانال رول و پیچ حلقه پایدارسازی طراحی خواهد شد.

در بخش ۴ عملکرد کنترل کننده بررسی می شود و با کنترل کننده PID در حلقه پایدارسازی مقایسه می شود. در انتها، شبیه سازی در حضور و عدم حضور نامعینی بررسی می شود.

در بخش ۵ جمع بندی و نتیجه گیری ارائه شده است.

۲-۲- مدل سازی ریاضی جستجوگر پیچ-یاو

جستجوگر پیچ-یاو شامل دو طوقه پیچ و یاو است که روی بدنه وسیله پرنده نصب می شود. طوقه بیرونی نسبت به بدنه حرکت یاو و طوقه درونی نسبت به طوقه بیرونی حرکت پیچ انجام می دهد. آشکارساز و جابروهای نرخی روی طوقه درونی قرار دارند. به منظور آشکارسازی و ردگیری هدف، ابتدا طوقه خارجی حرکت یاو انجام می دهد و سپس، طوقه داخلی با حرکت پیچ به سمت هدف متمایل می شود. از این رو، طوقه خارجی باید دینامیک سریع تری نسبت به طوقه داخلی داشته باشد. هدف جستجوگر ثابت نگهداشتن نرخ چرخش خط دید در فضای اینرسی است و این مسئله مستلزم قرارگیری سر جستجوگر رو به هدف است. در شکل ۱ شماتیک جستجوگر پیچ-یاو دیده می شود.



شکل ۱- ساختار جستجوگر پیچ-یاو [۱۱]

۱-۱- تعریف قاب ها و دستگاه های مختصات

به منظور استخراج معادلات دینامیکی جستجوگر، از قاب های اینرسی، بدنی، قاب خارجی و قاب داخلی استفاده می شود. در این جا، می توان قاب زمین تخت را به عنوان قاب اینرسی در نظر گرفت. مرکز قاب زمین تخت روی یک نقطه دلخواه بر سطح زمین قرار دارد که محور اول آن به سمت شمال، محور دوم آن به سمت غرب و محور سوم آن رو به پایین تعریف می شود.

$$\mathbf{m}_B = \mathbf{D}^I \mathbf{I}_I^{BI} \quad (15)$$

که در آن \mathbf{m}_B بردار گشتاور خارجی است. در شرایط ایده آل، ماتریس ممان اینرسی جستجوگر قطری است و نامیزانی جرمی وجود ندارد. گشتاورهای لازم برای دوران قاب‌ها نیز با m_p و m_Y بیان می‌شود که به ترتیب معرف گشتاورهای لازم برای چرخش قاب درونی و قاب بیرونی است. ماتریس معرف ممان اینرسی قاب درونی و ماتریس معرف ممان اینرسی قاب بیرونی است که با فرض ساده‌سازی به صورت قطری در نظر گرفته می‌شود.

$$[\mathbf{J}_Y^Y]^Y = \begin{bmatrix} J_{Yx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{Yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{Yz} \end{bmatrix}, [\mathbf{J}_P^P]^P = \begin{bmatrix} J_{Px} & 0 & 0 \\ 0 & J_{Py} & 0 \\ 0 & 0 & J_{Pz} \end{bmatrix} \quad (16)$$

در ادامه، معادلات دینامیکی قاب درونی و قاب بیرونی به دست می‌آید.

۱-۳- معادلات دینامیکی قاب درونی

برای دینامیک چرخشی حاکم بر قاب درونی از قانون نیوتون اولی می‌توان نوشت [۹]:

$$[\Sigma \mathbf{m}_{total}]^P = [m_{Px} \quad m_{Py} \quad m_{Pz}]^T = [\mathbf{J}_P^P]^P \left[\frac{d\boldsymbol{\omega}^{PI}}{dt} \right]^P + [\boldsymbol{\Omega}^{PI}]^P [\mathbf{J}_P^P]^P [\boldsymbol{\omega}^{PI}]^P \quad (17)$$

که در آن داریم:

$$\mathbf{I}_I^{PI} = \begin{bmatrix} l_{Px} \\ l_{Py} \\ l_{Pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{Px} & 0 & 0 \\ 0 & J_{Py} & 0 \\ 0 & 0 & J_{Pz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_p \\ q_p \\ r_p \end{bmatrix} \quad (18)$$

در نتیجه می‌توان نوشت:

$$[\Sigma \mathbf{m}_{total}]^P = \begin{bmatrix} J_{Px} \dot{p}_p \\ J_{Py} \dot{q}_p \\ J_{Pz} \dot{r}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -r_p & q_p \\ r_p & 0 & -p_p \\ -q_p & p_p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{Px} p_p \\ J_{Py} q_p \\ J_{Pz} r_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{Px} \dot{p}_p - J_{Py} q_p r_p + J_{Pz} r_p q_p \\ J_{Py} \dot{q}_p + J_{Px} p_p r_p - J_{Pz} r_p p_p \\ J_{Pz} \dot{r}_p - J_{Px} p_p q_p + J_{Py} q_p p_p \end{bmatrix} \quad (19)$$

از آنجا که قاب درونی فقط حرکت چرخشی حول محور Z دارد، از سومین مولفه رابطه فوق به عنوان معادله حاکم بر چرخش قاب درونی استفاده می‌شود.

