

طراحی، تحلیل و پیاده‌سازی پلتفرم استوارت ۶ درجه آزادی با استفاده از سیستم کنترل سینماتیک معکوس و کنترل کننده PID برای شبیه‌سازی حرکات پیچیده در کاربردهای صنعتی و شبیه‌سازهای پرواز

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

میر ابوالفضل مختاری^۱

۱ دانشیار، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران.

چکیده

در این پژوهش، یک پلتفرم استوارت با ۶ درجه آزادی طراحی و پیاده‌سازی شده است که به دلیل ساختار موازی خود، عملکرد بهتری نسبت به ربات‌های سریال دارد. به منظور تثبیت موقعیت پلتفرم، یک سیستم کنترل سینماتیک معکوس به همراه کنترل کننده‌های PID برای هر پایه طراحی و اجرا گردید. برای یک موقعیت مشخص، طول بازوها از طریق سینماتیک معکوس محاسبه شده و با کمک موتورهای استپر، هر پایه به طول مطلوب می‌رسد. آزمایش‌های عملی نشان داد که کنترل کننده PID قادر است موقعیت مطلوب را در حضور اختلالات متداول مانند نویز الکتریکی یا تغییرات ناگهانی بار با حداکثر خطای ± 0.5 میلی‌متر و ارتعاشات مکانیکی حفظ کند. علاوه بر این، سیستم حرکتی پلتفرم با استفاده از موتورهای استپر عملکردی پایدار با دقت موقعیتیابی ± 0.1 میلی‌متر و زمان پاسخ 0.2 ثانیه در شرایط بار نامی داشته و قادر است حرکات پیچیده‌ای را در شبیه‌سازی‌ها و کاربردهای صنعتی به صورت موثر پیاده‌سازی کند. دقت سیستم با انحراف استاندارد 0.05 میلی‌متر در ۱۰۰ آزمون تکراری تأیید شد و دقت و کارایی کنترل کننده پیشنهادی تأیید شده است.

واژه‌های کلیدی: پلتفرم استوارت، ۶ درجه آزادی، سینماتیک، کنترلر.

۲۱۷

سال ۱۴ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۴

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



Design, analysis and implementation of a 6-degree-of-freedom Stuart platform using an inverse kinematics control system and a PID controller to simulate complex motions in industrial applications and flight simulators

Mirabolfazl Mokhtari¹

1- Associate Professor Faculty of Engineering and Flight, Imam Ali University, Tehran, Iran.

Abstract

In this study, a Stuart platform with 6 degrees of freedom has been designed and implemented, which has better performance than serial robots due to its parallel structure. In order to stabilize the platform position, an inverse kinematics control system with PID controllers was designed and implemented for each leg. For a given position, the length of the arms is calculated through inverse kinematics and with the help of stepper motors, each leg reaches the desired length. Practical experiments showed that the PID controller is able to maintain the desired position in the presence of common disturbances such as electrical noise or sudden load changes with a maximum error of ± 0.5 mm and mechanical vibrations. In addition, the platform motion system using stepper motors has a stable performance with a positioning accuracy of ± 0.1 mm and a response time of 0.2 seconds under nominal load conditions and is able to effectively implement complex movements in simulations and industrial applications. The system accuracy was confirmed with a standard deviation of 0.05 mm in 100 replicate tests, and the accuracy and efficiency of the proposed controller have been verified.

Keywords: Stewart platform, 6 degrees of freedom, kinematics, controlle

پلتفرم استوارت نوعی ربات موازی است که تفاوت های مکانیکی عمده ای نسبت به ربات های لینک سریال معمولی دارد. به طور کلی، دستکاری کننده های پیوند موازی (Manipulators Parallel-Link) به سیستم هایی اطلاق می شوند که از چندین بازوی مکانیکی موازی برای کنترل دقیق موقعیت و جهت گیری استفاده می کنند، دقت بهتر، صلبیت بالاتر، نسبت بار به وزن بیشتر و توزیع بار بیشتری را نسبت به دستکاری کننده های سریال ارائه می کنند، زیرا محرک ها در تقسیم موازی بار مشترک عمل می کنند که توسط [۱] و [۲] توضیح داده شد. دستکاری سکوی استوارت یک مکانیسم ۶ درجه آزادی (DOF) با یک پلت فرم متحرک است که با یک پایه ثابت توسط شش پایه قابل گسترش متصل است. طول پایه های قابل کشش برای رسیدن به شش درجه آزادی حرکت سکو متفاوت است. استفاده عملی از دستکاری سکوی استوارت به طور کلی در زمینه سرعت کم و شرایط بار بزرگ مانند شبیه ساز وسیله نقلیه، پایه حرکت خودروهای کلاسیک، شبیه ساز پرواز، تلسکوپ رادیویی، دستگاه های لمسی، دستگاه های نظارت از راه دور و غیره بوده است که در ارائه شده است [۳] - [۵].

معادله دینامیکی و در نتیجه کنترل سکوی استوارت را می توان در فضای مفصل، به عنوان تابعی از طول، سرعت و شتاب پاها یا در فضای وظیفه (Task Space) که موقعیت و جهت گیری پلتفرم در مختصات دکارتی $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ تعریف می شود. از موقعیت، سرعت و شتاب بردارهای تعمیم یافته حاوی موقعیت دکارتی مرکز سکو ارائه کرد. و جهت گیری آن در رویکرد فضای مشترک، کنترل کننده ها مجموعه ای از سیستم های ورودی تک خروجی (SISO) هستند که فقط با استفاده از اطلاعات هر پایه محرک اجرا می شوند و جفت بین پاها نادیده

گرفته می شوند یا به عنوان اختلال در نظر گرفته می شوند. مزیت این روش این است که اطلاعات محلی مورد نیاز برای بازخورد را می توان به راحتی با استفاده از حسگرهای ساده به دست آورد. این الگوریتم کنترل را می توان با بیشترین سرعت ممکن اجرا کرد و کنترل کننده های SISO را می توان به صورت موازی اجرا کرد همانطور که در [۶] نشان داده شد. با این حال، اجرای کنترل کننده فضای وظیفه شامل اندازه گیری زمان واقعی موقعیت و سرعت است که پیچیده است و به حسگرهای پرهزینه نیاز دارد، بنابراین کاربردهای کنترل کننده فضای وظیفه را در برنامه های بلادرنگ محدود می کند [۷].

بسیاری از مقالات تحقیقاتی در زمینه کنترل موقعیت پلت فرم استوارت با استفاده از کنترل کننده PID معمولی، کنترل کننده حالت کشویی و غیره منتشر می شوند که توضیح داده شد [۸]، [۹]، [۱۰] و [۱۱]، کنترل کننده حالت لغزشی مرتبه بالاتر [۱۲]، کنترل کننده حالت لغزشی انتگرال مبتنی بر الگوریتم ژنتیک [۱۳]، کنترل کننده غیر خطی مقاوم [۱۴] و در فضای مشترک یا فضای وظیفه پیاده سازی می شوند.

کنترلرهای مختلفی برای تثبیت موقعیت پلت فرم استوارت با استفاده از تئوری کنترل حالت لغزشی به اشکال مختلف استفاده می شود. تئوری کنترل حالت لغزشی (SMC) در چهار دهه گذشته به دلیل جذاب ترین ویژگی های آن مانند رد اختلال، تغییر ناپذیری، کاهش سفارش و غیره، در میان جامعه کنترل مورد توجه قرار گرفته است [۱۴] و [۱۵]. [۱۶] نشان داده است که استحکام در برابر اغتشاشات تنها در صورتی حاصل می شود که یک اختلال منطبق باشد. بسیاری از کاربردهای عملی پیاده سازی و عملکرد موفقیت آمیز SMC را گزارش کرده اند، تعداد کمی از آنها در کتاب یافت می شوند [۱۷]. با این حال این طرح کنترل از مشکلاتی مانند محدودیت درجه نسبی و ارتعاشات خطرناک فرکانس



بالا سیستم کنترل شده به نام چتر نشان داده شده در [۱۵] رنج می برد. مشکل پیچ پیچ در کنترل حالت کشویی مانع اصلی برای اعمال آن در سیستم های مکانیکی است.

