

طراحی، ساخت و کنترل مقاوم تطبیقی ربات شبیه ساز حرکت سه درجه آزادی به روش طراحی مبتنی بر مدل

چکیده: در این مقاله، کنترل مقاوم تطبیقی یک ربات شبیه ساز حرکت سه درجه آزادی، به منظور تست سخت افزار در حلقه واحدهای سنسوری با ابعاد و جرم مشخص مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، ساختار کلی ربات معرفی گردیده و سپس معادلات الکترومکانیکی حاکم بر سیستم به روش تکراری نیوتن-اویلر استخراج شده است. در ادامه با توجه به مدل الکترومکانیکی و در نظر گرفتن عدم قطعیت ها، یک کنترلر تطبیقی فازی مد لغزشی برای شبیه ساز حرکت طراحی شده و پس از شبیه سازی، روی سیستم پیاده سازی شده است. نتایج پیاده سازی، نشان از عملکرد مناسب کنترلر در دنبال کردن فرمان های مطلوب در حضور عدم قطعیت ها دارد. همچنین نتایج نشان می دهند که اضافه کردن یک سیستم فازی جهت تعیین حد اشباع عملگرهای مفصلی، لرزش ناشی از ساختار کنترلر مد لغزشی را کاهش می دهد.

واژه های راهنما: تست سخت افزار در حلقه، شبیه ساز حرکت سه درجه آزادی، کنترل مد لغزشی، کنترل فازی، طراحی مبتنی بر مدل

حسن صیادی*

استاد

محسن ذوالفقاری

دانشجوی کارشناسی ارشد

مریم هویت طلب

مربی،

دانشکده مهندسی

مکانیک،

دانشگاه صنعتی شریف، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

Hassan Sayyaadi*
Professor

Mohsen Zolfaghari
M.Sc. Student

Maryam Hoviattalab
Instructor,
Faculty of Mechanical
Engineering
Sharif University of
Technology, Tehran

Design, fabrication and robust adaptive control of a 3_axis motion simulator using model based design approach

Abstract: In this work, robust adaptive control of a 3_Axis Motion Simulator robot for Hardware-in-the-Loop testing of sensor units with specified dimensions and mass are investigated. Initially, 3_Axis Motion Simulator robot is introduced, followed by extracting electromechanical equations governing the system using the iterative Newton-Euler method. Subsequently, considering the electromechanical model and taking uncertainties into account, a fuzzy sliding mode controller is designed for motion simulator, and after simulation, it is implemented on the system. The implementation results demonstrate the controller's satisfactory performance in tracking desired commands in the presence of uncertainties. Also, the results show that adding a fuzzy system to determine the saturation limits of actuators reduces the chattering caused by the sliding mode control structure.

Keywords: Hardware in the loop, 3_Axis Motion Simulator, Sliding mode control, Fuzzy control, Model based design

۱- مقدمه

دارند. واضح است که بسیاری از آزمایشات سخت افزار در حلقه را می‌توان بدون شبیه‌سازهای شرایط محیطی انجام داد اما وجود شبیه‌سازهای شرایط عملکردی در آزمایشات سخت افزار در حلقه امری ضروری است. یکی از انواع شبیه‌سازهای شرایط عملکردی در آزمایشات سخت افزار در حلقه، شبیه‌ساز حرکت سه درجه آزادی^۲ است. این شبیه‌ساز وظیفه دارد که حرکات دورانی جسم پرنده را برای سنسورها و واحدهای هدایت و ناوبری به صورت فیزیکی شبیه‌سازی کند. این شبیه‌سازی بر اساس برنامه حرکتی که مکانیزم از کامپیوتر دریافت می‌کند، صورت می‌گیرد. با انجام حرکات مشابه واقعیت توسط شبیه‌ساز برای واحد سنسوری، عملکرد واحد سنسوری در تست سخت افزار در حلقه راستی آزمایی می‌گردد [۱].

پژوهش‌هایی که در زمینه مدل‌سازی و طراحی سیستم کنترل شبیه‌ساز حرکت چند درجه آزادی و مکانیزم‌های مشابه مانند پلتفرم‌های پایدارساز، سرومکانیزم‌ها و ... انجام شده است را می‌توان بطور کلی در دو حوزه شبیه‌سازی و پیاده‌سازی تقسیم‌بندی کرد. در پژوهش‌های مرتبط با شبیه‌سازی، روش‌های کنترلی مختلفی مانند جدول‌بندی بهره، کنترل بهینه، کنترل غیر خطی، کنترل‌کننده پی‌آی دی‌فازی و ... مورد بررسی قرار گرفته است، اما باید توجه داشت که اولاً در اکثر مدل‌سازی‌های بکار رفته مدل عملگرهای مفاصل، عدم قطعیت‌های مرتبط با خواص جرمی، مدل اصطکاک و ... در نظر گرفته نشده است و این موضوع در کاربردهای پیاده‌سازی تأثیر نامطلوبی دارد ([۲]-[۷]). ثانیاً، بسیاری از الگوریتم‌های کنترلی پیشنهادی با توجه به زیاد بودن حجم محاسباتی و همچنین سریع بودن دینامیک سیستم، قابلیت اجرای زمان حقیقی در کاربردهای عملی را ندارند. در پژوهش‌های مرتبط با پیاده‌سازی، کنترلرهای کلاسیک و تلفیق روش‌های کنترل کلاسیک و هوشمند مورد تست و آزمایش قرار گرفته است. در بیشتر پژوهش‌های مرتبط با پیاده‌سازی، مدل دینامیکی سیستم محاسبه نشده است و برای کنترل از روش‌های کنترل مستقل از مدل (مانند پی‌آی دی، پی‌آی دی‌فازی و ...) استفاده شده است ([۸]-[۱۶]). در برخی دیگر از پژوهش‌های مرتبط با پیاده‌سازی، مدل‌سازی ربات سه درجه آزادی نیز صورت گرفته است که با توجه به تفاوت آرایش قاب‌های شبیه‌سازهای مختلف، هندسه قاب‌ها، تعداد درجات آزادی، نوع عملگرهای مورد استفاده و ... به مدل‌های دینامیکی متفاوتی منتج شده است.

هدف از این مقاله، طراحی یک سیستم کنترل مقاوم تطبیقی برای ربات شبیه‌ساز حرکت سه درجه آزادی است. بدین منظور، ابتدا به مدلسازی‌سازی الکترومکانیکی سیستم پرداخته می‌شود. در ادامه یک ساختار کنترل فازی مد لغزشی برای سیستم طراحی می‌گردد. این ساختار نسبت به پژوهش‌های قبلی سه مزیت دارد. اول آنکه مدل کامل سیستم در قانون کنترل تأثیر

سامانه‌ها و سیستم‌های دینامیکی معمولاً از چندین زیرسیستم تشکیل می‌شوند. این زیر سیستم‌ها در تعامل با یکدیگر باعث عملکرد مناسب سیستم اصلی می‌گردند. عدم عملکرد صحیح هر کدام از زیر سیستم‌ها موجب تأثیر نامطلوب در عملکرد سیستم اصلی خواهد شد. اطمینان از عملکرد هر کدام از زیرسیستم‌ها قبل از پیاده‌سازی نهایی روی سیستم اصلی، موجب پیدا کردن منشاء خطاهای احتمالی و کاهش هزینه‌های پیاده‌سازی می‌شود. اهمیت این امر در سیستم‌هایی مانند هواپیما، ماهواره، زیرسطحی و بطور کلی سیستم‌هایی که به طور مستقیم به آن‌ها دسترسی نداریم بیشتر است. جهت تست زیرسیستم‌های یک سیستم از مفهومی تحت عنوان تست سخت‌افزار در حلقه^۱ استفاده می‌شود. ایده اصلی این روش به قرار دادن یک یا چند قسمت از زیرسیستم‌های یک سیستم به صورت سخت‌افزار واقعی در حلقه شبیه‌سازی مربوط می‌شود. ایده سخت‌افزار در حلقه این امکان را به ما می‌دهد که بدون ساخت تمام اجزای یک سیستم، عملکرد یک زیر سیستم را مورد بررسی قرار دهیم. همچنین از آنجا که در این روش به جای برخی از زیرسیستم‌ها، سخت‌افزار واقعی داخل حلقه شبیه‌سازی قرار گرفته است، نتایج شبیه‌سازی‌ها قابل اعتمادتر بوده و به نتایج نهایی نزدیک‌تر خواهد بود. یکی از اصلی‌ترین کاربردهای روش سخت‌افزار در حلقه، تست سنسورها و واحدهای هدایت و ناوبری در صنایع هوافضا است. عملکرد اشتباه سنسورهای هدایت و ناوبری موجب بروز اشتباه، تحمیل هزینه و حتی بروز فاجعه می‌شود. بنابراین باید به نحوی قبل از پیاده‌سازی نهایی، از عملکرد صحیح این سنسورها اطمینان حاصل کرد. در نتیجه برای اطمینان از عملکرد سنسورهای ناوبری از تست سخت‌افزار در حلقه بهره گرفته می‌شود. برای قرار دادن سنسورها در حلقه شبیه‌سازی در حالتی که فرآیند به صورت نرم‌افزاری مدل شده باشد، لازم است تا آنچه توسط سنسورها اندازه‌گیری می‌شود، برای آنها شبیه‌سازی شود. علاوه بر آن، به منظور تست اثر شرایط محیطی بر عملکرد سنسورها در آزمایش سخت‌افزار در حلقه، می‌توان شرایط محیطی را نیز شبیه‌سازی نمود. بر همین اساس، نیاز به وجود شبیه‌سازهایی که بتوانند شرایط اجرای آزمایشات سخت‌افزار در حلقه را فراهم کنند، احساس می‌شود. این شبیه‌سازها بسته به نوع کاربرد به دو نوع شبیه‌سازهای شرایط عملکردی و شبیه‌سازهای شرایط محیطی تقسیم می‌شوند. شبیه‌سازهای شرایط عملکردی وظیفه شبیه‌سازی شرایطی را که یک زیرسیستم برای عملکرد صحیح به آن نیاز دارد، بر عهده دارند. شبیه‌سازهای شرایط محیطی، وظیفه شبیه‌سازی شرایطی را که محیط بر یک زیرسیستم در طول کار اعمال می‌کند بر عهده