$$\dot{q}_p = \frac{m_{Py} + p_p r_p (J_{Pz} - J_{Px})}{J_{Py}} \quad (20)$$

با تعریف $T_{d_{pitch}} = p_p r_p (J_{Pz} - J_{Px})$ معادله (۲۰) به فرم زیر بازنویسی می‌شود:

$$\dot{q}_p = \frac{m_{Py} + T_{d_{pitch}}}{J_{Py}} \quad (21)$$

۱-۴- معادلات دینامیکی قاب بیرونی

برای دینامیک چرخشی حاکم بر قاب بیرونی از قانون نیوتون اولی می‌توان نوشت [۹]:

$$[\Sigma \mathbf{m}_{total}]^Y = [m_{Yx} \quad m_{Yy} \quad m_{Yz}]^T = [\mathbf{J}_Y^Y]^Y \left[\frac{d\boldsymbol{\omega}^{YI}}{dt} \right]^Y + [\boldsymbol{\Omega}^{YI}]^Y [\mathbf{J}_Y^Y]^Y [\boldsymbol{\omega}^{YI}]^Y \quad (22)$$

ممنتوم زاویه‌ای قاب بیرونی از دو قسمت تشکیل شده است. یک قسمت مربوط به ممنتوم زاویه‌ای قاب بیرونی و قسمت دیگر ناشی از ممنتوم زاویه‌ای قاب درونی است. ممنتوم زاویه‌ای قاب بیرونی با استفاده از ماتریس تبدیل $[T]^{YP}$ در قاب درونی بیان می‌شود.

$$\mathbf{I}_I^{YI} = \begin{bmatrix} l_{Yx} \\ l_{Yy} \\ l_{Yz} \end{bmatrix} = [\mathbf{J}_Y^Y]^Y [\boldsymbol{\omega}^{YI}]^Y + [\mathbf{T}]^{YP} [\mathbf{J}_P^P]^P [\boldsymbol{\omega}^{PI}]^P \quad (23)$$

در نهایت ممنتوم زاویه‌ای کل از رابطه زیر به دست می‌آید:

و سرعت زاویه‌ای قاب درونی نسبت به قاب اینرسی، بیان شده در قاب درونی نیز به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$[\boldsymbol{\omega}^{YI}]^Y = \begin{bmatrix} p_Y \\ q_Y \\ r_Y \end{bmatrix}, [\boldsymbol{\omega}^{PI}]^P = \begin{bmatrix} p_p \\ q_p \\ r_p \end{bmatrix} \quad (6)$$

برای به دست آوردن سرعت‌های زاویه‌ای قاب‌های درونی و بیرونی نسبت به قاب اینرسی می‌توان نوشت:

$$[\boldsymbol{\omega}^{PB}]^P = [\boldsymbol{\omega}^{PY}]^P + [\boldsymbol{\omega}^{YB}]^P = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_s \\ 0 \end{bmatrix} + [T]^{PY} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi}_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

که در آن $[T]^{PY}$ ماتریس تبدیل از قاب بیرونی به قاب درونی، $\dot{\theta}_s$ نرخ چرخش قاب درونی نسبت به قاب بیرونی و $\dot{\psi}_s$ نرخ چرخش قاب بیرونی نسبت به قاب بدنی است. با داشتن $[\boldsymbol{\omega}^{PI}]^P$ و $[\boldsymbol{\omega}^{PB}]^P$ ، نرخ چرخش کلی قاب درونی نسبت به قاب اینرسی، بیان شده در قاب درونی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$[\boldsymbol{\omega}^{PI}]^P = [\boldsymbol{\omega}^{PB}]^P + [\boldsymbol{\omega}^{BI}]^P = \begin{bmatrix} p \cos \theta_s \cos \psi_s + q \sin \psi_s \cos \theta_s + r \sin \theta_s - \dot{\psi}_s \sin \theta_s \\ -p \sin \psi_s + q \cos \psi_s + \dot{\theta}_s \\ p \cos \psi_s \sin \theta_s + q \sin \psi_s \sin \theta_s + r \cos \theta_s + \dot{\psi}_s \cos \theta_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_p \\ q_p \\ r_p \end{bmatrix} \quad (8)$$

$[\boldsymbol{\omega}^{YB}]^Y$ بیان کننده بردار سرعت زاویه‌ای قاب بیرونی نسبت به قاب بدنی، بیان شده در قاب بیرونی است. همچنین، بردار سرعت زاویه‌ای قاب بدنی نسبت به قاب اینرسی، با ماتریس تبدیل $[\mathbf{T}]^{YB}$ به قاب بیرونی منتقل می‌شوند. چرخش کلی قاب بیرونی نسبت به قاب بدنی بیان شده در قاب بیرونی، از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$[\boldsymbol{\omega}^{YB}]^Y = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi}_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

بردار $[\boldsymbol{\omega}^{BI}]^Y$ نیز در قاب بیرونی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$[\boldsymbol{\omega}^{BI}]^Y = [\mathbf{T}]^{YB} [\boldsymbol{\omega}^{BI}]^B = \begin{bmatrix} \cos \psi_s & \sin \psi_s & 0 \\ -\sin \psi_s & \cos \psi_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \cos \psi_s + q \sin \psi_s \\ -p \sin \psi_s + q \cos \psi_s \\ r \end{bmatrix} \quad (10)$$