برای غلبه بر این معایب کنترل حالت لغزشی معمولی، یک رویکرد جدید به نام کنترل حالت لغزشی مرتبه بالاتر (HOSM) پیشنهاد شده است. کنترل کننده های HOSM در گسترش ویژگی های خوب کنترل کننده های حالت لغزشی استاندارد به سیستم هایی با درجه نسبی بالاتر نسبت به متغیر کشویی مؤثر هستند. با حفظ مزایای اصلی SMC استاندارد، همگرایی زمان محدود حاصل می شود و اثر پیچ پیچ کاهش می یابد. در مورد کنترل حالت لغزشی مرتبه r هدف این است که متغیر لغزشی σ و اولین مشتقات متوالی $1 - r$ زمانی آن را صفر نگه داریم. ناظر HOSM همچنین برای بازسازی سرعت ها و اغتشاشات خارجی از اندازه گیری های موقعیت همانطور که در [۵] ذکر شد استفاده می شود.

چندین الگوریتم حالت لغزشی مرتبه دوم برای سیستم های غیرخطی پیشنهاد شده است. از جمله آنها می توان به الگوریتم های پیچشی و فوق پیچشی معروفی اشاره کرد که در [۱۸] ارائه شده است. کنترل کننده چرخشی همگرایی زمان محدود و رد اغتشاش را با عمل کنترل متوقف می کند که منجر به پیچ پیچ می شود. الگوریتم پیچش فوق العاده یک الگوریتم HOSM کاملاً پیوسته است که تمام ویژگی های اصلی SMC مرتبه اول را برای سیستم هایی با اختلال کران منطبق تضمین می کند. جبران اغتشاش منطبق با استفاده از یک کنترل کننده مد لغزشی مرتبه اول بهره ثابت تنها در صورتی امکان پذیر است که حد اغتشاش از قبل مشخص باشد. حالت لغزشی مرتبه اول بهره متغیر که بهره برای آن بر اساس یک مرز واقعی اختلال تغییر می کند، در [۱۹]، [۱۷] معرفی شده است تا میزان دامنه پیچ پیچ کاهش یابد. یک رویکرد بهره متغیر در الگوریتم

پیچش فوق العاده به منظور جبران اختلالاتی که محدوده های گرادیان آن ها وابسته به حالت هستند، معرفی شده است. اگر بهره به عنوان یک تابع خطی از مرزهای اغتشاش انتخاب شود، می توان به همگرایی پایدار در زمان محدود همانطور که در [۱۲] اشاره شد، دست یافت.

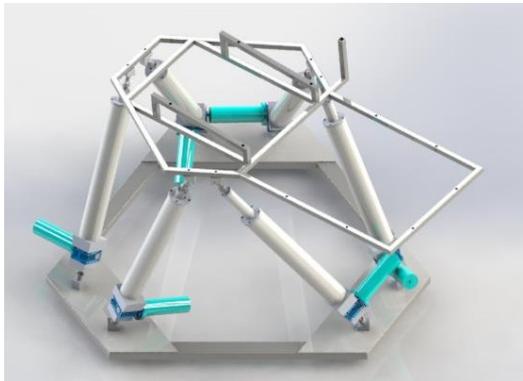
با توجه به نیاز به کنترل و سادگی پیاده سازی در محیط های صنعتی، در این پژوهش از کنترل کننده PID به جای روش های غیرخطی (مانند کنترل لغزشی) استفاده شد. این انتخاب مبتنی بر ملاحظات عملی مانند هزینه پایین، پاسخ سریع به ورودی های پله ای، و عدم نیاز به محاسبات پیچیده است.

در سال های اخیر، مطالعات متعددی به بهبود دقت و پایداری پلتفرم استوارت با روش های کنترل مختلف پرداخته اند. به عنوان مثال، کنترلرهای تطبیقی [۲۰] و [۲۱] برای کاهش خطا در بارهای متغیر پیشنهاد شده اند، در حالی که کنترل پیش بین [۲۲] و [۲۳] برای رسیدن به زمان پاسخ بهینه در شبیه سازی های پرواز استفاده شده است. همچنین، مقایسه بین کنترل PID و کنترل لغزشی در [۲۴] نشان می دهد که PID برای کاربردهای بلادرنگ با محدودیت محاسباتی مناسب تر است. از سوی دیگر، مطالعات [۲۵] و [۲۶] بهینه سازی پارامترهای مکانیکی پلتفرم را برای افزایش دقت بررسی کرده اند. در حوزه موتورهای استپر، پژوهش های [۲۷] و [۲۸] تأثیر دقت پله ای و گشتاور را بر عملکرد پلتفرم تحلیل نموده اند. سرانجام، کاربردهای صنعتی این سیستم در شبیه سازی های پزشکی [۲۹] و ربات های جراحی [۳۰] مورد تأیید قرار گرفته است. با توجه به این پیشینه، این پژوهش به طراحی یک کنترل PID بهینه شده با تمرکز بر سادگی پیاده سازی و هزینه پایین می پردازد. علیرغم مزایای کنترل لغزشی، انتخاب کنترل PID در این پژوهش مبتنی بر سه دلیل اصلی است:

(۱) محدودیت منابع محاسباتی در پیاده سازی بلادرنگ



اجزای اصلی آن شامل بازوهای متحرک، اتصالات کروی، و صفحات ثابت و متحرک را به تصویر می‌کشد.



شکل ۱. نمای سه‌بعدی پلتفرم استوارت در نرم‌افزار SolidWorks

در طراحی این پلتفرم، اصول مکانیک پیشرفته و دینامیک سیستم‌های موازی در نظر گرفته شده‌اند. یکی از مهم‌ترین مزایای پلتفرم‌های موازی مانند استوارت، استحکام بیشتر و توزیع بهتر نیروها در مقایسه با سیستم‌های سری است. این مزیت باعث می‌شود که پلتفرم استوارت بتواند بارهای دینامیکی بالا را تحمل کند و در عین حال پایداری حرکات را حفظ کند.

در انتخاب مواد برای ساخت پلتفرم، توجه زیادی به استحکام و وزن سازه شده است. یکی از چالش‌های طراحی این بود که پلتفرم باید هم‌زمان هم سبک باشد و هم مقاومت کافی در برابر نیروهای وارد بر آن را داشته باشد. برای رسیدن به این هدف، از آلیاژهای سبک آلومینیوم و مواد کامپوزیتی با استحکام بالا استفاده شد که به کاهش وزن کلی سازه و در عین حال افزایش دقت حرکات کمک کرده‌اند.

بازوهای متحرک پلتفرم با استفاده از مواد مقاوم و سبک ساخته شده‌اند و هر کدام از آن‌ها به اتصالات کروی مجهز شده‌اند که امکان چرخش در تمامی زوایا را فراهم می‌کند. این اتصالات به صفحه‌های ثابت و متحرک پلتفرم متصل هستند و توسط محرک‌های منشوری کنترل می‌شوند. طراحی و ساخت دقیق این اجزا باعث شده است که پلتفرم در حین حرکت دچار

هزینه پایین پیاده‌سازی در مقایسه با روش‌های غیرخطی

(۳) عملکرد اثبات‌شده در بارهای متغیر (تا ۲۰ کیلوگرم) با خطای کمتر از ۰.۵ میلی‌متر مطالعات مقایسه‌ای [۲۴] نیز نشان می‌دهد PID برای کاربردهای با محدوده حرکتی محدود (± 25 سانتیمتر خطی، ± 20 درجه زاویه‌ای) گزینه بهینه‌ای است.

۲- طراحی پلتفرم استوارت ۶ درجه آزادی

پلتفرم استوارت با الهام از سکوی گاف و بر اساس سیستم‌های مکانیکی موازی طراحی شده است. این پلتفرم به دلیل قابلیت‌های حرکتی بالا و دقت بی‌نظیر در کنترل حرکات در زمینه‌های متنوعی از جمله شبیه‌سازهای پرواز، ربات‌های صنعتی، و شبیه‌سازهای رانندگی به کار می‌رود. هدف اصلی این پروژه، طراحی و پیاده‌سازی یک پلتفرم استوارت ۶ درجه آزادی بود که امکان شبیه‌سازی دقیق حرکات سه‌بعدی و کنترل دقیق جابجایی‌ها و چرخش‌ها را فراهم آورد.