² 3_Axis motion simulator¹ Hardware in the loop

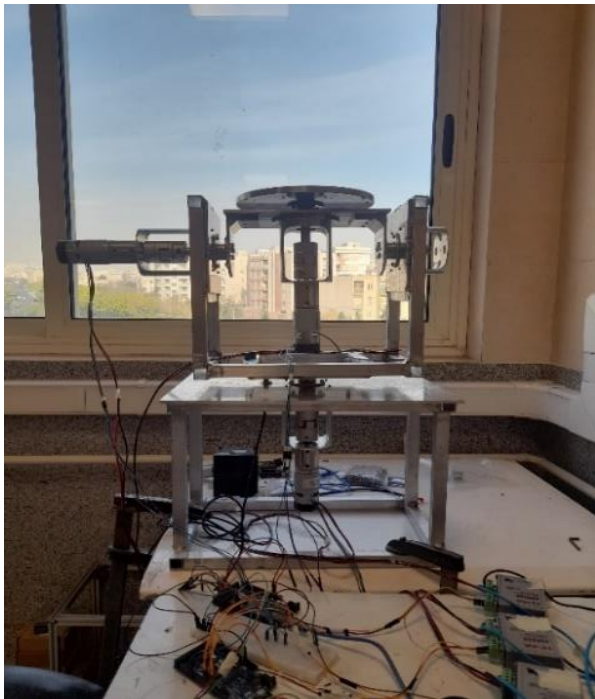
اتصال هر عملگر به قاب مربوطه از طریق یک فلنج واسط صورت می‌گیرد. عملگر هر محور به وسیله یک کوپلینگ و شفت واسط، قدرت را از عملگر مربوطه به قاب مربوط به آن محور منتقل می‌کند. برای اندازه‌گیری زاویه و سرعت زاویه‌ای هر محور، از سه انکودر افزایشی که محور آن متصل به محور عملگر است، استفاده می‌شود. همچنین برای رفرنس کردن محورها هنگام شروع به کار مکانیزم، از سه سنسور مجاورتی استفاده شده است.

دارد. دوم آنکه کنترلر نسبت به عدم قطعیت‌های پارامتری مقاوم است و عواملی مانند نامعلوم بودن جرم واحد تحت تست، نادقیق بودن پارامترهای مدل و ... تأثیری بر عملگر مطلوب کنترلر ندارد و سوم آنکه سیستم کنترل قابلیت اجرا به صورت زمان حقیقی را دارد. برای رفع لرزش ناشی از ساختار کنترل مد لغزشی، از دو سیستم فازی استفاده شده است. یک سیستم فازی وظیفه تعیین حد سازی سطح لغزش و یک سیستم فازی دیگر وظیفه تعیین حد اشباع عملگرها در طول عملکرد سیستم را بر عهده دارد. در انتها، نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی حاصل از پیاده‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معرفی شبیه‌ساز حرکت سه درجه آزادی

شکل (۱) شماتیک طراحی مفهومی مکانیزم و شکل (۲) شبیه ساز ساخته شده و مورد بررسی در این مقاله را نشان می‌دهد. این شبیه‌ساز دارای سه قاب است که در مجموع سه درجه آزادی دورانی را برای سیستم فراهم می‌کند. مطابق با شکل (۱)، قاب اول (قرمز رنگ) قابلیت دوران حول محور سمت $^1(\psi)$ ، قاب دوم (بنفش رنگ) قابلیت دوران حول محور فراز $^2(\theta)$ و قاب سوم (آبی رنگ) قابلیت دوران حول محور چرخش $^3(\phi)$ را تأمین می‌کند.

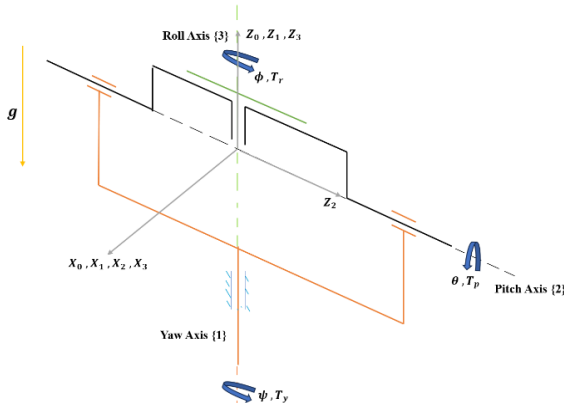
وظیفه دوران هر قاب بر عهده عملگر مربوط به آن قاب است. عملگر محور سمت متصل به پایه ربات، عملگر محور فراز متصل به قاب شماره (۱) و عملگر محور چرخش متصل به قاب شماره (۲) است.



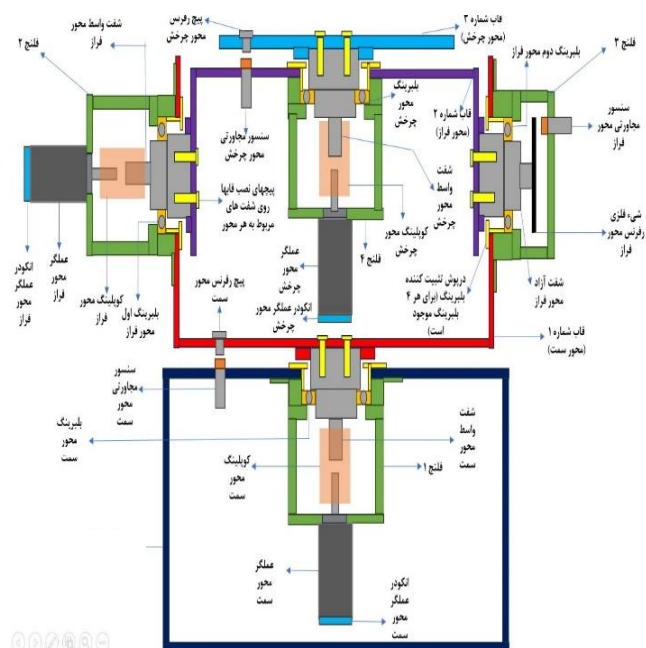
شکل ۲ شبیه‌ساز حرکت ساخته شده در آزمایشگاه مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های هوشمند دانشگاه صنعتی شریف

۳- مدل‌سازی دینامیکی

آرایش قاب‌های شبیه‌ساز مطابق شکل (۳) می‌باشد.



شکل ۳ شماتیک آرایش قاب‌های شبیه‌ساز نسبت به یکدیگر



شکل ۱ شماتیک طراحی مفهومی مکانیزم

³ Roll axis

¹ Yaw axis

² Pitch axis

زمین شروع کرده و به ترتیب به سمت قاب آخر حرکت می‌کنیم. برای در نظر گرفتن شتاب جاذبه، فرض می‌شود دستگاه $\{0\}$ با شتاب خطی g به سمت خلاف جاذبه زمین حرکت می‌کند. ادامه نوشتار، منظور از ${}^j X_i$ ، بردار X_i بیان شده در دستگاه Z است. به عنوان مثال، ${}^1\omega_1$ به معنای سرعت دورانی قاب (۱) بیان شده در دستگاه مختصات $\{1\}$ است. سرعت‌ها و شتاب‌ها هر قاب مطابق با روابط (۴) تا (۱۳) بدست می‌آید:

$${}^0\omega_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^0\dot{\omega}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad {}^0\dot{V}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$${}^1\omega_1 = {}^0R {}^0\omega_0 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \Rightarrow {}^1\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

$${}^2\omega_2 = {}^1R {}^1\omega_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{\psi}s\theta \\ -\dot{\psi}c\theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$${}^3\omega_3 = {}^2R {}^2\omega_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{\psi}s\theta c\phi + \dot{\theta}s\phi \\ \dot{\psi}s\theta s\phi + \dot{\theta}c\phi \\ \dot{\psi}c\theta + \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

$${}^1\dot{\omega}_1 = {}^0R {}^0\dot{\omega}_0 + {}^0R {}^0\omega_0 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} \quad (۸)$$

$${}^2\dot{\omega}_2 = {}^1R {}^1\dot{\omega}_1 + {}^1R {}^1\omega_1 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\ddot{\psi}s\theta - \dot{\psi}\dot{\theta}c\theta \\ -\ddot{\psi}c\theta + \dot{\psi}\dot{\theta}s\theta \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} \quad (۹)$$

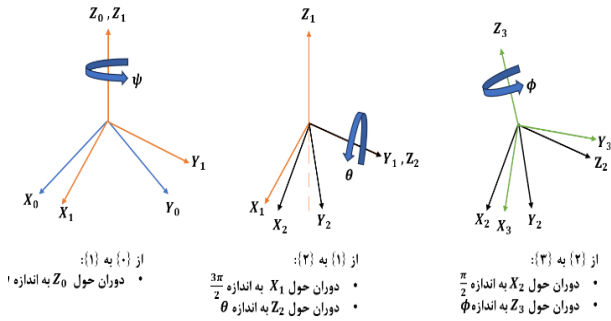
$${}^3\dot{\omega}_3 = {}^2R {}^2\dot{\omega}_2 + {}^2R {}^2\omega_2 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\ddot{\psi}s\theta c\phi + \ddot{\theta}s\phi - \dot{\psi}\dot{\theta}c\theta c\phi + \dot{\psi}\dot{\phi}s\theta s\phi + \dot{\theta}\dot{\phi}c\phi \\ \ddot{\psi}s\theta s\phi + \ddot{\theta}c\phi + \dot{\psi}\dot{\theta}c\theta s\phi + \dot{\psi}\dot{\phi}s\theta c\phi - \dot{\theta}\dot{\phi}s\phi \\ \ddot{\phi} + \dot{\psi}c\theta - \dot{\psi}\dot{\theta}s\theta \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

$${}^1\dot{V}_1 = {}^0R {}^0\dot{V}_0 \Rightarrow {}^1\dot{V}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

$${}^2\dot{V}_2 = {}^1R {}^1\dot{V}_1 \Rightarrow {}^2\dot{V}_2 = \begin{bmatrix} -gs\theta \\ -gc\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

$${}^3\dot{V}_3 = {}^2R {}^2\dot{V}_2 \Rightarrow {}^3\dot{V}_3 = \begin{bmatrix} -gs\theta c\phi \\ gs\theta s\phi \\ gc\theta \end{bmatrix} \quad (۱۳)$$

دستگاه $\{0\}$ متصل به زمین (پایه ربات)، دستگاه $\{1\}$ متصل به قاب محور سمت، دستگاه $\{2\}$ متصل به قاب محور فراز و دستگاه $\{3\}$ متصل به قاب محور چرخش است. شکل (۴) نحوه تبدیل دستگاه‌های متصل به قاب‌ها را به یکدیگر بیان می‌کند.