بنابراین، بردار $[\boldsymbol{\omega}^{YI}]^Y$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$[\boldsymbol{\omega}^{YI}]^Y = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \cos \psi_s + q \sin \psi_s \\ -p \sin \psi_s + q \cos \psi_s \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \cos \psi_s + q \sin \psi_s \\ -p \sin \psi_s + q \cos \psi_s \\ r + \dot{\psi}_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

مولفه‌های بردار سرعت زاویه‌ای قاب درونی و بردار سرعت زاویه‌ای قاب بیرونی نسبت به قاب اینرسی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

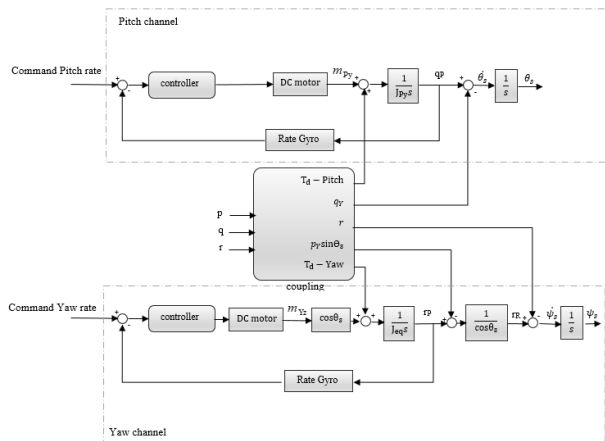
$$\begin{cases} p_Y = p \cos \psi_s + q \sin \psi_s \\ q_Y = -p \sin \psi_s + q \cos \psi_s \\ r_Y = r + \dot{\psi}_s \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} p_p = (p \cos \psi_s + q \sin \psi_s) \cos \theta_s - (r + \dot{\psi}_s) \sin \theta_s \\ q_p = -p \sin \psi_s + q \cos \psi_s + \dot{\theta}_s \\ r_p = (p \cos \psi_s + q \sin \psi_s) \sin \theta_s + (r + \dot{\psi}_s) \cos \theta_s \end{cases} \quad (13)$$

لازم به ذکر است که رابطه (۱۳) به فرم ساده زیر قابل بازنویسی است:

$$\begin{cases} p_p = p_Y \cos \theta_s - r_Y \sin \theta_s \\ q_p = q_Y + \dot{\theta}_s \\ r_p = p_Y \sin \theta_s + r_Y \cos \theta_s \end{cases} \quad (14)$$

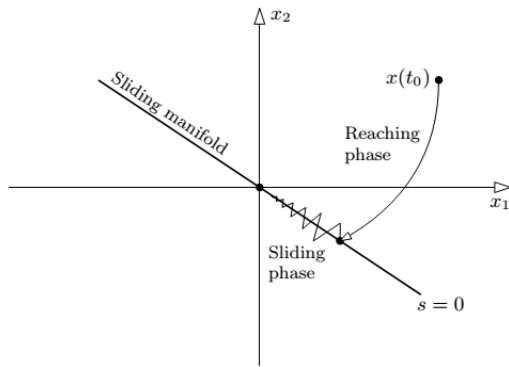
برای به دست آوردن معادلات حرکت قاب‌ها، از قوانین نیوتون-اولی استفاده شده است. طبق تعریف، \mathbf{I}_I^{BI} اندازه حرکت زاویه‌ای جسم صلب B نسبت به قاب مرجع I است و از رابطه $\mathbf{I}_I^{BI} = \mathbf{I}_B^B \boldsymbol{\omega}^{BI}$ محاسبه می‌شود که در آن \mathbf{I}_B^B تانسور ممان اینرسی و $\boldsymbol{\omega}^{BI}$ بردار سرعت زاویه‌ای است. در این حالت می‌توان نوشت [۹]:



شکل ۲- دیاگرام بلوکی کانال های پیچ و یاو

۲- طراحی کنترل کننده مود لغزشی انتگرالی

طراحی کنترل کننده مود لغزشی در دو مرحله انجام می شود. مرحله اول تعریف سطح لغزش است. به طوری که حالت های سیستم به سطوح لغزش همگرا شوند. یا به عبارتی، سطوح لغزش جاذب حالت های سیستم باشد. همچنین، به تعداد ورودی های کنترلی سطح لغزش وجود دارد. مرحله دوم طراحی قانون کنترلی است. به طوری که متغیرهای حالت به سمت سطح لغزش $s(x, t) = 0$ میل کنند. شماتیک قانون کنترلی مود لغزشی در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۰].



شکل ۳- شماتیک قانون کنترل مود لغزشی

جستجوگر پیچ-یاو دو ورودی کنترلی دارد. بنابراین، طراحی کنترل کننده مود لغزشی برای سیستم های چند ورودی انجام می شود. در ادامه، کنترل کننده مود لغزشی انتگرالی برای سیستم دو ورودی جستجوگر پیچ-یاو طراحی می شود.

