



بررسی تجربی استفاده از سکوی 6 درجه آزادی استوارت برای جداسازی فعال ارتعاشات

مهدی رضائی^{1*}، مقداد بابایی سوله²

1- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
* تبریز، صندوق پستی 33585-123، m.rezaei@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 04 تیر 1393
پذیرش: 20 مرداد 1393
ارائه در سایت: 19 مهر 1393
کلید واژگان:
سکوی استوارت
ایزولاسیون فعال ارتعاشات
سنسورهای ممز
فیلتر کالمان

چکیده

سکوی استوارت به عنوان سکویی که توانایی اعمال سه درجه آزادی حرکت انتقالی و سه درجه آزادی حرکت دورانی دارد، دارای دو صفحه پایینی (پایه) و بالایی (متحرک) می‌باشد و می‌تواند برای جداسازی رفتار بخش متحرک و محموله روی آن از حرکات وارده به سکوی پایین مورد استفاده قرار گیرد. این مقاله به بررسی تجربی امکان استفاده از سکوی استوارت به عنوان یک سکوی شش درجه آزادی به منظور جداسازی فعال ارتعاشات می‌پردازد. حذف ارتعاشات دامنه بالا که معمولاً فرکانس پائینی دارند با روش‌های غیرفعال ممکن نیست و لازم است که از روش فعال برای حذف آنها بهره جست. در این تحقیق، یک سکوی استوارت بر مبنای عملگرهای دورانی الکتریکی (سروو موتورها) ساخته شد و برای جداسازی صفحه فوقانی از حرکات صفحه زیرین مورد استفاده قرار گرفت. حرکات با دو درجه آزادی شامل دو دوران متعام غلت و فراز به صفحه زیرین اعمال گردید و نشان داده شد که با طراحی کنترل کننده‌های مناسب بر مبنای سینماتیک سکوی استوارت می‌توان از انتقال این حرکات به صفحه فوقانی جلوگیری نمود. برای تخمین دو زاویه دورانی، از سنسورهای ممز، شامل دو عدد شتاب‌سنج و یک عددژیروسکوپ سرعت زاویه‌ای استفاده گردید. این سنسورها زوایای مورد نظر را با استفاده از فیلتر کالمان تخمین می‌زدند. نتایج آزمایشات عملی نشان داد که وقتی حرکات صفحه پایینی در محدوده سرعت کاری سروو موتورها قرار داشته باشند، سکوی استوارت قادر است دو دوران متعام غلت و فراز را به خوبی حذف کرده و وضعیت صفحه فوقانی را در حالت افقی تثبیت نماید.

Active vibration isolation using 6DOF Stewart platform: An experimental study

Mahdi Rezaei^{1*}, Meghdad Babaei Soteh²

1- Department of Aerospace Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
* P.O.B. 33585-123 Tabriz, Iran, m.rezaei@sut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 June 2014
Accepted 11 August 2014
Available Online 11 October 2014