شکل ۴ تبدیل دستگاه‌های متصل به قاب‌ها به یکدیگر

با توجه به شکل (۴)، پارامترهای دناویت هارتنبرگ

مطابق با جدول (۱) بدست می‌آید:

جدول ۱ پارامترهای دناویت_هارتنبرگ

i	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	d_i
1	0	0	ψ	0
2	$\frac{3\pi}{2}$	0	θ	0
3	$\frac{\pi}{2}$	0	ϕ	0

با توجه به جدول (۱)، ماتریس‌های دوران به صورت روابط

(۱) تا (۳) است.

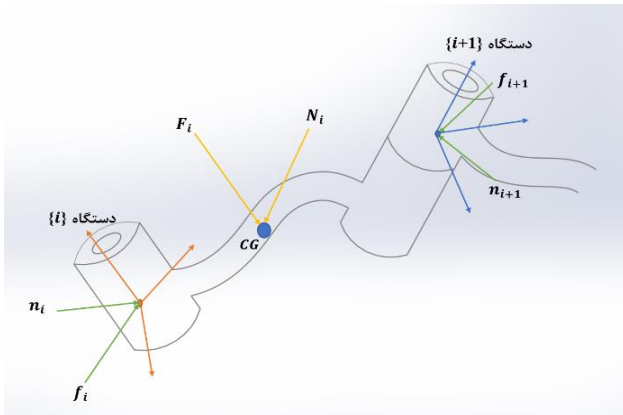
$${}^0R = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1R = {}^0R^T \quad (۱)$$

$${}^1R = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -s\theta & -c\theta & 0 \end{bmatrix}, \quad {}^2R = {}^1R^T \quad (۲)$$

$${}^2R = \begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ s\phi & c\phi & 0 \end{bmatrix}, \quad {}^3R = {}^2R^T \quad (۳)$$

در معادلات (۱) تا (۳)، iR به معنای دورانی است که بیان را از دستگاه j به دستگاه i می‌برد. با توجه به الگوریتم تکرار بیرونی نیوتن اولیه، برای بدست آوردن سرعت‌ها و شتاب‌ها، از

$${}^i n_i = {}_{i+1}^i R^{i+1} n_{i+1} + {}^i P_{C_i} \times {}^i F_i + {}^i P_{i+1} \times {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1} + {}^i N_i \quad (18)$$



شکل ۶ نمودار جسم آزاد برای یک لینک بازوی رباتیک

نیروها و گشتاورهای اینرسی هر قاب مطابق با روابط (۱۹) و (۲۰) محاسبه می‌شوند:

$${}^i F_i = m_i \dot{V}_{C_i}, i = 1, 2, 3 \quad (19)$$

$${}^i N_i = {}^c I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times {}^c I_i \omega_i, i = 1, 2, 3 \quad (20)$$

در روابط (۱۹) و (۲۰)، m_i جرم قاب $\{i\}$ ام است. همچنین ${}^c I_i$ تانسور لختی قاب $\{i\}$ ام نسبت به دستگاهی که محورهای آن موازی با محورهای دستگاه $\{i\}$ ام و مرکز آن منطبق بر مرکز جرم قاب $\{i\}$ ام است، می‌باشد. تانسور لختی قاب‌ها مطابق با رابطه (۲۱) است:

$${}^c I_i = \begin{bmatrix} I_{xx_i} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy_i} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz_i} \end{bmatrix} \quad (21)$$

با محاسبه نیروها و گشتاورهای اینرسی و مطابق با شکل (۶)، تعادل نیرویی و گشتاوری برای قاب سوم مطابق با روابط (۲۲) و (۲۳) می‌باشد:

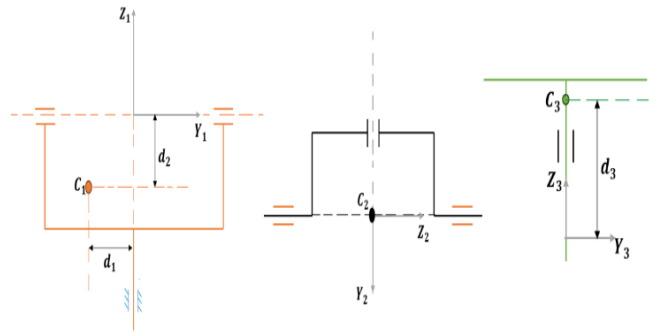
$${}^3 f_3 = {}^3 F_3 \quad (22)$$

$${}^3 n_3 = {}^3 P_{C_3} \times {}^3 F_3 + {}^3 N_3 \quad (23)$$

گشتاوری که باید توسط عملگر محور چرخش ایجاد شود برابر با سطر سوم بردار ${}^3 n_3$ است:

$$T_r = I_{zz_3} \dot{\psi} c\theta + I_{zz_3} \ddot{\phi} - I_{zz_3} \dot{\psi} \dot{\theta} s\theta \quad (24)$$

برای بدست آوردن شتاب خطی مرکز جرم هر قاب، لازم است که مکان قرارگیری مرکز جرم هر قاب را نسبت به مبدأ دستگاه متصل به آن قاب معلوم باشد. شکل (۵) مکان قرارگیری مرکز جرم قاب‌ها نسبت به مرکز دستگاه‌های مختصات متصل به قاب‌ها را نشان می‌دهد:



شکل ۵ مکان قرارگیری مرکز جرم هر قاب

با توجه به محل قرارگیری مرکز جرم قاب‌ها، شتاب خطی مرکز جرم هر قاب مطابق با روابط (۱۴) تا (۱۶) بدست می‌آید:

$${}^1 \dot{V}_{C_1} = \begin{bmatrix} d_1 \dot{\psi} \\ d_1 \dot{\psi}^2 \\ g \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^2 \dot{V}_{C_2} = \begin{bmatrix} -gs\theta \\ -gc\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^3 \dot{V}_{C_3} = \begin{bmatrix} d_3(\dot{\psi}s\theta s\phi + \dot{\theta}c\phi - \dot{\psi}^2 c\theta s\theta c\phi + 2\dot{\psi}\dot{\theta}c\theta s\phi) - gs\theta c\phi \\ d_3(\dot{\psi}s\theta c\phi - \dot{\theta}s\phi + \dot{\psi}^2 c\theta s\theta s\phi + 2\dot{\psi}\dot{\theta}c\theta c\phi) + gs\theta s\phi \\ -d_3\dot{\psi}^2 s^2\theta - d_3\dot{\theta}^2 + gc\theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

در ادامه، ابتدا با استفاده از روابط نیوتون-اولر، نیرو و گشتاور اینرسی وارد بر مرکز جرم هر قاب را محاسبه نموده و سپس با استفاده از تعادل نیرو و گشتاور برای هر قاب، گشتاورهای مفصلی را بدست می‌آید. بر اساس الگوریتم تکرار درونی نیوتن-اولر، از لینک آخر شروع کرده و به سمت زمین حرکت می‌کنیم. شکل (۶) نمودار جسم آزاد لینک $\{i\}$ ام یک بازوی ربات مفصلی را در حالت کلی نشان می‌دهد. در این شکل، f_i بیانگر نیروی وارد شده از لینک $\{i-1\}$ به لینک $\{i\}$ ، n_i بیانگر گشتاور وارد شده از لینک $\{i-1\}$ به لینک $\{i\}$ ، F_i بیانگر نیروی اینرسی لینک $\{i\}$ و N_i بیانگر گشتاور اینرسی لینک $\{i\}$ است. با توجه به شکل (۶)، رابطه تعادل نیرو و گشتاور مطابق با روابط (۱۷) و (۱۸) است:

$${}^i f_i = {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1} + {}^i F_i \quad (17)$$

در روابط (۳۱) و (۳۲)، L اندوکتانس سیم پیچ موتور، R مقاومت سیم پیچ موتور، ω سرعت خروجی محور موتور، i جریان موتور، V_M ولتاژ اعمالی به موتور، K_e ثابت $BEMF$ ، K_t ثابت گشتاور و T_M گشتاور روی محور خروجی موتور است. از طرف دیگر، گشتاور روی محور موتور از رابطه (۳۳) نیز قابل محاسبه است:

$$T_M = I_M \dot{\omega} + b_M \omega + \frac{T_G}{N} \quad (33)$$

در رابطه (۳۳)، I_M ممان اینرسی محور موتور، b_M ضریب اصطکاک ویسکوز روی محور موتور، T_G گشتاور روی محور گیربکس و N نسبت تبدیل گیربکس است. با تلفیق روابط (۳۲) و (۳۳) می توان گشتاور خروجی محور گیربکس را به محور موتور انتقال داد و سپس با استفاده از رابطه (۳۱)، رابطه ای بین ورودی V و خروجی زاویه موتور بدست آورد. عملگرهای مورد استفاده در هر سه محور شبیه ساز حرکت سه درجه آزادی مورد بحث، موتور گیربکس دی سی است. بنابراین با استفاده از (۳۱)، (۳۲) و (۳۳) و اضافه کردن اثرات اصطکاک و عدم قطعیت، معادلات الکترومکانیکی حاکم به صورت (۳۴) است:

$$V_M = [V_{M1} \ V_{M2} \ V_{M3}]^T = M(\bar{X})\ddot{\bar{X}} + D(\bar{X})\dot{\bar{X}}\dot{\bar{X}} + E(\bar{X})\dot{\bar{X}}^2 + B(\dot{\bar{X}}) + G(\bar{X}) + V_D \quad (34)$$