با توجه به معادلات (۲۱) و (۳۳) که معرف دینامیک سیستم است، T_{dPitch} و T_{dYaw} به عنوان ورودی اغتشاشی در نظر گرفته شده است. معادلات دینامیکی به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = b_{Pitch}(x)u + d_{Pitch}(x) \\ \dot{x}_2 = b_{Yaw}(x)u + d_{Yaw}(x) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} d_{Pitch}(x) = \frac{T_{dPitch}}{J_{Py}} \\ b_{Pitch}(x) = \frac{1}{J_{Py}} \\ d_{Yaw}(x) = \frac{T_{dYaw}}{J_{eq}} \\ b_{Yaw}(x) = \frac{\cos\theta_s}{J_{eq}} \end{cases} \quad (34)$$

$$I_1^Y = \begin{bmatrix} J_{Yx}p_Y \\ J_{Yy}q_Y \\ J_{Yz}r_Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_p J_{p_x} \cos\theta_s + r_p J_{p_z} \sin\theta_s \\ q_p J_{p_y} \\ -p_p J_{p_x} \sin\theta_s + r_p J_{p_z} \cos\theta_s \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$= \begin{bmatrix} p_p J_{p_x} \cos\theta_s + r_p J_{p_z} \sin\theta_s + J_{Yx} p_Y \\ q_p J_{p_y} + J_{Yy} q_Y \\ -p_p J_{p_x} \sin\theta_s + r_p J_{p_z} \cos\theta_s + J_{Yz} r_Y \end{bmatrix}$$

از آن جا که قاب بیرونی فقط حرکت چرخشی حول محور Z دارد، از سومین مولفه رابطه (۲۲) به عنوان معادله حاکم بر چرخش قاب بیرونی استفاده می شود.

$$m_{Yz} = -((\dot{p} \cos\psi_s + \dot{q} \sin\psi_s - p \sin\psi_s \dot{\psi}_s + q \cos\psi_s \dot{\psi}_s) \cos\theta_s - \dot{r}_y \sin\theta_s - p_Y \sin\theta_s \dot{\theta}_s - r_Y \cos\theta_s \dot{\theta}_s) J_{p_x} \sin\theta_s + ((\dot{p} \cos\psi_s + \dot{q} \sin\psi_s - p \sin\psi_s \dot{\psi}_s + q \cos\psi_s \dot{\psi}_s) \sin\theta_s + \dot{r}_y \cos\theta_s + p_Y \cos\theta_s \dot{\theta}_s - r_Y \sin\theta_s \dot{\theta}_s) J_{p_z} \cos\theta_s + J_{Yz} \dot{r}_y - p_p J_{p_x} \cos\theta_s \dot{\theta}_s - r_p J_{p_z} \sin\theta_s \dot{\theta}_s - q_Y (p_p J_{p_x} \cos\theta_s + r_p J_{p_z} \sin\theta_s + J_{Yx} p_Y) + p_Y (q_p J_{p_y} + J_{Yy} q_Y) \quad (25)$$

با در نظر گرفتن ضرایب J_{eq} به عنوان ممان اینرسی معادل داریم:

$$J_{eq} = J_{Yz} + J_{p_x} \sin^2\theta_s + J_{p_z} \cos^2\theta_s \quad (26)$$

ضرایب θ_s با T_{d1} نشان داده شده است:

$$T_{d1} = -(-p_Y \sin\theta_s - r_Y \cos\theta_s) J_{p_x} \sin\theta_s + (p_Y \cos\theta_s - r_Y \sin\theta_s) J_{p_z} \cos\theta_s - p_p J_{p_x} \cos\theta_s - r_p J_{p_z} \sin\theta_s \quad (27)$$

با تعریف T_{d2} داریم:

$$T_{d2} = -((\dot{p} \cos\psi_s + \dot{q} \sin\psi_s - p \sin\psi_s \dot{\psi}_s + q \cos\psi_s \dot{\psi}_s) \cos\theta_s - \dot{r}_y \sin\theta_s) J_{p_x} \sin\theta_s + ((\dot{p} \cos\psi_s + \dot{q} \sin\psi_s - p \sin\psi_s \dot{\psi}_s + q \cos\psi_s \dot{\psi}_s) \sin\theta_s + \dot{r}_y \cos\theta_s) J_{p_z} \cos\theta_s + J_{Yz} \dot{r}_y - q_Y (p_p J_{p_x} \cos\theta_s + r_p J_{p_z} \sin\theta_s + J_{Yx} p_Y) + p_Y (q_p J_{p_y} + J_{Yy} q_Y) \quad (28)$$

در نتیجه:

$$\dot{r}_y = \frac{T_{d1}}{J_{eq}} (q_p - q_Y) + \frac{1}{J_{eq}} (m_{Yz} + T_{d2}) \quad (29)$$

اگر یک سنسور ژيروسکوپ نرخی در امتداد محور Z_p قاب درونی نصب شود، \dot{r}_p را اندازه گیری می کند. معادله (۲۹) بر حسب \dot{r}_p به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\dot{r}_Y = \frac{\dot{r}_p - \dot{p}_Y \sin\theta_s - \dot{\theta}_s (p_Y \cos\theta_s - r_Y \sin\theta_s)}{\cos\theta_s} \quad (30)$$

$$\dot{r}_p = \frac{(m_{Yz} + T_{d1} \dot{\theta}_s + T_{d2}) \cos\theta_s}{J_{eq}} + \dot{p}_Y \sin\theta_s - (q_p - q_Y) p_p \quad (31)$$