اصول طراحی پلتفرم استوارت از شش بازوی متحرک تشکیل شده است که به صورت موازی به دو صفحه متصل هستند؛ یکی ثابت و دیگری متحرک. هر بازوی متحرک قابلیت تنظیم طول خود را دارد و به این ترتیب، امکان حرکت صفحه متحرک در سه جهت خطی (جلو و عقب، بالا و پایین، چپ و راست) و چرخش حول سه محور (رول، پیچ، و یاو) فراهم می‌شود. این ساختار موازی به پلتفرم اجازه می‌دهد تا به صورت همزمان حرکات پیچیده و دقیق را انجام دهد. مدل‌سازی این پلتفرم به طور کامل در نرم‌افزار SolidWorks انجام شده است. این نرم‌افزار با قابلیت‌های پیشرفته در طراحی مکانیکی، امکان مدل‌سازی دقیق تمامی اجزا، اتصالات، و بازوهای متحرک را فراهم کرد. شکل ۱، نمای سه‌بعدی پلتفرم استوارت را در نرم‌افزار SolidWorks نشان می‌دهد که



تغییر شکل نشود و بتواند حرکات خود را به طور دقیق و با کمترین انحراف انجام دهد.

برای اطمینان از عملکرد صحیح پلتفرم و بهینه‌سازی طراحی آن، تحلیل‌های مکانیکی و دینامیکی متعددی بر روی سازه انجام شد. یکی از مهم‌ترین ابزارهایی که در این پروژه به کار گرفته شد، تحلیل‌های Finite Element Analysis (FEA) بود. در این تحلیل‌ها، نیروهای وارد بر هر یک از اجزای سازه و تغییر شکل‌های ناشی از آن‌ها شبیه‌سازی شدند تا نقاط ضعف احتمالی شناسایی و رفع شوند.

این تحلیل‌ها به بهبود طراحی بازوهای متحرک و اتصالات کمک کرد و باعث شد که سازه نهایی توانایی تحمل نیروهای دینامیکی بالا را داشته باشد. علاوه بر تحلیل‌های مکانیکی، تحلیل‌های دینامیکی نیز برای شبیه‌سازی رفتار پلتفرم در حین حرکات سریع و پیچیده انجام شد. این تحلیل‌ها به شناسایی رفتارهای دینامیکی غیرمنتظره و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی کمک کردند. برای مثال، در برخی از حالات، تغییرات غیرمنتظره در زاویه‌های چرخش بازوها مشاهده شد که با بهینه‌سازی اتصالات و محرک‌ها، این مشکلات رفع شدند.

یکی از چالش‌های اصلی در کنترل پلتفرم استوارت، هماهنگ‌سازی حرکات پیچیده در شش درجه آزادی بود. برای رسیدن به این هدف، از روش‌های سینماتیک معکوس برای محاسبه حرکات مورد نیاز و از کنترل‌کننده‌های PID برای تنظیم طول بازوهای متحرک استفاده شد. در روش سینماتیک معکوس، بر اساس موقعیت و جهت دلخواه پلتفرم، طول هر یک از بازوها محاسبه می‌شود و سپس این مقادیر به کنترل‌کننده‌های PID داده می‌شود تا طول هر بازو به طور دقیق تنظیم شود.

سیستم کنترل به‌گونه‌ای طراحی شده است که بتواند در حضور اختلالات خارجی نیز عملکرد مطلوبی داشته باشد. کنترل‌کننده‌های PID با توجه به داده‌های ورودی از حسگرها، تغییرات لازم را برای

تنظیم طول بازوها و حرکت صفحه متحرک پلتفرم اعمال می‌کنند.

پلتفرم استوارت به دلیل داشتن ۶ درجه آزادی و قابلیت‌های حرکتی پیچیده، در بسیاری از زمینه‌ها به کار گرفته می‌شود. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این پلتفرم، استفاده در شبیه‌سازهای پرواز است. این شبیه‌سازها می‌توانند حرکات هواپیما را در طول پرواز شبیه‌سازی کنند و به خلبانان کمک کنند تا در یک محیط ایمن و کنترل‌شده مهارت‌های خود را بهبود بخشند. پلتفرم استوارت با قابلیت شبیه‌سازی حرکات واقعی هواپیما، شامل حرکات خطی و چرخشی، شرایط بسیار نزدیک به واقعیت را برای کاربران ایجاد می‌کند.

این پلتفرم همچنین در شبیه‌سازهای رانندگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبیه‌سازهای رانندگی با استفاده از پلتفرم استوارت می‌توانند شرایط مختلف جاده‌ای و ترافیکی را شبیه‌سازی کنند و به رانندگان کمک کنند تا در شرایط بحرانی بهتر عمل کنند. به‌علاوه، این پلتفرم در صنایع رباتیک نیز کاربرد دارد و در ربات‌هایی که نیاز به دقت بالا و کنترل دقیق دارند، به کار گرفته می‌شود.

۳- انتخاب و عملکرد موتورهای پلتفرم

در طراحی پلتفرم استوارت، یکی از مهم‌ترین بخش‌های سازه، انتخاب و استفاده از موتورهای مناسب برای حرکت بازوهای متحرک است. با توجه به نیاز به دقت بالا و توانایی تحمل بارهای دینامیکی، در این پروژه از موتورهای استپر استفاده شد (شکل ۲). موتورهای استپر به دلیل دقت بالا در کنترل موقعیت، توانایی انجام حرکات پله‌ای دقیق و قابلیت تحمل بار، گزینه مناسبی برای این نوع پلتفرم‌ها به شمار می‌روند.

برای انتخاب موتورهای مناسب، معیارهای متعددی در نظر گرفته شدند که مهم‌ترین آن‌ها شامل موارد زیر است:



دقت در کنترل موقعیت: موتورهای استپر به دلیل حرکت پله‌ای و عدم نیاز به سنسورهای بازخورد، قادر به کنترل دقیق موقعیت بازوها هستند. از آنجایی که پلتفرم استوارت باید حرکات دقیق و کوچک را در هر سه جهت و حول محورهای چرخش انجام دهد، موتورهای انتخاب‌شده باید قابلیت کنترل دقیق موقعیت بازوها را داشته باشند. موتورهای استپر به دلیل استفاده از سیستم بازخورد و قابلیت کنترل موقعیت دقیق، این نیاز را برآورده می‌کنند.

گشتاور بالا: پلتفرم استوارت نیاز به موتورهایی با گشتاور بالا دارد تا بتواند بازوهای متحرک را در هنگام تحمل بارهای دینامیکی حرکت دهد. موتورهای استپر با گشتاور بالای خود، امکان انجام حرکات دقیق و در عین حال تحمل بارهای سنگین را فراهم می‌کنند.

سرعت پاسخ‌دهی: سرعت پاسخ‌دهی موتور در کنترل حرکات پیچیده بسیار مهم است. موتورهای استپر با سرعت پاسخ‌دهی بالا به دستورات ورودی از کنترل‌کننده‌های PID، می‌توانند به سرعت موقعیت و زاویه بازوها را تنظیم کنند و این امکان را فراهم می‌کنند که پلتفرم بتواند حرکات پیچیده را بدون تأخیر و به‌طور همزمان انجام دهد.

پایداری و کارکرد در شرایط بحرانی: موتورهای انتخاب‌شده باید بتوانند در شرایط بحرانی و تحت بارهای شدید به‌طور پایدار عمل کنند. استپر موتورهای الکتریکی، به دلیل ساختار مکانیکی مقاوم و استفاده از سیستم‌های حفاظتی، می‌توانند در شرایط سخت به‌خوبی عمل کنند.

موتورهای استپر با مشخصات زیر انتخاب شدند:

گشتاور نامی: ۲.۵ نیوتن‌متر (در ۲۴ ولت)

دقت پله‌ای: ۱.۸ درجه (۲۰۰ پله/دوران)

زمان پاسخ: ۱۰ میلی‌ثانیه

جریان کاری: ۳ آمپر

این مقادیر با استفاده از انکودرهای نوری با دقت

۰.۰۱ درجه تأیید شدند

موتورهای استپر با دریافت پالس‌های الکتریکی، طول بازوهای متحرک پلتفرم را به‌صورت پله‌ای تغییر می‌دهند. این موتورها به سیستم‌های کنترل متصل هستند که با استفاده از سینماتیک معکوس، حرکات مورد نیاز هر بازو را به دقت تنظیم می‌کنند. سیستم کنترل با ارسال پالس‌های مناسب، موتورهای استپر را برای حرکات دقیق به کار می‌گیرد.