در رابطه (۳۴)، V_D بردار شامل جمله های اصطکاک، ناحیه مرده عملگرها و اغتشاش است. بردار V_M شامل ولتاژهای اعمالی به سه عملگر است و بقیه بردارها و پارامترها به صورت زیر می باشد:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \psi \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix}, \dot{\bar{X}} = \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, \ddot{\bar{X}} = \begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix}, \dot{\bar{X}}\dot{\bar{X}} = \begin{bmatrix} \dot{\psi}\dot{\theta} \\ \dot{\psi}\dot{\phi} \\ \dot{\theta}\dot{\phi} \end{bmatrix}, \dot{\bar{X}}^2 =$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}^2 \\ \dot{\theta}^2 \\ \dot{\phi}^2 \end{bmatrix}, M(\bar{X}) = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & M_{13} \\ 0 & M_{22} & 0 \\ M_{31} & 0 & M_{33} \end{bmatrix}$$

$$D(\bar{X}) = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & D_{13} \\ 0 & D_{22} & 0 \\ D_{31} & 0 & 0 \end{bmatrix}, E(\bar{X}) =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ E_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B(\dot{\bar{X}}) = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}, G(\bar{X}) = \begin{bmatrix} 0 \\ G_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$M_{11} = \frac{R}{K_t} \left(NI_M + \frac{I_{zz1} + I_{xx2} + I_{yy3} + m_1 d_1^2 + m_3 d_3^2 s^2 \theta + (I_{yy2} - I_{xx2} - I_{yy3} + I_{zz3}) c^2 \theta}{N} \right)$$

$$M_{13} = \frac{RI_{zz3}}{K_t N} c \theta, M_{22} = \frac{R}{K_t} \left(NI_M + \frac{I_{xx3} + I_{zz2} + m_3 d_3^2}{N} \right), M_{31} = \frac{RI_{zz3}}{K_t N} c \theta, M_{33} = \frac{R}{K_t} \left(NI_M + \frac{I_{zz3}}{N} \right)$$

تعداد نیرویی و گشتاوری برای قاب دوم مطابق با روابط (۲۵) و (۲۶) می باشد:

$${}^2f_2 = {}^2_3R \ {}^3f_3 + {}^2F_2 \quad (25)$$

$${}^2n_2 = {}^2_3R \ {}^3n_3 + {}^2P_{C_2} \times {}^2F_2 + {}^2N_2 \quad (26)$$

گشتاوری که باید توسط عملگر محور فراز ایجاد شود برابر با سطر سوم بردار 2n_2 است:

$$T_p = (I_{xx3} + I_{zz2} + m_3 d_3^2) \ddot{\theta} + I_{zz2} \dot{\psi} \dot{\phi} s \theta + \frac{1}{2} (I_{yy2} - I_{xx2} + I_{zz3} - I_{yy3} - m_3 d_3^2) \dot{\psi}^2 s^2 \theta - m_3 d_3 g s \theta \quad (27)$$

تعداد نیرویی و گشتاوری برای قاب اول مطابق با روابط (۲۸) و (۲۹) می باشد:

$${}^1f_1 = {}^1_2R \ {}^2f_2 + {}^1F_1 \quad (28)$$

$${}^1n_1 = {}^1_2R \ {}^2n_2 + {}^1P_{C_1} \times {}^1F_1 + {}^1N_1 \quad (29)$$

گشتاوری که باید توسط عملگر محور سمت ایجاد شود برابر با سطر سوم بردار 1n_1 است:

$$T_y = [I_{zz1} + I_{xx2} + I_{yy3} + m_1 d_1^2 + m_3 d_3^2 s^2 \theta + (I_{yy2} - I_{xx2} - I_{yy3} + I_{zz3}) c^2 \theta] \ddot{\psi} + I_{zz3} \dot{\phi} c \theta + (I_{xx2} - I_{yy2} + I_{yy3} - I_{zz3} + m_3 d_3^2) \dot{\psi} \dot{\theta} s^2 \theta - I_{zz3} \dot{\theta} \dot{\phi} s \theta \quad (30)$$

روابط (۲۴)، (۲۷) و (۳۰) مجموعه معادلات دینامیکی حاکم بر شبیه ساز حرکت سه درجه آزادی هستند.

۴- مدل سازی الکترومکانیکی

مجموعه معادلات الکترومکانیکی حاکم بر یک موتور جریان مستقیم مغناطیس دائم به صورت روابط (۳۱) و (۳۲) است:

$$V_M = L \frac{di}{dt} + K_e \omega + Ri \quad (31)$$

$$T_M = K_t i \quad (32)$$

۵- طراحی کنترلر

بردار حالت مطلوب X_d مطابق (۴۳) و بردار خطا \tilde{X} مطابق (۴۴) است. هدف آن است تا بردار حالت X ، بردار حالت مطلوب X_d را دنبال کند.

$$X_d^T = [\psi_d \ \dot{\psi}_d \ \theta_d \ \dot{\theta}_d \ \phi_d \ \dot{\phi}_d] \quad (43)$$

$$\tilde{X}^T = (X - X_d)^T = [\tilde{\psi} \ \dot{\tilde{\psi}} \ \tilde{\theta} \ \dot{\tilde{\theta}} \ \tilde{\phi} \ \dot{\tilde{\phi}}] \quad (44)$$

سطوح لغزش سه گانه به صورت (۴۵) تا (۴۷) تعریف می شود:

$$s_1 = \tilde{\psi} - \psi_d + \lambda_1 \tilde{\psi} \ , \ \lambda_1 > 0 \quad (45)$$

$$s_2 = \dot{\tilde{\theta}} - \dot{\theta}_d + \lambda_1 \tilde{\theta} \ , \ \lambda_2 > 0 \quad (46)$$

$$s_3 = \tilde{\phi} - \phi_d + \lambda_1 \tilde{\phi} \ , \ \lambda_3 > 0 \quad (47)$$

در نهایت، فرم کلی سیگنال کنترل مد لغزشی مطابق با روابط (۴۸) و (۴۹) است:

$$\begin{bmatrix} V_{M1} \\ V_{M3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{33} & -\hat{h}_{13} \\ \hat{h}_{11}\hat{h}_{33} - \hat{h}_{13}\hat{h}_{31} & \hat{h}_{11}\hat{h}_{33} - \hat{h}_{13}\hat{h}_{31} \\ -\hat{h}_{31} & \hat{h}_{11} \\ \hat{h}_{11}\hat{h}_{33} - \hat{h}_{13}\hat{h}_{31} & \hat{h}_{11}\hat{h}_{33} - \hat{h}_{13}\hat{h}_{31} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} -\hat{f}_1 \\ -\hat{f}_3 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\tilde{\psi}}_d \\ \dot{\tilde{\phi}}_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda_1 \dot{\tilde{\psi}} \\ \lambda_3 \dot{\tilde{\phi}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1 \text{sat} \left(\frac{s_1}{p_1} \right) \\ k_3 \text{sat} \left(\frac{s_3}{p_3} \right) \end{bmatrix} \ , \ p_1, p_3 > 0 > 0 > 0 \quad (48)$$

$$V_{M2} = \frac{1}{\hat{h}_{22}} \left(-\hat{f}_2 + \dot{\theta}_d - \lambda_2 \dot{\tilde{\theta}} - k_2 \text{sat} \left(\frac{s_2}{p_2} \right) \right) \ , \ p_2 > 0 \quad (49)$$

در روابط (۴۸) و (۴۹)، ضرایب k_1 و k_2 و k_3 باید به نحوی انتخاب شوند تا سطوح لغزش جاذب باشند. شرط جاذب بودن سطوح لغزش مطابق رابطه (۵۰) است:

$$s_i \dot{s}_i \leq -\eta_i |s_i| \ , \ i = 1, 2, 3 \ , \ \eta_i > 0 \quad (50)$$

با انتخاب ضرایب k_1 و k_2 و k_3 مطابق با روابط (۵۱) و (۵۲)، دستگاه نامعادلات (۵۰) برقرار می گردد:

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_3 \end{bmatrix} = \alpha^{-1} \begin{bmatrix} F_1 + L_{11}A_1 + L_{13}A_3 + \eta_1 \\ 1 - L_{11} \\ F_3 + L_{31}A_1 + L_{33}A_3 + \eta_3 \\ 1 - L_{33} \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$k_2 = \beta(F_2 + \eta_2) + (\beta - 1) \left| \hat{f}_2 - \dot{\theta}_d + \lambda_2 \dot{\tilde{\theta}} \right| \quad (52)$$

$$D_{11} = \frac{R}{K_t N} (I_{xx2} - I_{yy2} + I_{yy3} - I_{zz3} + m_3 d_3^2) s_2 \theta \ ,$$

$$D_{13} = -\frac{R I_{zz3}}{K_t N} s \theta$$

$$D_{22} = \frac{R I_{zz3}}{K_t N} \ , \ D_{31} = -\frac{R I_{zz3}}{K_t N} s \theta \ , \ E_{21} =$$

$$\frac{R}{2K_t N} (I_{yy2} - I_{xx2} - I_{yy3} + I_{zz3} - m_3 d_3^2) s_2 \theta$$

$$G_2 = -\frac{R}{K_t N} m_3 d_3 g s \theta \ , \ B_1 = (b_1 + N K_e) \dot{\psi} \ , \ B_2 = (b_2 + N K_e) \dot{\theta} \ , \ B_3 = (b_3 + N K_e) \dot{\phi}$$

در نهایت، فرم فضای حالت معادلات الکترومکانیکی حاکم مطابق (۳۵) است:

$$\dot{\tilde{X}} = f(X) + H(X) V_M \quad (35)$$

در رابطه (۳۵)، f و H مطابق (۳۶) است:

$$\begin{aligned} X^T &= [\psi \ \dot{\psi} \ \theta \ \dot{\theta} \ \phi \ \dot{\phi}] \\ f(X) &= -M^{-1} [D \dot{\tilde{X}} \dot{\tilde{X}} + E \dot{\tilde{X}}^2 + B + G + V_D] \\ &= [f_1 \ f_2 \ f_3]^T \end{aligned} \quad (36)$$

$$H(X) = M^{-1} = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & h_{13} \\ 0 & h_{22} & 0 \\ h_{31} & 0 & h_{33} \end{bmatrix}$$