با تعریف T_{dYaw} داریم:

$$T_{dYaw} = (T_{d1} \dot{\theta}_s + T_{d2}) \cos\theta_s + J_{eq} (\dot{p}_Y \sin\theta_s - (q_p - q_Y) p_p) \quad (32)$$

معادله (۳۱) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\dot{r}_p = \frac{m_{Yz} \cos\theta_s + T_{dYaw}}{J_{eq}} \quad (33)$$

دیاگرام بلوکی شکل ۳ کانال های یاو و پیچ جستجوگر را نشان می دهد که در کانال پیچ از معادله (۲۱) و در کانال یاو از معادله (۳۳) استفاده شده است.

$$\beta = \sqrt{\frac{b^+}{b^-}} \quad (۴۸)$$

که به β حد بهره گفته می‌شود. برای دومین عبارت سمت راست نامعادله می‌توان نوشت:

$$\beta^{-1} \leq b\hat{b}^{-1} \leq \beta \Rightarrow -b\hat{b}^{-1} \leq -\beta^{-1} \quad (۴۹)$$

همچنین، برای عبارت اول سمت راست نامعادله:

$$|1 - b\hat{b}^{-1}| \leq |1 - \beta^{-1}| \quad (۵۰)$$

از طرفی:

$$\beta = \sqrt{\frac{b^+}{b^-}} \geq 1 \Rightarrow 0 \leq \beta^{-1} \leq 1 \quad (۵۱)$$

پس:

$$|1 - \beta^{-1}| = |1 - \beta^{-1}| \quad (۵۲)$$

نامعادله (۴۱) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$|1 - b\hat{b}^{-1}| \leq 1 - \beta^{-1} \quad (۵۳)$$

نامعادله (۳۶) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$s\dot{s} \leq |s|(|1 - \beta^{-1}||\hat{u}| - \beta^{-1}k + \delta) \quad (۵۴)$$

با استفاده از شرط لغزش، بازه مجاز k به دست می‌آید:

$$|s|(|1 - \beta^{-1}||\hat{u}| - \beta^{-1}k + \delta) \leq -\eta|s| \quad (۵۵)$$

در نتیجه:

$$k \geq (\beta - 1)|\hat{u}| + \beta(\delta + \eta) \quad (۵۶)$$

مقدار k اثر مستقیمی بر چترینگ دارد. برای حذف چترینگ، به جای $\text{sgn}(s)$ از $\tanh(\frac{s}{\phi})$ استفاده می‌شود که در آن ϕ ضخامت لایه مرزی است.

۳- بررسی عملکرد کنترل مود لغزشی انتگرالی جستجوگر پیچ-یاو
در این بخش، عملکرد کنترل مود لغزشی جستجوگر پیچ-یاو در حلقه پایدارسازی بررسی می‌شود. به این منظور، شبیه‌سازی حلقه پایدارسازی اجرا و نتایج ارائه شده است. مقادیر استفاده شده در کنترل کننده در جدول ۱ آمده است. مقادیر ماتریس‌های ممان اینرسی جستجوگر پیچ-یاو به صورت زیر است:

$$[J_Y^Y]^Y = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix}, \quad (۵۷)$$

$$[J_P^P]^P = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix}$$

جدول ۱- پارامترهای کنترل کننده مود لغزشی برای حلقه پایدارسازی

جستجوگر پیچ-یاو		
پارامتر	مقدار	توصیف
η'_1	۱۰۰	بهره کنترلی کانال پیچ
λ'_1	۱۰۰۰	شیب سطح لغزش در کانال پیچ

برای طراحی سیگنال کنترلی با توجه به کران نامعینی، برای هر دو کانال پیچ و یاو به صورت زیر عمل می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x} = b(x)u + d(x) \\ y = x \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 0 \leq b^- \leq b \leq b^+ \\ \hat{b} = \sqrt{b^+b^-} \end{cases}, \quad (۳۵)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{b^+}{b^-}}, |d| \leq \delta(x, t)$$

که در آن، β حد بهره و $\delta(x, t)$ کران اغتشاشات است. از آنجا که متغیر کنترلی خطای انتگرال است، معادله یک مرتبه افزایش می‌یابد.

$$\int \ddot{x} = \dot{x} = b(x)u + d(x) \rightarrow n = 2 \quad (۳۶)$$

مرتبه سیستم ۲ است. سطح لغزش به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^1 \int_0^t e = e + \lambda \int e \quad (۳۷)$$