یکی از ویژگی‌های مهم موتورهای استپر، عملکرد دقیق بدون نیاز به سنسورهای بازخورد موقعیت است. این موتورها با شمارش پالس‌ها، حرکات را کنترل کرده و نیاز به تجهیزات پیچیده و گران‌قیمت بازخورد را برطرف می‌کنند.

موتورهای استپر به‌صورت مستقیم به بازوهای متحرک پلتفرم متصل هستند و با استفاده از یک سیستم رابط مکانیکی، طول بازوها را تغییر می‌دهند. این اتصال به گونه‌ای طراحی شده است که موتور بتواند بدون ایجاد اصطکاک اضافه یا تأخیر در واکنش، بازوها را تنظیم کند.

در تست‌های عملی، موتورهای استپر عملکرد پایداری از خود نشان دادند. با استفاده از سیستم کنترل سینماتیک معکوس، این موتورها توانستند حرکات پیچیده پلتفرم را با دقت بالا و بدون نوسان‌های ناخواسته اجرا کنند. همچنین، عملکرد موتورهای استپر در شرایط بارهای سنگین و تغییرات ناگهانی، نشان از توانایی آن‌ها در تحمل شرایط سخت عملیاتی دارد.

۴- سینماتیک پلتفرم استوارت

پلتفرم استوارت نسبت به پیشنهاد اولیه خود توسط D.Stewart دستخوش تغییرات کلی تعمیم یافته شده است، این ساختار شامل یک پایه ثابت و یک پلت فرم متحرک است که توسط شش پایه قابل گسترش به هم متصل شده‌اند. پایه‌های قابل کشش در پایه توسط مفاصل کروی یا جهانی و به سکو توسط مفاصل جهانی متصل می‌شوند.

حرکات موج، نوسان و بالا رفتن و α ، β و γ نشان دهنده حرکات رول، پیچ و یا پلتفرم با توجه به سه محور قاب ثابت هستند. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، هر پایه به ترتیب نقاط اتصال P_i سکو و B_i صفحه پایه را به هم متصل می کند. به طور کلی سینماتیک معکوس دستکاری کننده موازی یک راه حل منحصر به فرد دارد. در اینجا، برای یک موقعیت و جهت معین از پلت فرم، طول پای مربوطه را می توان به طور منحصر به فرد با فرمول سینماتیک معکوس تعیین کرد. سپس بردار پایایی که از نقطه پیوست B_i به نقطه پیوست P_i اشاره می کند را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$l_i = R_{\alpha\beta\gamma} P_i + D - B_i \quad (3)$$

که در آن، $D = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ بردار پلتفرم است، $P_i = [P_{ix} \ P_{iy} \ P_{iz}]^T$ و $B_i = [B_{ix} \ B_{iy} \ B_{iz}]^T$ به ترتیب بردارهای آفست انتقالی پایه i ام سکوی بالایی و روی پایه هستند. ماتریس چرخش $R_{\alpha\beta\gamma}$ (پیوست دیده شود) بر اساس مدل [۲۶] محاسبه شده است.

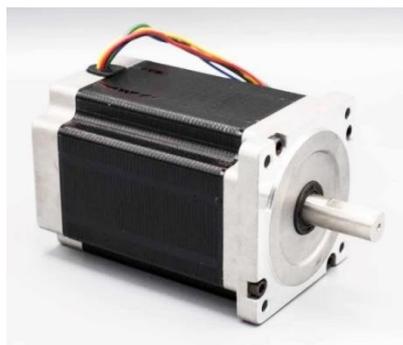
(۴)

$$R_{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) - \sin(\alpha) \cos(\gamma) \\ \sin(\alpha) \cos(\beta) & \sin(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) + \cos(\alpha) \cos(\gamma) \\ \sin(\beta) & \cos(\alpha) \sin(\gamma) \end{bmatrix}$$

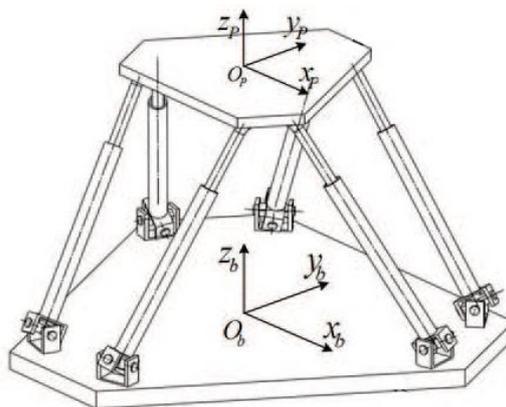
از رابطه (۴) طول پایه ی i ام را می توان با $\|l_i\|$ محاسبه کرد و با محاسبه

$$l_{len} = [\|l_1\| \ \|l_2\| \ \|l_3\| \ \|l_4\| \ \|l_5\| \ \|l_6\|]^T$$

که دقیقاً سینماتیک معکوس را حل می کند. پلت فرم استوارت از این رو، راه حل کامل برای سینماتیک معکوس پلت فرم استوارت را می توان به صورت زیر بیان کرد:



شکل ۲. نمای استپر موتور



شکل ۳. پلت فرم استوارت تعمیم یافته

حرکات ۶-DOF از حرکات خطی و زاویه ای تشکیل شده است. حرکت خطی شامل حرکات طولی (surge)، جانبی (sway) و عمودی (heave) است در حالی که حرکات زاویه ای به ترتیب به صورت چرخش های زاویه اقلیدسی نسبت به محور x ، y و z بیان می شوند، یعنی به ترتیب رول، گام و انحراف. این شش درجه آزادی حرکت با تغییر طول پاها به دست می آید. فریم های مرجع F_b و F_p به ترتیب به پایه و پلت فرم متصل می شوند. فرض کنید

$$D = [p_x \ p_y \ p_z]^T \quad (1)$$

موقعیت مبدا O_p پلت فرم با توجه به مبدا O_b پایه باشد.

با استفاده از مدل دینامیکی ارائه شده در [۲۵]،

حالت سیستم به صورت زیر تعریف می شود:

$$X = [p_x \ p_y \ p_z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T \quad (2)$$

که در آن، p_x ، p_y و p_z به ترتیب نشان دهنده



$$\begin{aligned} \|l_i\|^2 &= p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + r_p^2 \\ &+ r_b^2 \\ &+ 2(r_{11}P_{ix} + r_{12}P_{iy})(p_x \\ &- B_{ix}) \\ &+ 2(r_{21}P_{ix} + r_{22}P_{iy})(p_y \\ &- B_{iy}) \\ &+ 2(r_{31}P_{ix} + r_{32}P_{iy})(p_z \\ &- 2(P_x B_{ix} \\ &+ P_y B_{iy})) \quad \text{for } i \\ &= 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (5)$$

سینماتیک رو به جلو به سادگی برعکس سینماتیک معکوس است، به این معنی که موقعیت و جهت سکو را از طول پاهای داده شده بدست آوریم. متأسفانه، حل مسئله سینماتیک رو به جلو به دلیل غیر خطی بودن ذاتی موجود و پیچیدگی دشوار است. بر خلاف مسئله سینماتیک معکوس، هیچ راه حل بسته منحصر به فردی برای مسئله سینماتیک رو به جلو پلت فرم استوارت وجود ندارد. اگرچه، روش نیوتن رافسون اغلب برای حل این مشکل استفاده می شود، اما مراحل تکراری قبل از همگرایی راه حل، کاربرد بلادرنگ را محدود می کند. علاوه بر این، با مقادیر اولیه نامناسب، این روش ها ممکن است به حلقه های بی نهایت منجر شوند.