برای معرفی عدم قطعیت‌ها و استفاده از آنها در طراحی کنترلر، حدود بالا و پایین هر پارامتر را مشخص نموده و بر این اساس، حداکثر خطاهای ممکن محاسبه می شود. تقریب بردار f و باند بالای بردار f :

$$\hat{f} = \begin{bmatrix} \hat{f}_1 \\ \hat{f}_2 \\ \hat{f}_3 \end{bmatrix} \ , \ F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (37)$$

تقریب ماتریس H :

$$H = \begin{bmatrix} \hat{h}_{11} & 0 & \hat{h}_{13} \\ 0 & \hat{h}_{22} & 0 \\ \hat{h}_{31} & 0 & \hat{h}_{33} \end{bmatrix} \quad (38)$$

ماتریس L :

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{13} \\ L_{31} & L_{33} \end{bmatrix} \quad (39)$$

ماتریس Δ :

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{13} \\ \Delta_{31} & \Delta_{33} \end{bmatrix} < L \quad (40)$$

ضریب β :

$$\beta = \sqrt{\frac{h_{22\max}}{h_{22\min}}} \quad (41)$$

عدم قطعیت‌های المان‌های ماتریس H :

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{13} \\ h_{31} & h_{33} \end{bmatrix} = (I + \Delta) \begin{bmatrix} \hat{h}_{11} & \hat{h}_{13} \\ \hat{h}_{31} & \hat{h}_{33} \end{bmatrix} \ , \ \beta^{-1} < \frac{\hat{h}_{22}}{h_{22}} < \beta \quad (42)$$

با استفاده از سه سیستم فازی مطابق با مطالب بیان شده برای سه درجه آزادی سیستم، ضرایب p_1 و p_2 و p_3 موجود در معادلات (۴۸) و (۴۹) با زمان تغییر پیدا می‌کنند.

۶- شبیه‌سازی و بررسی نتایج

پارامترهای تقریبی ربات شبیه‌ساز حرکت سه درجه آزادی، پس از انجام آزمون شناسایی سیستم به صورت روابط (۵۴) بدست آمده اند (تمامی واحدها در سیستم واحدهای SI هستند):

$$\begin{aligned} \hat{I}_{xx_1} &= 0.15, \hat{I}_{yy_1} = 0.2, \hat{I}_{zz_1} = 0.56, \hat{m}_1 = 4 \\ \hat{I}_{xx_2} &= 0.03, \hat{I}_{yy_2} = 0.023, \hat{I}_{zz_2} = \\ &0.011, \hat{m}_2 = 2.5 \\ \hat{I}_{xx_3} &= 0.005, \hat{I}_{yy_3} = 0.005, \hat{I}_{zz_3} = \\ &0.01, \hat{m}_3 = 1.5 \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \hat{d}_1 &= 0.04, \hat{d}_2 = 0.075, \hat{d}_3 = 0.08, N = 49 \\ \hat{I}_m &= 0.0001 \\ g &= 9.8, \hat{R} = 1.85, \hat{K}_t = 0.033, \hat{K}_e = 0.033 \\ \hat{b}_1 &= 0.19, \hat{b}_2 = 0.23, \hat{b}_3 = 0.17 \end{aligned}$$

از آنجا که یکی از اهداف این پژوهش، بررسی مقاوم بودن کنترلر نسبت به عدم قطعیت‌ها و عدم دقت در مدل‌سازی است، برخی پارامترها در محیط شبیه‌سازی متفاوت با پارامترهای بدست آمده از شناسایی سیستم در نظر گرفته می‌شود. برخی دیگر از پارامترها (مانند نسبت تبدیل گیربکس) ثابت هستند و عدم قطعیتی در آنها وجود ندارد. پارامترهای سیستم در شبیه‌سازی مطابق با (۵۵) است (واحدها در سیستم واحدهای SI هستند):

$$\begin{aligned} I_{xx_1} &= 0.18, I_{yy_1} = 0.2, I_{zz_1} = 0.6, m_1 = 4 \\ I_{xx_2} &= 0.04, I_{yy_2} = 0.03, I_{zz_2} = 0.015 \\ m_2 &= 2.5 \\ I_{xx_3} &= 0.008, I_{yy_3} = 0.006 \\ I_{zz_3} &= 0.018, m_3 = 4 \\ d_1 &= 0.04, d_2 = 0.075, d_3 = 0.08 \\ N &= 49, I_m = 0.0001 \\ g &= 9.8 \frac{m}{s^2}, R = 2 \\ K_t &= 0.033, K_e = 0.033 \\ b_1 &= 0.25, b_2 = 0.25, b_3 = 0.25 \end{aligned} \quad (55)$$

پارامترهای در نظر گرفته شده برای کنترلر در شبیه‌سازی عبارتند از:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 8, \eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = 1 \quad (56)$$

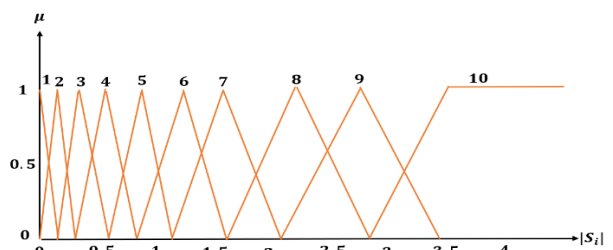
سایر پارامترهای استفاده شده در کنترلر، مانند خواص جرمی پلنت و ... همان مقادیر تقریبی بدست آمده (روابط (۵۴)) هستند. شکل‌های (۹) الی (۱۴) تعقیب زاویه مطلوب توسط هر محور در یک سناریوی شبیه‌سازی با ورودی سینوسی به هر سه محور را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که هر سه محور توانسته‌اند فرمان‌های مطلوب زاویه و سرعت زاویه‌ای را به خوبی دنبال کنند.

در روابط (۵۱) و (۵۲)، α و A_1 و A_3 بصورت زیر تعریف می‌شوند:

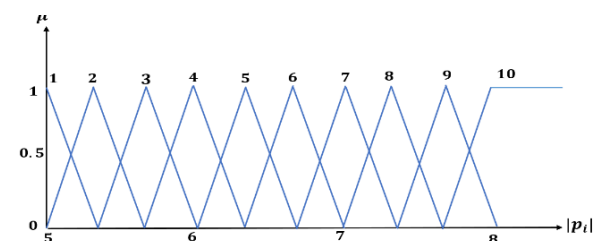
$$\alpha = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{L_{13}}{1-L_{11}} \\ -\frac{L_{31}}{1-L_{33}} & 1 \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= \left| -\hat{f}_1 + \hat{\psi}_d - \lambda_1 \hat{\psi} \right|, A_3 \\ &= \left| -\hat{f}_3 + \hat{\phi}_d - \lambda_3 \hat{\phi} \right| \end{aligned}$$

سیگنال‌های کنترل اعمالی به سیستم مطابق با روابط (۴۸) و (۴۹) می‌باشند. در تولید این سیگنال‌ها، عامل $sat(\frac{\hat{x}_i}{p_i})$ نقش دارد. هر چه p_i بزرگتر باشد، لرزش کنترلی کاهش، ولی خطای حالت ماندگار افزایش می‌یابد. در مقابل، هر چه p_i کوچکتر باشد، تابع اشباع به تابع علامت میل کرده و لرزش کنترلی افزایش، ولی خطای حالت ماندگار کاهش می‌یابد. برای ایجاد تعادل بین پدیده لرزش کنترلی و خطای ماندگار، می‌توان از یک p_i دینامیک استفاده نمود، بدین صورت که p_i بر اساس حالت‌های سیستم، در طول زمان تغییر کند. بدین منظور، وظیفه تعیین p_i در طول عملکرد شبیه‌ساز حرکت را به یک سیستم فازی می‌سپاریم. با انجام سعی و خطا، بهترین سیستم فازی با فازی ساز منفرد، موتور استنتاج حاصلضرب، فازی زدای میانگین مراکز طراحی می‌شود. ورودی سیستم فازی $|s_i|$ و خروجی آن p_i است. توابع عضویت روی محور ورودی مطابق با شکل (۷) و توابع عضویت روی محور خروجی مطابق با شکل (۸) است:



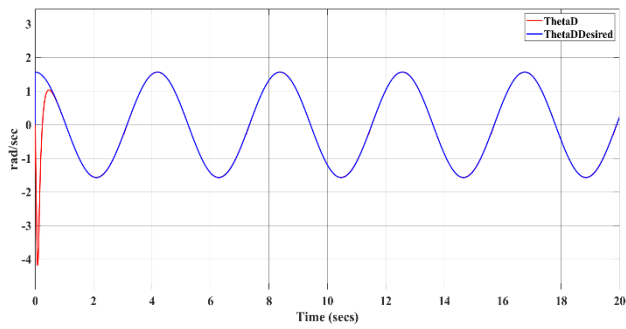
شکل ۷ توابع عضویت روی محور ورودی $|s_i|$ به منظور فازی کردن سطوح لغزش (برای هر سه درجه آزادی یکسان است)



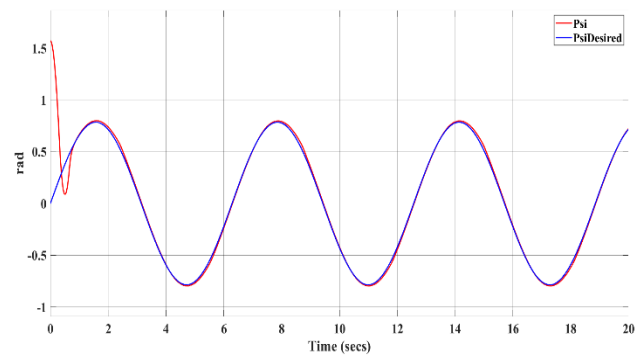
شکل ۸ توابع عضویت روی محور خروجی p_i به منظور فازی کردن سطوح لغزش (برای هر سه درجه آزادی یکسان است)

بر اساس شکل‌های (۷) و (۸)، مجموعه قوانین سیستم فازی مطابق زیر است:

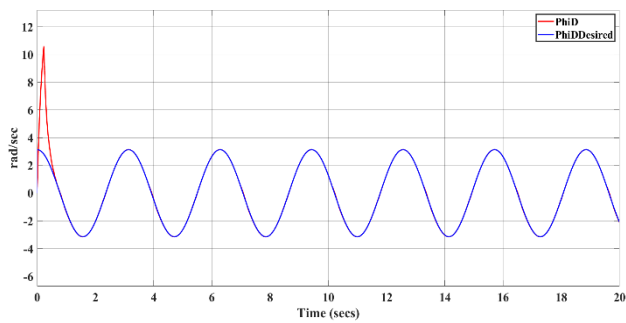
$$\text{Rule: IF } |s_i| \text{ is } \{j\} \text{ THEN } p_i \text{ is } \{j\}, i = 1,2,3, j = 1,2, \dots, 10$$



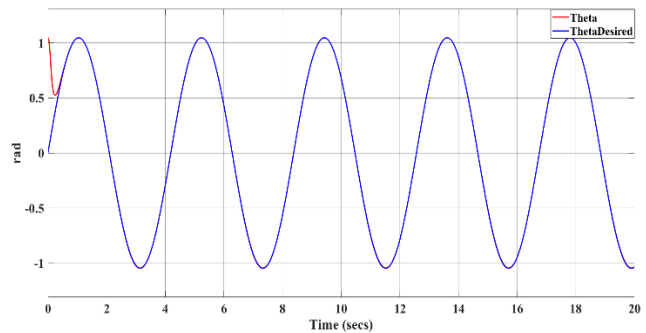
شکل ۱۳ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور فراز ($\dot{\theta}_d$) توسط محور فراز ($\dot{\theta}$) در سناریوی شبیه‌سازی



شکل ۹ تعقیب زاویه فرمان سمت (ψ_d) توسط محور سمت (ψ) در سناریوی شبیه‌سازی



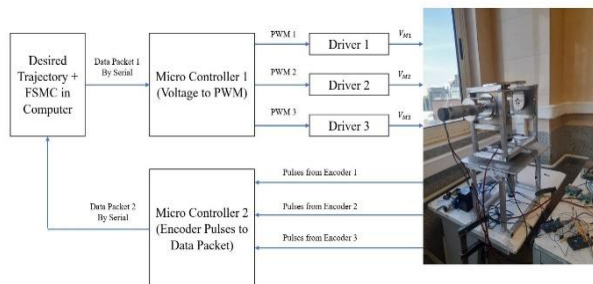
شکل ۱۴ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور چرخش ($\dot{\phi}_d$) توسط محور چرخش ($\dot{\phi}$) در سناریوی شبیه‌سازی



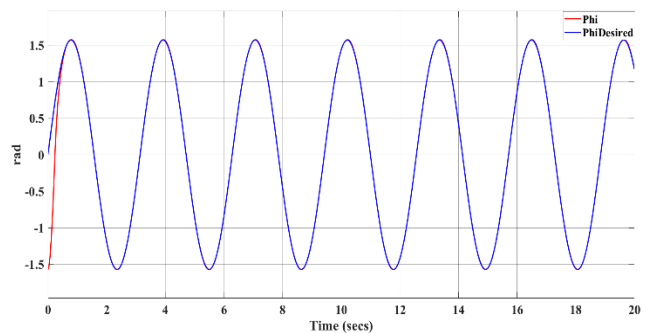
شکل ۱۰ تعقیب زاویه فرمان محور فراز (θ_d) توسط محور فراز (θ) در سناریوی شبیه‌سازی

۷- پیاده‌سازی، اصلاح کنترلر و بررسی نتایج

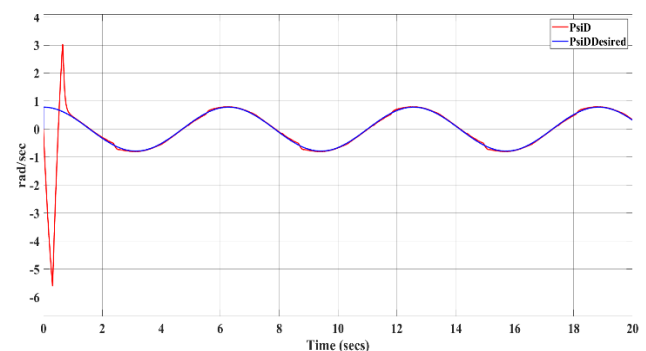
پیاده‌سازی سیستم کنترل بر اساس مراحل روش طراحی مبتنی بر مدل صورت گرفته است [۱۷]. مزیت این کار، انجام اصلاحات لازم و عیب‌یابی سیستم کنترل به صورت مرحله به مرحله است. گام اول، نمونه‌سازی سریع سامانه کنترل (RCP^1) است. هدف از نمونه‌سازی سریع سیستم کنترل، بررسی توانایی سیستم کنترل طراحی شده در کنترل سیستم واقعی و اعتبار سنجی آن است. در این مرحله، سیستم کنترل داخل کامپیوتر، شبیه‌ساز حرکت واقعی را کنترل می‌کند. شماتیک ساختار پیاده‌سازی شده در این مرحله مطابق شکل (۱۵) است:



شکل ۱۵ شماتیک تست RCP (نمونه‌سازی سریع سامانه کنترل). سیستم کنترل داخل کامپیوتر، پلنت اصلی را کنترل می‌کند.



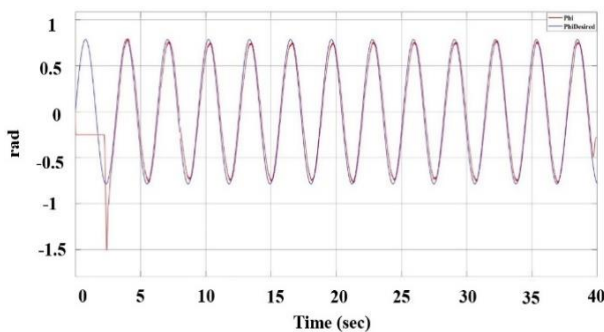
شکل ۱۱ تعقیب زاویه فرمان چرخش (ϕ_d) توسط محور چرخش (ϕ) در سناریوی شبیه‌سازی



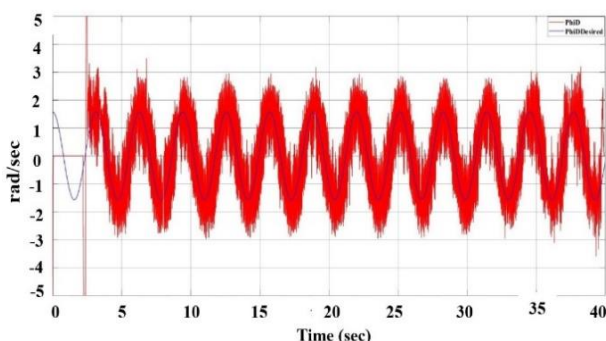
شکل ۱۲ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور سمت ($\dot{\psi}_d$) توسط محور سمت ($\dot{\psi}$) در سناریوی شبیه‌سازی

¹ Rapid Control Prototyping

اینگونه نیست و صرفاً توانایی اعمال یک سری ورودی‌ها وجود دارد و به مقادیر بین آنها دسترسی نیست. بدیهی است هرچه رزولوشن پایه‌های میکروکنترلر بالاتر باشد، هم لرزش کنترلی کمتر شده و هم دقت سیستم کنترل بالاتر خواهد رفت، اما در کار حاضر، به میکروکنترلری با رزولوشن بیشتر کاربرد دسترسی نبوده است. بنابراین باید با امکانات موجود کار کرده و با روش‌های دیگر، می‌توان پدیده لرزش را تا حد مطلوبی از بین برد. برای حل مشکل، یک سیستم فازی دیگر به سیستم کنترل طراحی شده در بخش قبل اضافه می‌گردد. ایده اصلی، تعیین حد اشباع عملگرها متناسب با فاصله حالت‌های سیستم از سطوح لغزش است. هنگامیکه حالت سیستم از سطح لغزش دور است، حدود اشباع عملگرها همان حد اشباع اصلی آنها یعنی ۲۴ ولت است، اما هر چه به سطح لغزش نزدیکتر شویم، سیستم فازی حد بالا و پایین اشباع را کاهش می‌دهد. بنابراین در نزدیکی سطح لغزش، عملگر نمی‌تواند سیگنال‌های کنترلی خیلی قوی اعمال کند و لرزش کمتر خواهد شد. با انجام سعی و خطا، بهترین سیستم فازی با فازی ساز منفرد، موتور استنتاج حاصلضرب، فازی زدای میانگین مراکز و بر اساس مفهوم کلی ذکر شده طراحی می‌شود. ورودی سیستم فازی $|s_i|$ و خروجی آن ولتاژ اشباع عملگر است.



شکل ۱۶ تعقیب زاویه فرمان چرخش (ϕ_d) توسط محور چرخش (ϕ) در یک سناریو پیاده‌سازی سه محوره



شکل ۱۷ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور چرخش ($\dot{\phi}_d$) توسط محور چرخش ($\dot{\phi}$) در یک سناریو پیاده‌سازی سه محوره. لرزش کنترلی در محور چرخش کاملاً مشهود است.