دینامیک سطح لغزش باید صفر باشد:

$$\dot{s}(x, t) = \dot{e} + \lambda e = 0 \quad (۳۸)$$

با حل معادله بالا برحسب ورودی کنترلی، کنترل معادل به دست می‌آید که با u_{eq} نشان داده شده است. u_{eq} قانون کنترلی پیوسته‌ای است که وقتی دینامیک دقیق معلوم باشد، رابطه $\dot{s}(x, t) = 0$ را برقرار نگه می‌دارد. برای به دست آوردن u_{eq} به صورت زیر عمل می‌شود:

$$\dot{e} + \lambda e = \dot{x} - \dot{x}_d + \lambda e = \hat{b}u - \dot{x}_d + \lambda e = 0 \quad (۳۹)$$

$$u_{eq} = \hat{b}^{-1}(\dot{x}_d - \lambda e) = \hat{b}^{-1}\hat{u} \quad (۴۰)$$

سیگنال کنترل مود لغزشی به صورت زیر است:

$$u = u_{eq} - k\hat{b}^{-1}\text{sgn}(s) = \hat{b}^{-1}(\hat{u} - k\text{sgn}(s)) \quad (۴۱)$$

که در آن k ضریب $\text{sgn}(s)$ است که از شرط لغزش به دست می‌آید. شرط لغزش به صورت زیر است:

$$s\dot{s} \leq -\eta|s| \quad (۴۲)$$

با جایگذاری \dot{s} در شرط لغزش، بازه مجاز k به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} s\dot{s} &= s(bu + d - \dot{x}_d + \lambda e) = \\ &= s(b(\hat{b}^{-1}(\hat{u} - k\text{sgn}(s))) + d - \dot{x}_d + \lambda e) = \\ &= s(b\hat{b}^{-1}\hat{u} - b\hat{b}^{-1}k\text{sgn}(s) + d - \dot{x}_d + \lambda e) = \end{aligned} \quad (۴۳)$$

$$s((b\hat{b}^{-1} - 1)\hat{u} + (1 - b\hat{b}^{-1})\lambda e - b\hat{b}^{-1}k\text{sgn}(s) + d)$$

با فاکتورگیری از $-(1 - b\hat{b}^{-1})$ و با توجه به این که $\text{sgn}(s) = \frac{|s|}{s}$ است:

$$s(1 - b\hat{b}^{-1})(\hat{u} - \lambda e) - b\hat{b}^{-1}k|s| + sd = s(1 - b\hat{b}^{-1})\hat{u} - b\hat{b}^{-1}k|s| + sd \quad (۴۴)$$

با استفاده از نامساوی مثلث:

$$s\dot{s} \leq |s||1 - b\hat{b}^{-1}||\hat{u}| - b\hat{b}^{-1}k|s| + |s|d \quad (۴۵)$$

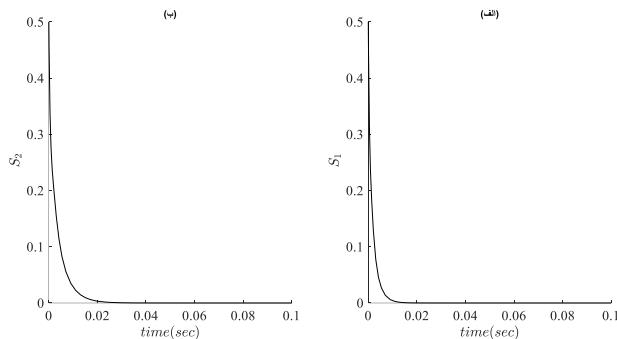
می‌دانیم که $d \leq \delta$ است. از طرفی:

$$\begin{cases} 0 \leq b^- \leq b \leq b^+ \\ \hat{b} = \sqrt{b^+b^-} \end{cases} \quad (۴۶)$$

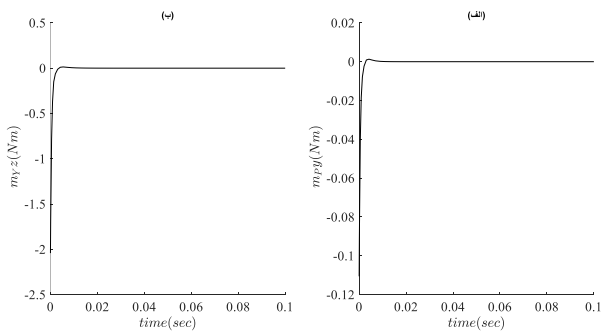
با تقسیم بازه b بر \hat{b} :

$$\sqrt{\frac{b^-}{b^+}} \leq \frac{b}{\hat{b}} \leq \sqrt{\frac{b^+}{b^-}} \quad (۴۷)$$

درونی نسبت به قاب اینرسی بیان شده در قاب درونی، (ب) نرخ یابو قاب درونی نسبت به قاب اینرسی بیان شده در قاب درونی.



شکل ۴- فاصله از سطح لغزش در حلقه پایدارسازی جستجوگر پیچ-یابو، در به صفر رساندن نرخ پیچ و یابو از مقدار اولیه 0.5 rad/sec (الف) کانال پیچ، (ب) کانال یابو.



شکل ۵- گشتاور کنترلی حلقه پایدارسازی جستجوگر پیچ-یابو: الف) کانال پیچ، (ب) کانال یابو.