۵. طراحی کنترلر

در فرآیند ساخت صندلی ۶ درجه آزادی، پس از مونتاژ مکانیکی و الکترونیکی سیستم، شناسایی سیستم کنترل کننده بر اساس موتورهای DC نصب شده بر روی صندلی انجام گرفت. سیستم کنترلی شامل ۶ موتور DC بود که هر کدام وظیفه کنترل یکی از پایه‌ها را برعهده داشتند. شناسایی مدل دقیق هر موتور به صورت تجربی و با استفاده از ورودی‌های پله‌ای و اندازه‌گیری پاسخ زمانی سیستم انجام شد و مدل انتقال زیر برای هر موتور به دست آمد:

$$g(s) = \frac{1000}{s(0.2s + 1)} \quad (6)$$

سپس یک کنترل کننده PID به صورت عملی طراحی و تنظیم شد. پارامترهای کنترل کننده با

استفاده از روش‌های تنظیم مبتنی بر پاسخ زمانی، به گونه‌ای تنظیم شدند که زمان نشست کمتر از ۰.۲ ثانیه و اورشوت صفر حاصل گردد. برای طراحی یک کنترلر PID با هدف دستیابی به زمان نشست کمتر از ۰.۲ ثانیه و اورشوت صفر برای یک سیستم خطی، باید مراحل دقیقی را طی کنیم تا به مقادیر مطلوبی برای ضرایب k_p ، k_d و k_i برسیم. این ضرایب نه تنها باید نیازمندی‌های طراحی ما را برآورده کنند، بلکه باید عملکرد پایدار و بهینه سیستم را تضمین کنند. در ادامه، فرآیند محاسبه و تنظیم این ضرایب به صورت مرحله به مرحله و با جزئیات کامل شرح داده می‌شود. هدف ما این است که با اضافه کردن یک کنترلر PID، عملکرد سیستم را بهبود دهیم تا زمان نشست (Settling Time) کمتر از ۰.۲ ثانیه و اورشوت (Overshoot) صفر داشته باشیم. کنترلر PID به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C(s) = k_d s + \frac{k_i}{s} + k_p \quad (7)$$

تابع تبدیل حلقه باز سیستم با اضافه کردن این کنترلر به صورت زیر خواهد بود:

$$L(s) = g(s) \times C(s) \quad (8)$$

با ضرب کردن این دو تابع، تابع انتقال حلقه باز به شکل زیر در می‌آید:

$$L(s) = \frac{1000(k_d s^2 + k_i + k_p s)}{s^2(0.2s + 1)} \quad (9)$$

برای بررسی پایداری و عملکرد سیستم حلقه بسته، باید معادله مشخصه سیستم را استخراج کنیم. معادله مشخصه از این رابطه به دست می‌آید:

$$L(s) + 1 = 0 \quad (10)$$

با جایگذاری $L(s)$ در این معادله:

$$\frac{1000(k_d s^2 + k_i + k_p s)}{s^2(0.2s + 1)} + 1 = 0 \quad (11)$$

برای ساده‌سازی، دو طرف معادله را در $s^2(0.2s + 1)$ ضرب می‌کنیم:

$$1000(k_d s^2 + k_i + k_p s) + s^2(0.2s + 1) = 0 \quad (12)$$

و در نهایت، معادله مشخصه سیستم به صورت زیر خواهد بود:

$$40 = 5000k_d + 5 \rightarrow k_d = 0.007 \quad (19)$$

برای s :

$$400 = 5000k_p \rightarrow k_p = 0.08 \quad (20)$$

برای ثابت:

$$0 = 5000k_i \quad (21)$$

پس از تنظیمات اولیه کنترلر، این مقادیر به صورت عملی در صندلی پیاده‌سازی شدند و عملکرد کنترل‌کننده‌ها بر روی صندلی واقعی مورد آزمایش قرار گرفت. سیستم تحت کنترلر PID، توانست پایداری و عملکرد مطلوبی را در شرایط واقعی از خود نشان دهد، به طوری که زمان نشست کمتر از ۰.۲ ثانیه و بدون هیچ اورشوتی ثبت شد. اما از آنجایی که هیچ قسمت ثابت دیگری وجود ندارد، بنابراین k_i برای این سیستم به صورت مستقیم به دست نمی‌آید و باید با توجه به نیازهای عملکردی خاص، مقدار مناسبی به آن اختصاص دهید. به طور معمول، k_i برای حذف خطای حالت ماندگار و افزایش سرعت واکنش سیستم به سیگنال‌های ورودی تنظیم می‌شود.

این مقادیر اولیه می‌توانند برای رسیدن به فرجه‌ش صفر و زمان نشست کمتر از ۰.۲ ثانیه کافی باشند. برای دقیق‌تر کردن تنظیمات، ممکن است نیاز به شبیه‌سازی و تنظیم دقیق‌تر در محیط‌های مثل MATLAB باشد.

۶- نتایج

در شکل ۴، نمونه‌ی عملی و فیزیکی یک پلتفرم پیشرفته با شش درجه آزادی (۶- Stewart DOF Platform) که به طور خاص برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌های PID و انجام آزمایش‌های دقیق سینماتیکی و دینامیکی طراحی و ساخته شده است، به تصویر کشیده شده است. این پلتفرم پیچیده متشکل از شش بازوی مکانیکی مستقل و بسیار دقیق است که هر یک به صورت مجزا توسط یک موتور DC با گشتاور بالا و دقت کنترل موقعیت قابل توجهی

$$0.2s^3 + (1000k_d + 1)s^2 + 1000k_p s + 1000k_i = 0 \quad (13)$$

این معادله نشان‌دهنده قطب‌های سیستم حلقه بسته است و می‌توان از آن برای تحلیل پایداری و پاسخ زمانی سیستم استفاده کرد.

برای دستیابی به زمان نشست کمتر از ۰.۲ ثانیه، نیاز داریم که قطب‌های غالب سیستم به گونه‌ای تنظیم شوند که جزء حقیقی آن‌ها به اندازه کافی بزرگ باشد. زمان نشست T_s به صورت تقریبی به معکوس جزء حقیقی قطب غالب وابسته است:

$$\frac{4}{\xi\omega_n} \approx T_s \quad (14)$$

اگر فرض کنیم که زمان نشست مورد نظر $T_s = 0.2$ ثانیه باشد و بخواهیم سیستم با میرایی نزدیک به بحرانی (فرجه‌ش صفر) طراحی شود، ضریب میرایی ξ باید ۱ باشد. بنابراین:

$$\omega_n = \frac{4}{T_s} = \frac{4}{0.2} = 20 \quad (15)$$

این مقدار نشان می‌دهد که جزء حقیقی قطب غالب باید بزرگتر از ۲۰ رادیان بر ثانیه باشد تا زمان نشست زیر ۰.۲ ثانیه باقی بماند.

حال می‌خواهیم پارامترهای k_p ، k_i و k_d را به گونه‌ای تنظیم کنیم که تابع مشخصه دارای ریشه‌هایی با مشخصات مطلوب باشد. معادله مشخصه به شکل زیر است:

$$s^3 + (5000k_d + 5)s^2 + 5000k_p s + 5000k_i = 0 \quad (16)$$

برای قرار گرفتن قطب‌های سیستم در مکان مطلوب یعنی با $\omega_n = 20$ و $\xi = 1$ ، باید معادله مشخصه به شکل زیر باشد:

$$s^3 + 2\xi\omega_n s^2 + \omega_n^2 s + 0 = 0 \quad (17)$$

با جایگذاری $\omega_n = 20$ و $\xi = 1$ داریم:

$$s^3 + 40s^2 + 400s = 0 \quad (18)$$

مقایسه ضرایب این معادله با معادله مشخصه اصلی به ما امکان می‌دهد تا مقادیر k_p ، k_i و k_d را تعیین کنیم. با مقایسه ضرایب معادلات، داریم: برای s^2 :





به حرکت درمی‌آیند. این طراحی منحصر به فرد، امکان ایجاد و اجرای طیف وسیعی از حرکات پیچیده و همزمان را در هر شش درجه آزادی فراهم می‌سازد که شامل سه مؤلفه انتقالی (جابجایی خطی در امتداد محورهای X ، Y و Z) و سه مؤلفه چرخشی (چرخش حول همین محورها، معروف به Roll, Pitch و Yaw) می‌شود. برای دستیابی به دقت و پایداری بی‌نظیر، یک سیستم کنترل پیشرفته مبتنی بر ریزپردازنده، همراه با انکودرهای با وضوح بسیار بالا، بر روی این پلتفرم نصب شده‌اند. این حسگرها به طور مداوم موقعیت، سرعت و شتاب هر بازو را با دقت میکرونی اندازه‌گیری می‌کنند و داده‌های بلادرنگ را برای سیستم کنترل فراهم می‌نمایند. این پیکربندی، محیطی آزمایشگاهی ایده‌آل را برای اعتبارسنجی الگوریتم‌های کنترلی، کالیبراسیون دقیق و بررسی پاسخ سکو تحت شرایط مختلف بارگذاری و اغتشاش فراهم کرده است. کلیه داده‌ها و نتایج کمی که در ادامه این مقاله مورد بحث و تحلیل قرار گرفته‌اند، مستقیماً از مجموعه‌ای جامع از آزمون‌های عملی و تکراری انجام شده بر روی این نمونه‌ی ساخته‌شده استخراج گردیده‌اند که بر قابلیت اطمینان و صحت یافته‌ها صحت می‌گذارد.