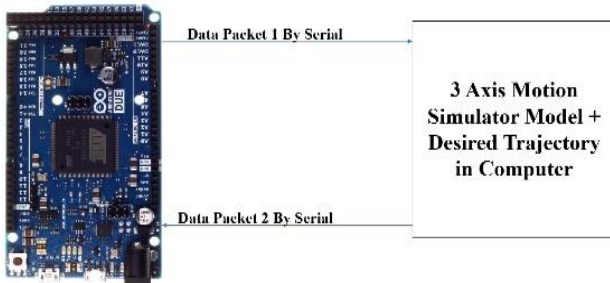
با توجه به شکل (۱۵)، کامپیوتر در هر گام کنترلی و به صورت زمان حقیقی، داده زاویه سه محور را در قالب یک بسته داده (بسته داده ۲) از خروجی سریال دریافت کرده و اگر داده درست بود، بر اساس داده دریافتی و فرمان‌های مطلوب، با انجام الگوریتم کنترل، ولتاژهای کنترلی سه گانه را محاسبه نموده و سیگنال‌های کنترل را در قالب یک بسته داده، روی خروجی پورت سریال کامپیوتر قرار می‌دهد. در این آزمایش، از دو میکروکنترلر واسط استفاده شده است. کنترل عملگرها به وسیله سیگنال PWM^۱ صورت می‌گیرد، این در حالی است که کامپیوتر توانایی تولید سیگنال PWM ندارد و فقط می‌تواند به صورت سریال داده دریافت کند یا داده بفرستد. میکروکنترلر ۱، وظیفه دریافت فرمان کنترلی از کامپیوتر و تبدیل آن به سیگنال‌های PWM مناسب را دارد. زاویه هر محور توسط انکودر افزایشی متصل به آن محور محاسبه می‌شود. خروجی انکودرها، دو پالس دارای اختلاف فاز هستند که با رمزگشایی پالس‌ها، می‌توان زاویه محورها را مشخص نمود. برای خواندن پالس‌های خروجی انکودرها سه گانه و تبدیل آن به یک بسته داده برای کامپیوتر، از میکروکنترلر شماره ۲ استفاده شده است. این میکروکنترلر با توجه به پالس‌های انکودرها و انجام محاسبات، در هر گام کنترلی، زوایای سه گانه را در قالب یک بسته داده (بسته داده شماره ۲) به کامپیوتر می‌فرستد. با نمونه‌سازی سریع سیستم کنترل بر اساس کنترل طراحی شده در بخش گذشته، مشاهده شد که سیستم می‌تواند زوایای سه گانه را به خوبی دنبال کند اما در این حالت، وجود لرزش در هنگام کارکرد سیستم مشهود است. با بررسی نمودارها، مشاهده می‌شود که لرزش، اثر خود را بیشتر در نمودار سرعت زاویه‌ای محورها نشان می‌دهد. به عنوان نمونه، نتایج خروجی محور چرخش در یک سناریو شبیه‌سازی حرکت سه محوره توسط شبیه‌ساز مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۱۶) تعقیب زاویه مطلوب محور چرخش و شکل (۱۷)، تعقیب سرعت زاویه‌ای مطلوب محور چرخش را نشان می‌دهد.

مطابق شکل‌های (۱۶) و (۱۷)، مشاهده می‌شود که محور چرخش توانسته زاویه مطلوب را به خوبی دنبال کند، اما پدیده لرزش در نمودار سرعت زاویه‌ای به وضوح قابل مشاهده است. در این حالت سوالی که به وجود می‌آید آن است که چرا در بخش شبیه‌سازی، لرزش از بین رفت اما هنگام پیاده‌سازی، لرزش همچنان وجود دارد؟ این موضوع دو علت اصلی دارد. عامل اول، نویزی بودن داده‌های سنسوری است و از آنجا که سیستم کنترل بر اساس داده‌های سنسور تصمیم می‌گیرد، این موضوع در لرزش اهمیت می‌یابد.

عامل دوم و مهمترین عامل در مسئله، رزولوشن خروجی پایه‌های میکروکنترلر است. در هنگام شبیه‌سازی، سیستم کنترل هر سیگنالی که تولید کند، قابل اعمال است، اما در واقعیت

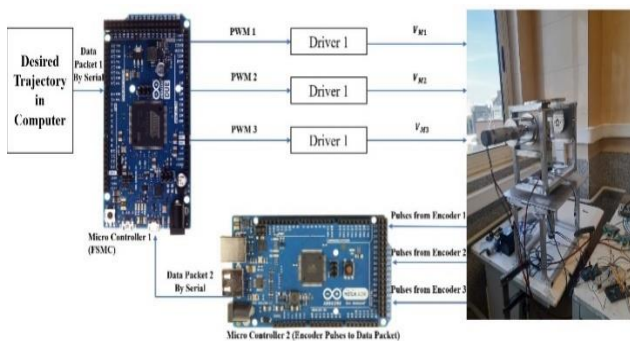
¹ Pulse Width Modulation

آزمایش سخت افزار در حلقه مورد بررسی قرار می گیرد. در این مرحله، الگوریتم کنترل داخل میکروکنترلر، وظیفه کنترل مدل سیستم داخل کامپیوتر را بر عهده دارد. شماتیک تست سخت افزار در حلقه کنترلر مطابق با شکل (۲۱) است:



شکل ۲۱ شماتیک تست سخت افزار در حلقه کنترلر

با انجام تست سخت افزار در حلقه و اطمینان از قابلیت میکروکنترلر در پیاده سازی زمان حقیقی الگوریتم کنترلی، نوبت به پیاده سازی نهایی می رسد. شکل (۲۲) شماتیک پیاده سازی نهایی را نشان می دهد:

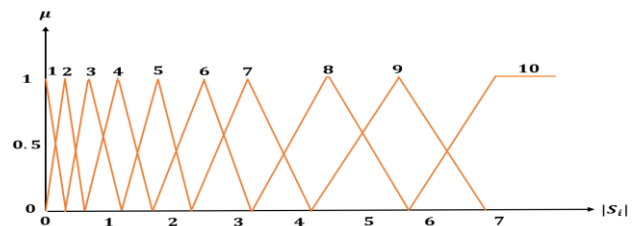


شکل ۲۲ شماتیک پیاده سازی نهایی

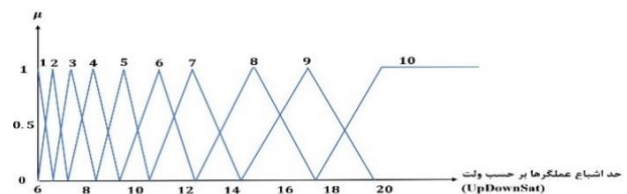
مطابق با شکل (۲۲)، وظیفه کنترل سیستم بر عهده میکروکنترلر ۱ و وظیفه رمزگشایی پالس های انکودرها بر عهده میکروکنترلر شماره ۲ است. در هنگام شروع به کار ربات، قابها به آرامی در جهت ساعتگرد حرکت می کنند تا به مکان اولیه خود برسند. با رسیدن هر قاب به مکان اولیه خود، سنسور مربوط به آن قاب یک سیگنال برای کنترلر صادر می کند و سپس هر سه قاب کنترلر آماده اجرای فرامین است. در هر گام کنترلی (۴ میلی ثانیه)، میکروکنترلر ۱ مقادیر فرمان مطلوب را از کامپیوتر و مقادیر زوایای سه گانه را از میکروکنترلر شماره ۲ دریافت می کند. سپس کنترلر، با انجام پردازش کنترلی، سیگنال های کنترل مناسب را صادر می کند.

شکل های (۲۳) الی (۲۸)، نتایج پیاده سازی سیستم کنترل در یک سناریوی حرکت سه محوره را نشان می دهند. مشاهده می شود متغیرهای حالت سیستم توانسته اند به خوبی فرمان های مطلوب را دنبال کنند.

توابع عضویت روی محور ورودی مطابق با شکل (۱۸) و توابع عضویت روی محور خروجی مطابق با شکل (۱۹) است.



شکل ۱۸ توابع عضویت روی محور ورودی $|S_i|$ به منظور فازی کردن حد اشباع عملگرهای هر سه محور

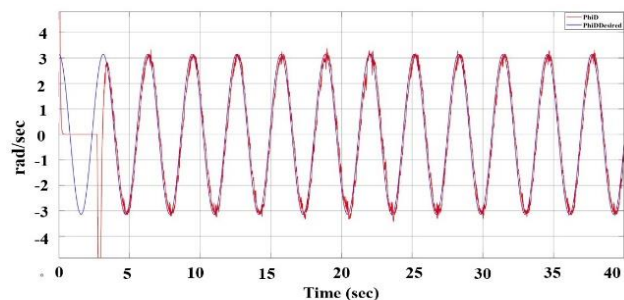


شکل ۱۹ توابع عضویت روی محور خروجی حدود اشباع به منظور فازی کردن حد اشباع عملگرهای هر سه محور

بر اساس شکل های (۱۸) و (۱۹)، مجموعه قوانین سیستم فازی مطابق زیر است:

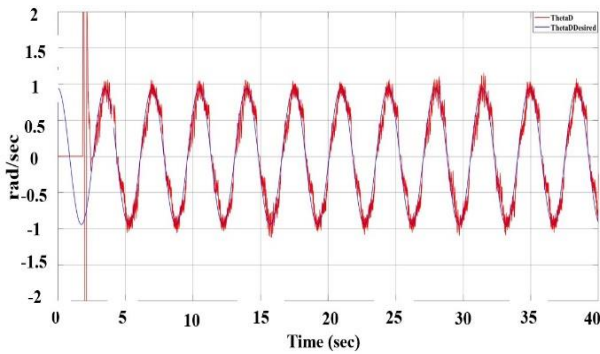
$$\text{Rulej: IF } |s_i| \text{ is } \{j\} \text{ THEN UpDownSat}_i \text{ is } \{j\}, i = 1,2,3, j = 1,2, \dots, 10$$

شکل (۲۰) تعقیب سرعت زاویه ای محور چرخش را با اضافه کردن سیستم فازی بالا، در یک سناریوی شبیه سازی سه محوره نشان می دهد. مقایسه شکل (۲۰) با شکل (۱۷) نشان می دهد لرزش کنترلی در نمودارهای سرعت بسیار کمتر شده است:

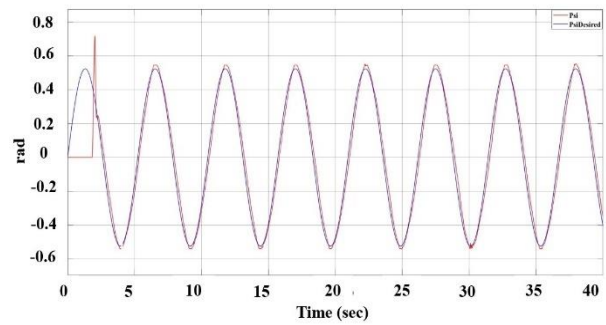


شکل ۲۰ تعقیب سرعت زاویه ای فرمان محور چرخش $(\dot{\phi}_d)$ توسط محور چرخش $(\dot{\phi})$ در تست RCP