۳-۲- مقایسه عملکرد کنترل کننده مود لغزشی با کنترل کننده PID

در این بخش، عملکرد کنترل کننده مود لغزشی با کنترل کننده PID مقایسه می شود. پارامترهای k'_{p1} ، k'_{d1} ، k'_{p2} و k'_{d2} بهره های کنترلی کانل پیچ و k'_{p1} ، k'_{d1} ، k'_{p2} و k'_{d2} بهره های کنترلی کانال یابو کنترل کننده PID در حلقه پایدارسازی است. پارامترهای کنترل کننده در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- پارامترهای کنترل کننده PID برای حلقه پایدارسازی جستجوگر

پارامتر	مقدار
k'_{p1}	۰.۲
k'_{d1}	۰.۶
k'_{p2}	۰.۰۰۱
k'_{d2}	۰.۰۰۱
k'_{p1}	۰.۰۰۱
k'_{d1}	۰.۰۰۱
k'_{p2}	۰.۰۰۱
k'_{d2}	۰.۰۰۱

بهره کنترلی کانال یابو	۵۰	η'_2
شیب سطح لغزش کانال یابو	۱۰۰۰	λ'_2
ضخامت لایه مرزی کانال پیچ	۰.۴	ϕ'_1
ضخامت لایه مرزی کانال یابو	۰.۴	ϕ'_2
حد بالای نامعینی ضریب کنترلی کانال پیچ	$0.5b'_1$	b_1^{+}
حد پایین نامعینی ضریب کنترلی کانال پیچ	$-0.5b'_1$	b_1^{-}
حد بالای نامعینی ضریب کنترلی کانال یابو	$0.5b'_2$	b_2^{+}
حد پایین نامعینی ضریب کنترلی کانال یابو	$-0.5b'_2$	b_2^{-}

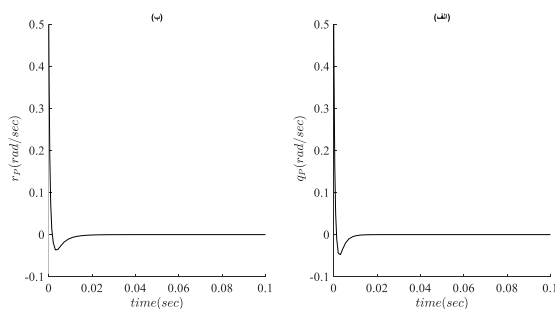
جدول ۲- مشخصات موتور DC

پارامتر	مقدار	واحد	توصیف
R_a	۴.۵	Ω	مقاومت پایانه
L_a	۰.۰۰۳	H	اندوکتانس پایانه
K_{TM}	۰.۸۵	N.m/A	ثابت گشتاور
k_e	۰.۸۵	V/Rad/s	نیروی محرکه الکتریکی معکوس

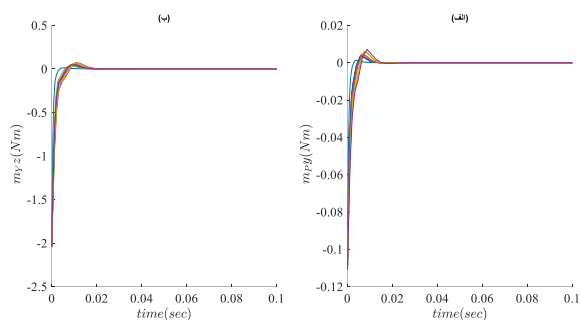
۳-۱- عملکرد کنترل کننده مود لغزشی در حلقه پایدارسازی

در حلقه پایدارسازی، هدف ردگیری سرعت های زاویه ای مرجع و در نهایت ثابت نگه داشتن حسگرها در فضای اینرسی است. در این جا هدف کنترل کننده کانال های رول و پیچ به صفر رساندن نرخ رول و پیچ از مقدار اولیه 0.5 rad/sec است.

برای تولید گشتاور از یک موتور جریان مستقیم (موتور DC) محصول شرکت نورثروپ گرومن (NORTHROP GRUMMAN) استفاده شده است که اطلاعات آن در جدول ۲ آمده است. در ادامه، نمودارهای پاسخ جستجوگر بر حسب زمان، به منظور ردگیری مقادیر مطلوب نشان داده شده است. همچنین، فرامین کنترل در حلقه پایدارسازی که شامل m_{yz} و m_{yz} است، در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، در حلقه پایدارسازی زوایای پیچ و یابو به سرعت صفر شده اند. همچنین، در ابتدای زمان اجرا فاصله از سطح لغزش صفر نیست و کنترل کننده در فاز رسش است و بعد از گذشت مدت زمان بسیار کوتاهی در فاز لغزش قرار می گیرد.