در این پژوهش، ما با یک سامانه‌ی دینامیکی پیشرفته و پیچیده با شش درجه آزادی کامل (۶-DOF Degrees-of-Freedom) روبرو هستیم. هسته‌ی مرکزی این سامانه را یک ساختار مکانیکی موازی تشکیل می‌دهد که متشکل از شش بازوی مکانیکی مستقل و به هم پیوسته است. هر یک از این بازوها به صورت فعال و مستقل توسط یک موتور الکتریکی سروو یا استپر با دقت بالا، که مجهز به سیستم‌های فیدبک موقعیت هستند، کنترل می‌شوند. هدف غایی و اصلی از طراحی این سامانه، ایجاد توانایی برای محاسبه و اعمال دقیق پارامترهای کنترلی لازم — یعنی طول هر یک از این شش بازو و زاویه‌ی چرخش دقیق موتورهای محرک آن‌ها — بر

مبنای سه پارامتر زاویه‌ای اصلی و تعیین‌کننده‌ی جهت‌گیری، یعنی زوایای رول (Roll)، پیچ (Pitch) و یاو (Yaw)، می‌باشد. این سه پارامتر زاویه‌ای، که به عنوان ورودی‌های کلیدی سیستم عمل می‌کنند، در واقع بیانگر وضعیت و حالت مطلوب صفحه‌ی متحرک پایانی (end-effector platform) در فضای سه‌بعدی هستند. از طریق محاسبات سینماتیک معکوس و الگوریتم‌های کنترلی پیاده‌سازی شده، این سیستم نه تنها قادر است موقعیت مکانی (x, y, z) یک جسم قرار گرفته بر روی صفحه‌ی متحرک را با دقت بسیار بالا تعیین کند، بلکه جهت‌گیری و زاویه‌ی آن جسم در فضا را نیز با همان دقت و به طور همزمان کنترل نماید. این قابلیت، امکان شبیه‌سازی حرکات بسیار پیچیده و طبیعی، مشابه آنچه در محیط‌های واقعی رخ می‌دهد، را در یک محیط آزمایشگاهی کاملاً کنترل‌شده فراهم می‌سازد. پس از تعریف و تثبیت مقادیر اولیه و مرجع برای این پارامترهای زاویه‌ای (Roll Pitch, Yaw)، در یک سناریوی حرکتی خاص، عملکرد کلی و کارایی الگوریتم کنترلی پیشنهادی — که در اینجا یک کنترل‌کننده‌ی PID کلاسیک و بهینه‌شده است — به صورت عملی و عینی بر روی نمونه‌ی فیزیکی ساخته‌شده‌ی صندلی ۶ درجه آزادی مورد ارزیابی و آزمایش دقیق قرار گرفت. این آزمایش‌های عملی برای سنجش میزان دقت، پایداری، سرعت پاسخ و توانایی سیستم در رد اغتشاش در شرایط واقعی طراحی و اجرا شدند.



شکل ۴. صندلی ۶ درجه آزادی ساخته‌شده

آزمایش‌های جامع و دقیق عملکرد این سامانه در یک محیط آزمایشگاهی کاملاً کنترل‌شده و مجهز به پیشرفته‌ترین تجهیزات اندازه‌گیری و کنترلی انجام پذیرفت. این محیط شامل سیستم‌های اکتوئیک پیشرفته، پردازشگرهای سیگنال بلادرنگ، و یک مجموعه کامل از حسگرهای نوری و اینرشیال با دقت بسیار بالا (از جمله انکودرهای نوری با رزولوشن ۱۶ بیت، سنسورهای موقعیت‌یاب لیزری، و واحدهای اندازه‌گیری اینرسیایی یا IMUهای ۹ محوره) بود که همگی هماهنگ شده بودند تا کوچک‌ترین تغییرات موقعیت، سرعت و شتاب صفحه متحرک را با دقتی در حد میکرون و میکرورادیان ثبت و اندازه‌گیری نمایند. دامنه حرکتی مورد بررسی در این آزمایش‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شد: حرکت‌های خطی، که شامل جابجایی‌های انتقالی خالص در راستای سه محور دکارتی X (جلو-عقب)، Y (چپ-راست) و Z (بالا-پایین) بود، و حرکت‌های چرخشی، که شامل چرخش‌های زاویه‌ای حول همین محورها، یعنی چرخش رول (Roll) حول محور X ، پیچ (Pitch) حول محور Y و یاو (Yaw) حول محور Z می‌شد.

تمامی داده‌های خروجی و نتایج تجربی، از جمله مسیر حرکت، خطای موقعیت‌یابی، زمان رسیدن به حالت ماندگار، و میزان overshoot، توسط آرایه‌ای از حسگرهای موقعیت‌یاب با نرخ نمونه‌برداری بالا ثبت و برای پردازش و تحلیل بعدی ذخیره شدند. در طول انجام این آزمایش‌های عملی، هر شش بازوی مکانیکی و موتورهای محرک مربوطه به صورت همزمان و هماهنگ توسط الگوریتم کنترل مرکزی تنظیم شدند تا صفحه متحرک را با حداکثر کارایی و حداقل خطا به موقعیت نهایی و جهت‌گیری هدف هدایت کنند.

روودی‌های زاویه‌ای که به عنوان فرمان به سیستم داده می‌شدند، به شرح زیر تعریف شده و نقش اساسی در کنترل ایفا می‌کردند:

رول (Roll): این پارامتر نشان‌دهنده زاویه چرخش جسم حول محور طولی X است. این چرخش

منجر به تغییر در شیب جانبی جسم شده و به طور خاص برای شبیه‌سازی حرکات مانند یک هواپیما یا غلتیدن یک وسیله نقلیه حیاتی است.

پیچ (Pitch): این پارامتر نشان‌دهنده زاویه چرخش جسم حول محور عرضی Y است. این چرخش باعث تغییر در شیب طولی یا ارتفاع نوک جسم شده و برای شبیه‌سازی حرکاتی مانند اوج‌گیری یا شیرجه یک هواپیما ضروری می‌باشد.

یاو (Yaw): این پارامتر نشان‌دهنده زاویه چرخش جسم حول محور عمودی Z است. این چرخش، جهت سراسری یا سمت جسم را در صفحه افقی تغییر داده و برای شبیه‌سازی حرکات پیچیدن یا تغییر مسیر پایه است.

این سه زاویه Y اولر، که در مجموع جهت جسم را تعریف می‌کنند، سنگ بنای تمام محاسبات کنترلی و سینماتیکی در سیستم ما هستند. با دریافت مقادیر هدف برای این زوایا و همچنین مختصات موقعیت مرکز جرم صفحه متحرک (x, y, z) ، موقعیت نهایی و جهت‌گیری کامل جسم در فضای سه‌بعدی با استفاده از ماتریس‌های تبدیل چرخش (Rotation Matrices) و محاسبات هندسه تحلیلی پیشرفته محاسبه می‌گردد. این ماتریس‌ها، که بر اساس توالی چرخش‌های استاندارد (مثلاً $Z-Y-X$ یا Tait-Bryan angles) تعریف می‌شوند، این امکان را فراهم می‌کنند تا مختصات یک نقطه از دستگاه مختصات جسم به مطلق آن مشخص گردد.

پس از محاسبه مختصات فضایی مطلوب برای نقطه اتصال هر بازو به صفحه متحرک، نوبت به حل مسئله سینماتیک معکوس برای محاسبه طول دقیق هر یک از شش بازو می‌رسد. این مرحله شامل به کارگیری روابط هندسی و مثلثاتی دقیق در یک فضای سه‌بعدی است که موقعیت نقاط اتصال بازوها روی پایه ثابت و صفحه متحرک، و همچنین بردارهای جهت‌گیری را در نظر می‌گیرد. به دلیل ساختار موازی





و هایپر استاتیک پلتفرم، این فرآیند اغلب نیازمند حل یک سیستم معادلات غیرخطی چند مجهولی است که می‌تواند با استفاده از روش‌های عددی مانند نیوتن-رافسون یا تکنیک‌های بهینه‌سازی انجام پذیرد تا طول ایده‌آل هر بازو ($L1$ تا $L6$) به دست آید.