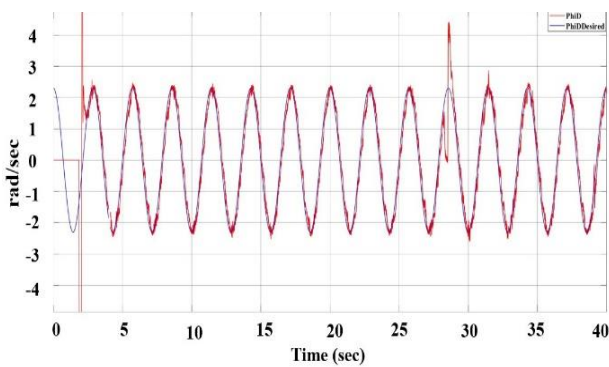
گام بعدی پیاده سازی بر اساس مراحل روش طراحی مبتنی بر مدل، تست سخت افزار در حلقه کنترلر است. برای صحت-سنجی کد تولید شده برای میکروکنترلر توسط کامپیوتر و اطمینان از عملکرد میکروکنترلر در اجرای صحیح الگوریتم کنترلی به صورت زمان حقیقی، عملکرد میکروکنترلر در یک



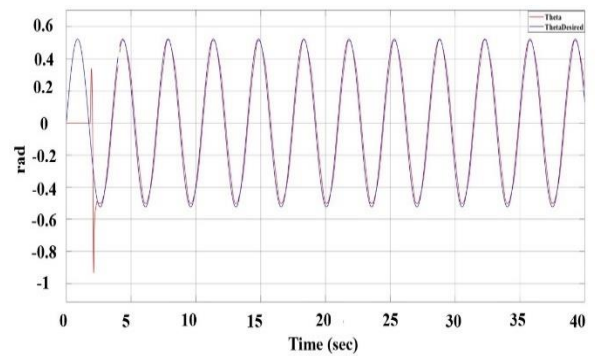
شکل ۲۷ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور فراز ($\dot{\theta}_d$) توسط محور فراز ($\dot{\theta}$) در سناریوی پیاده‌سازی نهایی



شکل ۲۳ تعقیب زاویه فرمان سمت (ψ_d) توسط محور سمت (ψ) در سناریوی پیاده‌سازی نهایی



شکل ۲۸ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور چرخش ($\dot{\phi}_d$) توسط محور چرخش ($\dot{\phi}$) در سناریوی پیاده‌سازی نهایی

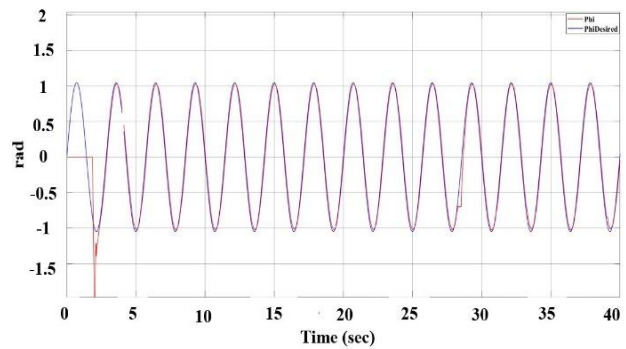


شکل ۲۴ تعقیب زاویه فرمان فراز (θ_d) توسط محور فراز (θ) در سناریوی پیاده‌سازی نهایی

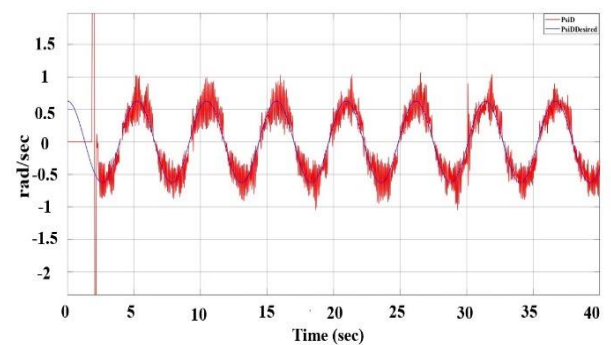
۸- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به طراحی و پیاده‌سازی یک ساختار کنترل مقاوم تطبیقی برای یک شبیه‌ساز حرکت سه درجه آزادی ساخته شده در آزمایشگاه مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های هوشمند دانشگاه صنعتی شریف، برای کاربردهای سخت افزار در حلقه، پرداخته شد. بدین منظور ابتدا سیستم ساخته شده معرفی گردیده و مجموعه معادلات الکترومکانیکی حاکم بر آن استخراج شد. در ادامه، یک کنترلر مد لغزشی با سطح لغزش تطبیقی فازی برای سیستم طراحی شد.

با انجام شبیه‌سازی‌ها، مشاهده شد که سیستم بدون لرزش، می‌تواند مسیر مطلوب را دنبال کند. در مرحله پیاده‌سازی، مشاهده شد که لرزش همچنان وجود دارد. لرزش کنترلی چند علت داشت که مهمترین عامل آن، بحث‌های سخت افزاری است. از آنجاییکه تغییر سخت افزار امکان‌پذیر نبود، سعی شد با انجام تغییراتی در ساختار سیستم کنترل، لرزش بهبود یابد. بدین منظور، یک سیستم فازی برای تعیین حدود اشباع عملگرهای سه گانه سیستم طراحی شد. با اضافه کردن این سیستم فازی، مشاهده شد که عملکرد سیستم به طرز محسوسی بهتر شده است. در انتها نتایج پیاده‌سازی و عملکرد مطلوب کنترلر در دنبال کردن فرمان‌ها مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲۵ تعقیب زاویه فرمان چرخش (ϕ_d) توسط محور چرخش (ϕ) در سناریوی پیاده‌سازی



شکل ۲۶ تعقیب سرعت زاویه‌ای فرمان محور سمت ($\dot{\psi}_d$) توسط محور سمت ($\dot{\psi}$) در سناریوی پیاده‌سازی نهایی

- [9] Y. Xie, D.M. Vilathgamuwa, T. King-Jet, Robust adaptive control of a three-axis motion Simulator with state observers, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 10(4) (2005) 437-448, <https://doi.org/10.1109/TMECH.2005.852499>.
- [10] W. Feng, X. Zhang, Controller Design for Three-Axis Stabilized Platform Using Adaptive Global Fast Terminal Sliding Mode Control with Non-Linear Differentiator, *Energies* 14(20) (2021), <https://doi.org/10.3390/en14206532>.
- [11] H. Saputra, A. Nurhakim, S. Utomo, Position Control of 1-DOF High-Precision Rotary Table using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Controller, *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 7(2), (2019), 511-523, <https://doi.org/10.24003/emitter.v7i2.399>.
- [12] M. Zarei, M. Arvan, A. Vali, F. Behazin, Back-stepping sliding mode control of one degree of freedom flight motion table, *Asian Journal of Control* 22(4) (2020) 1700-1713, <https://doi.org/10.1002/asjc.2085>.
- [13] D. Haibin, W. Daobo, Y. Xiufen, Realization of nonlinear PID with feed-forward controller for 3-DOF flight simulator and hardware-in-the-loop simulation, *Journal of Systems Engineering and Electronics* 19(2) (2008) 342-345, <https://doi.org/10.1002/asjc.2085>.
- [14] C. Yu *et al*, Research on High Precision Permanent Magnet Servo Control System of Airborne Stable Platform, 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, China, 2020, pp. 413-416, <https://doi.org/ITOEC49072.2020.9141862>.
- [15] Xiangyang Liu, Jianliang Mao, Jun Yang, Shihua Li, Kaifeng Yang, Robust predictive visual servoing control for an inertially stabilized platform with uncertain kinematics, *ISA Transactions*, Volume 114, 2021, Pages 347-358, ISSN 0019-0578, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.12.039>.
- [16] Li, B.; Xie, X.; Liao, Y.; Fan, D. Research on High-Precision Dynamic Modeling and Performance Evaluation of Inertially Stabilized Platforms. *Appl. Sci.* 2024, 14, 6074, <https://doi.org/10.3390/app14146074>.
- [17] M. Alras, P. Caspi, A. Girault, P. Raymond, Model-Based Design of Embedded Control Systems by Means of a Synchronous Intermediate Model, 2009 International Conference on Embedded Software and Systems, 2009, pp. 3-10, <https://doi.org/10.1109/ICSS.2009.36>.
- [1] M.C. John, E.W. Kenneth, History of flight motion simulators used for hardware-in-the-loop testing of missile systems, *Proc.SPIE*, 1998, <https://doi.org/10.1117/12.316388>.
- [2] H. Dong, X. Yang, H. Gao and X. Yu, "Practical Terminal Sliding-Mode Control and Its Applications in Servo Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 1, pp. 752-761, Jan. 2023, <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3152018>.
- [3] M. Dorosti, J. Nobari, Kinematic and dynamic analysis of 3-DOF Rotary Table manipulator, *Control and Decision Conference*, 2009, <https://doi.org/10.1109/CCDC.2009.5195224>.
- [4] G. Singh, M.P. Nandakumar, S. Ashok, Adaptive Fuzzy-PID and Neural Network Based Object Tracking Using a 3-Axis Platform, 2016 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH), 2016, pp. 1012-1017, <https://doi.org/10.1109/ICETECH.2016.7569402>.
- [5] X. Zhang, Y. Zhao, K. Guo, G. Li, N. Deng, An Adaptive B-Spline Neural Network and Its Application in Terminal Sliding Mode Control for a Mobile Satcom Antenna Inertially Stabilized Platform, *Sensors* 17(5) (2017), <https://doi.org/10.3390/s17050978>.
- [6] Zunfeng Du, Xiangyu Chen, Qingwei Zhang, Yuan Yang, An extended state observer-based sliding mode control method for hydraulic servo system of marine stabilized platforms, *Ocean Engineering*, Volume 279, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114386>.
- [7] Mingzhe Zhao, Hengxiang He, A method for improving the tracking accuracy of photoelectric stabilized platform, *Proc. SPIE* 13231, 4th International Conference on Laser, Optics, and Optoelectronic Technology (LOPET 2024), 1323123 (16 August 2024), <https://doi.org/10.1117/12.3040304>.
- [8] Y. Xie, M. Vilathgamuwa, K.J. Tseng, N. Nagarajan, Modeling and robust adaptive control of a 3-axis motion simulator, *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248)*, 2001, pp. 553-560 vol.551, <https://doi.org/10.1109/IAS.2001.955475>.