شکل ۳- عملکرد حلقه پایدارسازی جستجوگر پیچ-یابو در به صفر رساندن نرخ پیچ و یابو از مقدار اولیه 0.5 rad/sec (الف) نرخ پیچ قاب



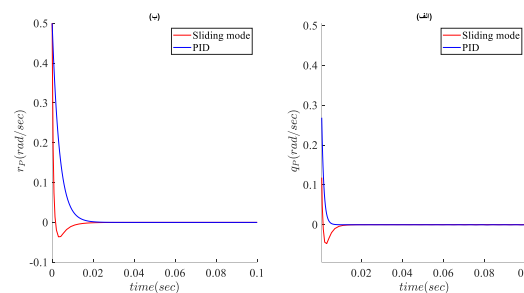
شکل ۸- گشتاور کنترلی حلقه پایدارسازی جستجوگر پیچ-یاو در حضور [۱۰۰٪، ۵۰٪-] عدم قطعیت در ممان اینرسی: الف) کانال پیچ، ب) کانال یاو.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا دینامیک جستجوگر دو درجه آزادی پیچ-یاو به روش نیوتون-اولر مدل سازی شد که رفتار غیرخطی و کوپلینگ شدیدی داشت. سپس، یک کنترل کننده مود لغزشی برای سیستم دو ورودی دو خروجی جستجوگر پیچ-یاو طراحی شد. نتایج به دست آمده که شبیه سازی حلقه پایدارسازی است، نشان می دهد که کنترل کننده به سرعت به مقدار مطلوب رسیده است. همچنین، در مقایسه کنترل کننده PID عملکرد سریع تری داشته است. از آن جا که کنترل مود لغزشی یکی از روش های کنترل مقاوم است، با اجرای شبیه سازی در حضور نامعینی نشان داده شد که کنترل کننده نسبت به عدم قطعیت مقاوم است.

۵- مراجع

- [1] Liu, Xiao, and Bo Mo. "Line-of-sight estimation for missile with roll-pitch seeker." 2018 37th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2018.
- [2] Ekstrand, Bertil. "Equations of motion for a two-axes gimbal system." IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 37.3 (2001): 1083-1091.
- [3] Abdo, Maher, et al. "Research on the cross-coupling of a two axes gimbal system with dynamic unbalance." International Journal of advanced robotic systems 10.10 (2013): 357.
- [4] Abdo, Maher, et al. "Cascade control system for two axes gimbal system with mass unbalance." International Journal of Scientific & Engineering Research 4.9 (2013): 903-913.
- [5] Abdo, Maher Mahmoud, et al. "Stabilization loop of a two axes gimbal system using self-tuning PID type fuzzy controller." ISA transactions 53.2 (2014): 591-602.
- [6] Espinosa, Carlos, et al. "Sliding mode line-of-sight stabilization of a two-axes gimbal system." 2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS). IEEE, 2015.
- [7] Naderolasli, Amir, and Mohammad Tabatabaei. "Stabilization of the two-axis gimbal system based on an adaptive fractional-order sliding-mode controller." IETE Journal of Research 63.1 (2017): 124-133.
- [8] Aggarwal, Shubham, Aashutosh Joshi, and Shyam Kamal. "Line of sight stabilization of two-dimensional gimbal platform." 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation

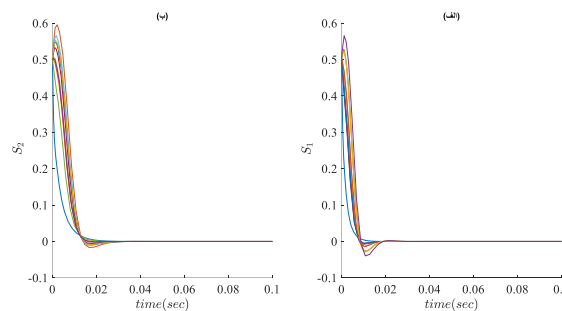


شکل ۶- مقایسه عملکرد کنترل کننده های مود لغزشی و PID در حلقه پایدارسازی جستجوگر پیچ-یاو: الف) نرخ پیچ قاب درونی نسبت به قاب اینرسی بیان شده در قاب درونی، ب) نرخ یاو قاب درونی نسبت به قاب اینرسی بیان شده در قاب درونی.

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود، برای این جستجوگر هر دو کنترل کننده پاسخ مناسبی در حلقه پایدارسازی می دهند اما مود لغزشی سریع تر است.

۳-۳- بررسی عملکرد کنترل کننده مود لغزشی در حضور عدم قطعیت در پارامتر ممان اینرسی

در این جا، نتایج شبیه سازی حلقه پایدارسازی در حضور عدم قطعیت در پارامتر ممان اینرسی گیماها بررسی شده است. شبیه سازی با در نظر گرفتن خطای مدل سازی در بازه [۱۰۰٪، ۵۰٪-] چند مرتبه اجرا شده است. نتایج به صورت یک جا در شکل نشان داده شده است. همچنین، ورودی های کنترلی در شکل نشان داده شده است.



شکل ۷- فاصله از سطح لغزش در حلقه پایدارسازی جستجوگر پیچ-یاو، در به صفر رساندن نرخ پیچ و یاو از مقدار اولیه ۰.۵ rad/sec در حضور [۱۰۰٪، ۵۰٪-] عدم قطعیت در ممان اینرسی: الف) کانال پیچ، ب) کانال یاو.

- [11] Ahi, Behzad, and Mohammad Haeri. "A high-performance guidance filter scheme with exact dynamic modeling of a pitch-yaw gimballed seeker mechanism." *Mechanical Systems and Signal Processing* 144 (2020): 106857.
- [9] Zipfel, P. H. "Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics—Third edition." (2014)
- [10] Slotine, Jean-Jacques E., and Weiping Li. *Applied nonlinear control*. Vol. 199. No. 1. Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall, 1991.
- Engineering (ICPCSI). IEEE, 2017.