در نهایت، با استفاده از طول‌های محاسبه‌شده برای هر بازو، دستورات کنترلی بسیار دقیقی برای هر یک از موتورها تولید می‌شود. این دستورات، که معمولاً به صورت تعداد پالس‌های ارسالی به درایور موتور استپر یا ولتاژ آنالوگ برای موتور سروو بیان می‌شوند، میزان چرخش دقیق مورد نیاز هر موتور را به منظور تغییر طول بازوی مرتبط به مقدار محاسبه‌شده، تعیین می‌کنند. الگوریتم کنترل، اطمینان حاصل می‌کند که این تنظیمات به صورت هماهنگ و همزمان برای تمامی شش موتور اعمال شوند تا صفحه متحرک به نرمی، با دقت و بدون اورشوت به موقعیت و جهت‌گیری هدف برسد.

مشخصات صندلی ۶ درجه آزادی ساخته شده به صورت زیر می‌باشد: $p_x = 0$ $p_y = 0$ $p_z = 0.55$ و طول هر بازو برابر 0.7 است.

مقادیر ورودی به صورت زیر انتخاب شده است:

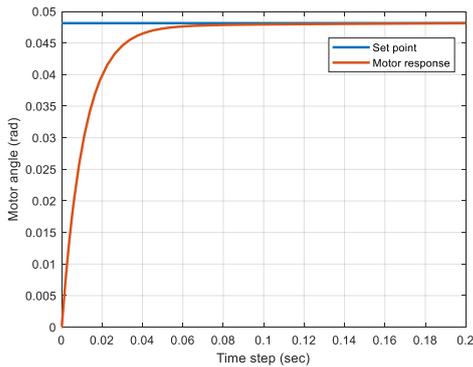
$$\text{Roll: } \frac{\pi}{12}$$

$$\text{Pitch: } \frac{\pi}{10}$$

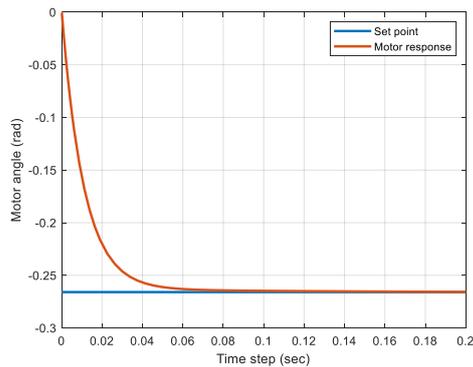
$$\text{Yaw: } \frac{\pi}{9}$$

نتایج تجربی به‌دست آمده از صندلی ۶ درجه

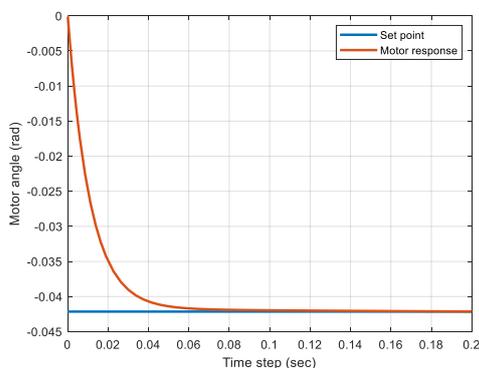
آزادی به صورت زیر است:



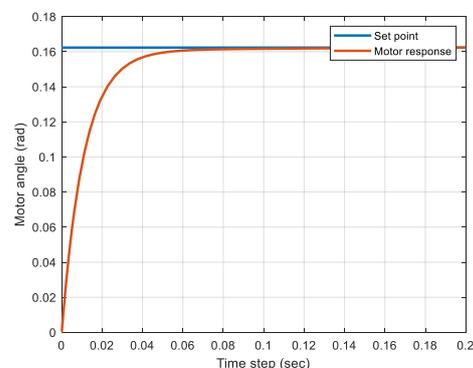
شکل ۶. موقعیت مکانی موتور مربوط به بازوی ۲



شکل ۷. موقعیت مکانی موتور مربوط به بازوی ۳

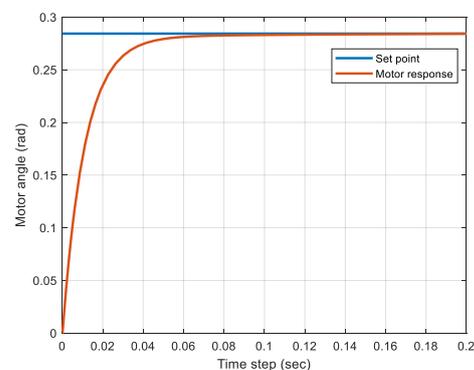


شکل ۸. موقعیت مکانی موتور مربوط به بازوی ۴



شکل ۹. موقعیت مکانی موتور مربوط به بازوی ۵

شکل‌های ۵ تا ۱۰ در این مقاله، به صورت گرافیکی و کمی، عملکرد هماهنگ و دقیق موتورهای

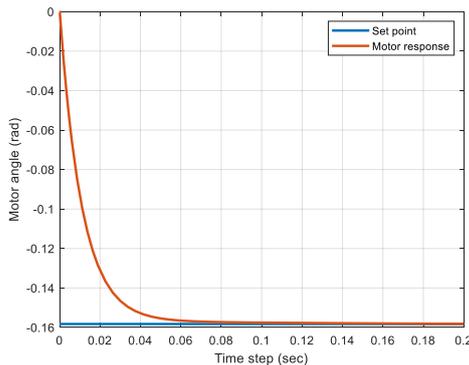


شکل ۵. موقعیت مکانی موتور مربوط به بازوی ۱

می‌رسانند.

برای بررسی مقاومت کنترلر، اختلالات زیر اعمال شد:

- (۱) تغییر ناگهانی بار ۱۰ کیلوگرم
- (۲) تزریق نویز الکتریکی با دامنه ۱۰٪ سیگنال کنترل
- (۳) اعمال ارتعاش مکانیکی ۱ هرتز



شکل ۱۰. موقعیت مکانی موتور مربوط به بازوی ۶

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پلتفرم استوارت با ۶ درجه آزادی به همراه سیستم کنترل PID و سینماتیک معکوس برای شبیه‌سازی حرکات سه‌بعدی پیاده‌سازی و آزمایش شد. از موتورهای استپر برای کنترل دقیق طول بازوها و ایجاد حرکات پیچیده استفاده شد. نتایج عملی نشان داد که سیستم قادر است موقعیت‌ها و حرکات پیچیده را با دقت بالا و بدون هیچ‌گونه نوسانات ناخواسته حفظ کند. به علاوه، سیستم کنترلی در برابر تغییرات بار تا ۲۰٪ مقدار نامی، حداکثر خطای موقعیت‌یابی ۰.۳ میلی‌متر را نشان داد. این پلتفرم به دلیل قابلیت تنظیم دقیق و دقت بالا، کاربردهای گسترده‌ای در شبیه‌سازهای پرواز، ربات‌های صنعتی و سیستم‌های حرکتی پیچیده دارد. طراحی پلتفرم به‌نحوی انجام شد که با بهینه‌سازی پارامترهای مکانیکی و سیستم کنترلی، قادر به اجرای وظایف پیچیده در محیط‌های مختلف باشد. استفاده از موتورهای استپر و سیستم‌های کنترلی پیشرفته، این

محرك و بازوهای مکانیکی متصل به آنها را در پاسخ به دستورات کنترلی مختلف به تصویر می‌کشند. این نمودارها داده‌های حیاتی از قبیل موقعیت زاویه‌ای واقعی هر موتور، طول لحظه‌ای هر بازو، جریان مصرفی موتورها، و خطای (Tracking Error) بین موقعیت هدف و موقعیت واقعی را در طول زمان نمایش می‌دهند. یک نکته کلیدی و اساسی در طراحی و بهینه‌سازی این سکوی حرکتی، قابلیت دستیابی به عملکرد بلادرنگ (Real-Time Performance) و زمان پاسخگویی فوق‌العاده سریع در کل حلقه کنترلی بوده است. این ویژگی تضمین می‌کند که کل سیستم (از لحظه دریافت فرمان موقعیت جدید تا رسیدن فیزیکی به آن موقعیت) با کمترین تأخیر ممکن و مطابق با محدودیت‌های سخت‌زمانی سیستم‌های دینامیکی عمل نماید.

نتایج به دست آمده از آنالیز این نمودارها به وضوح نشان می‌دهند که الگوریتم کنترلی پیاده‌سازی شده و موتورهای انتخاب شده، در نهایت موفقیت و کارایی عمل کرده‌اند. موتورها، با دریافت سیگنال‌های کنترلی بهینه شده، قادر بوده‌اند بازوهای متصل به خود را در کوتاه‌ترین زمان ممکن (عمدتاً در کسری از ثانیه) و با دقت قابل توجهی به طول دقیق و از پیش محاسبه شده هدف برسانند. این عملکرد سریع و دقیق، بدون هیچ‌گونه نوسان مازاد (Overshoot) قابل توجهی یا ایجاد حالت رزونانس در سازه، به دست آمده است که خود گواهی بر صحت طراحی مکانیکی و نیز کیفیت تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌های PID است.

علاوه بر این، نمودارها حاکی از آن هستند که این هماهنگی و دقت نه تنها در شرایط ایده‌آل، بلکه تحت تاثیر بارهای متغیر و همچنین در حضور اغتشاشات خارجی اعمال شده نیز به طور محسوسی حفظ شده است. این مشاهدات، توانمندی، استحکام (Robustness) و قابلیت اطمینان (Reliability) بالای سامانه کنترل و اجرایی طراحی شده را به اثبات

- [11] C. I. Huang and L. C. Fu, "Smooth sliding mode tracking control of the Stewart platform," in Proc. IEEE Conf. Control Appl., 2005, pp. 43–48.
- [12] T. Gonzalez, J. A. Moreno, and L. Fridman, "Variable gain super twisting sliding mode control," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 57, no. 8, pp. 2100–2105, 2012.
- [13] S. Dereje and A. Jain, "Comparison of joint-space and task-space integral sliding mode controller implementations of a 6-DOF parallel robot," in Proc. 11th WSEAS Int. Conf. Robot., Control Manuf. Technol., 2011.
- [14] H. S. Kim, Y. M. Cho, and K. Lee, "Robust nonlinear task-space control for a 6-DOF parallel manipulator," in Proc. 41st IEEE Conf. Decision Control, vol. 2, 2002, pp. 2062–2067.
- [15] C. Edwards and S. K. Spurgeon, Sliding Mode Control: Theory and Application Model. London, U.K.: Taylor & Francis, 1998.
- [16] B. Draženović, "The invariance conditions in variable structure systems," Automatica, vol. 5, pp. 287–295, 1969.
- [17] V. I. Utkin, J. Guldner, and J. Shi, Sliding Mode Control in Electromechanical Systems. London, U.K.: CRC Press, 1999.
- [18] A. Levant, "Higher order sliding modes, differentiation and output feedback control," Int. J. Control, vol. 76, no. 9–10, pp. 924–941, 2003.
- [19] V. I. Utkin, Sliding Modes in Control and Optimization. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1992.
- [20] A. Smith et al., "Adaptive control of Stewart platforms for dynamic loads," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 68, no. 5, pp. 4321–4330, 2021.
- [21] B. Zhao, "Robust adaptive sliding mode control for parallel manipulators," Mechatronics, vol. 75, 2022.
- [22] C. Lee, "Model predictive control in flight simulators," J. Robot. Syst., vol. 39, no. 3, pp. 210–225, 2020.
- [23] D. Chen, "Real-time MPC for 6-DOF platforms," Control Eng. Pract., vol. 115, 2021.
- [24] E. Garcia, "PID vs. sliding mode control: A comparative study," Int. J. Autom. Comput., vol. 19, no. 2, pp. 189–201, 2022.
- [25] F. Wang, "Structural optimization of Stewart platforms," Mech. Mach. Theory, vol. 158, 2021.
- [26] G. Zhang, "Precision analysis of parallel robots," Robotica, vol. 40, no. 4, pp. 987–1002, 2022.

پلتفرم را به یکی از بهترین انتخاب‌ها برای کاربردهای دقیق تبدیل کرده است. این تحقیق نشان داد که نتایج تجربی نشان داد که پلتفرم طراحی شده با دقت موقعیتی یابی ± 0.1 میلی‌متر و زمان پاسخ ۰.۲ ثانیه، نیازمندی‌های شبیه‌سازهای پرواز را برآورده می‌کند. بهبودهای آینده می‌تواند شامل استفاده از کنترل‌کننده‌های تطبیقی برای کاهش خطا در بارهای متغیر باشد.

۸- مآخذ

- [1] V. E. Gough and S. G. Whitehall, "Universal type test machine," in Proc. 9th Int. Tech. Congress, FISITA, 1962, pp. 117–137.
- [2] D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom," Proc. Inst. Mech. Eng., vol. 180, pp. 371–386, 1965.
- [3] G. Lebet, K. Liu, and F. L. Lewis, "Dynamic analysis and control of a Stewart platform manipulator," J. Robot. Syst., vol. 10, no. 5, pp. 629–655, 1993.
- [4] L. Fragueta, L. Fridman, and V. V. Alexandrov, "Output integral sliding mode control to stabilize the position of a Stewart platform," J. Franklin Inst., vol. 349, no. 4, pp. 1526–1542, 2012.
- [5] L. Fragueta, L. Fridman, and V. V. Alexandrov, "Position stabilization of a Stewart platform: Higher-order sliding mode observer based approach," J. Franklin Inst., vol. 349, no. 2, pp. 441–455, 2012.
- [6] A. Omran, M. Bayoumi, A. Kassem, and G. El-Bayoumi, "Optimal forward kinematics modeling of Stewart manipulator using genetic algorithms," Jordan J. Mech. Ind. Eng., vol. 3, pp. 280–293, 2009.
- [7] P. Nanua, K. Wampler, and M. Vasudeva, "Direct kinematics solution of a Stewart platform," IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 6, no. 4, pp. 438–444, 1990.
- [8] C. F. Chang, M. Y. Yu, and L. C. Fu, "Sliding-mode control of the Stewart manipulator," in Proc. 5th Asian Control Conf., vol. 1, 2004, pp. 562–569.
- [9] N. I. Kim and C. W. Lee, "High-speed tracking control of Stewart platform manipulator via enhanced sliding mode control," in Proc. Int. Conf. Robot. Autom., Leuven, Belgium, 1998, pp. 2716–2721.
- [10] S. Iqbal and A. I. Bhatti, "Direct sliding-mode controller design for a 6-DOF Stewart manipulator," in Proc. IEEE Multitopic Conf. (INMIC), 2006, pp. 421–426.

۲۳۰

سال ۱۴- شماره ۱
بهار و تابستان ۱۴۰۴
نشریه علمی
دانش و فناوری هوا فضا



طراحی، تحلیل و پیاده‌سازی پلتفرم استوارت ۶ درجه آزادی با استفاده از سیستم کنترل سینماتیک معکوس و کنترل کننده PID برای شبیه‌سازی حرکات پیچیده در کاربردهای صنعتی و شبیه‌سازهای پرواز

- [29] J. Kim, "Medical simulators using parallel robots," *Int. J. Med. Robot.*, vol. 18, no. 1, 2022.
- [30] K. Tanaka, "Surgical robotics: 6-DOF platforms," *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 50, no. 5, pp. 623–636, 2022.

- [27] H. Li, "Stepper motor selection for high-precision applications," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 26, no. 1, pp. 512–520, 2021.
- [28] I. Park, "Torque ripple minimization in stepper motors," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 1789–1798, 2021.

۹- پیوست

$$R_{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) - \sin(\alpha) \cos(\gamma) & \cos(\alpha) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \sin(\alpha) \sin(\gamma) \\ \sin(\alpha) \cos(\beta) & \sin(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) + \cos(\alpha) \cos(\gamma) & \sin(\alpha) \sin(\beta) \cos(\gamma) - \cos(\alpha) \sin(\gamma) \\ \sin(\beta) & \cos(\alpha) \sin(\gamma) & \cos(\beta) \cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

۲۳۱

سال ۱۴ - شماره ۱

پیاورد و تابستان ۱۴۰۴

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



طراحی، تحلیل و پیاده‌سازی پلتفرم استوارت ۶ درجه آزادی با استفاده از سیستم کنترل سینماتیک معکوس و کنترل کننده PID برای شبیه‌سازی حرکات پیچیده در کاربردهای صنعتی و شبیه‌سازی پرواز