Keywords:
Stewart Platform
Active Vibration Isolation
MEMS Sensors
Kalman Filter

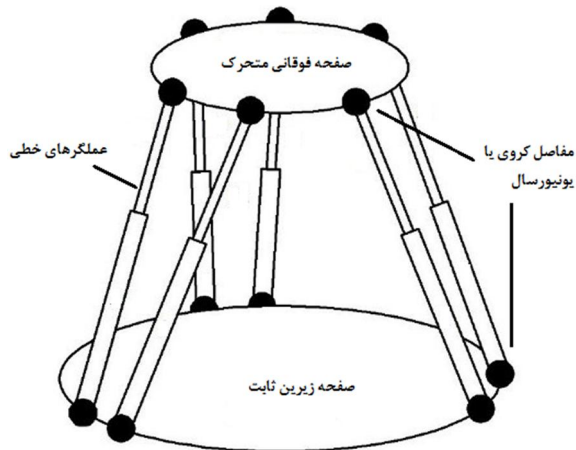
ABSTRACT

The Stewart platform with six degree of freedom (three translational and three rotational motions) consists of two rigid bodies, lower plate (base) and upper one (mobile). These two bodies are connected by six extensible legs between three pairs of joints on each of the bodies. This platform can be used to isolate the top plate of the platform and its payload from the applied motions to the base. Since the passive isolation methods are not effective in elimination of the high amplitude (and usually) low frequency motions, this paper practically investigates the possibility of using the 6DOF Stewart platform as an active vibration isolator. In this study, a Stewart platform was designed and constructed based on electric actuators (servo-motors). It was then practically utilized to isolate its top plate from the applied pitch and roll rotations to the base plate. MEMS sensors including two accelerometers and one rate gyro along with Kalman filter and kinematic relations were utilized for measuring the pitch and roll motions. A PI controller was implemented to keep the top plate at level position using the MEMS sensors installed on the bottom plate. The experimental results indicated that the platform can effectively isolate the pitch and roll motions while the frequency of these motions is in the working speed range of the electric actuators.

1- مقدمه

تشکیل می‌گردد که به وسیله‌ی شش بازو/عملگر خطی و از طریق مفاصل کروی یا یونیورسال به یکدیگر متصل می‌شوند. یکی از این صفحات صلب پایه خوانده شده و ثابت است و صفحه دیگر سکوی متحرک خوانده شده و حرکت آن از روی موقعیت و مختصات بازوها و مفاصل قابل تعیین می‌باشد [3]. شکل 1 نمونه‌ای از این مکانیزم را نشان می‌دهد. مکانیزم استوارت جزو ساختارهای موازی طبقه‌بندی می‌شود که از

مکانیزم استوارت یک مکانیزم شناخته شده است که برای اولین بار در سال 1957 توسط گو مطرح گردید [1] و در سال 1965 پس از استفاده در یک شبیه‌ساز پرواز شش درجه آزادی توسط استوارت فراگیر شد [2]. سکوی استوارت توانایی اعمال 6 درجه آزادی حرکت سه حرکت انتقالی و سه حرکت دورانی متعام را داراست. این مکانیزم از دو صفحه فوقانی و زیرین



شکل 1 نمونه شماتیک از یک سکوی استوارت کلاسیک

با در نظر گرفتن این هدف، در این تحقیق یک سکوی استوارت با عملگرهای الکتریکی طراحی و ساخته شده و مباحث مختلف تئوریک درباره کنترل حلقه باز و حلقه بسته روی آن پیاده گردیده است. سکوی مورد نظر از شش سرووموتور برای اعمال انواع حرکات به صفحه فوقانی استفاده می‌کند. دو حرکت دورانی غلت² و فراز³ که انحراف زاویه‌ای یک جسم از وضعیت افقی (صفحه عمود بر بردار شتاب جاذبه) را در دو جهت متعادل مشخص می‌کنند، مد نظر جداسازی بوده‌اند. به عبارت دیگر، دو درجه از شش درجه آزادی سکوی استوارت تحت جداسازی فعال ارتعاشات قرار گرفته است. برای تشخیص حرکات دورانی غلت و فراز و اعمال کنترل به منظور جداسازی صفحه فوقانی از این حرکات، از سنسورهای ممز بهره گرفته شده است. اطلاعات این سنسورها بصورت بلادرنگ اخذ گردیده و با اعمال فیلتر کالمان، تخمین مناسبی از کمیت‌های مورد اندازه‌گیری حاصل شده است. متغیرهای تخمینی وارد یک حلقه کنترلی شده و با حل معادلات مربوطه، حرکات مناسب به صفحه فوقانی جهت خنثی سازی حرکات صفحه پائینی اعمال شده است.

این مقاله از شش بخش تشکیل شده است. پس از ذکر مطالب مقدماتی در بخش اول، معادلات سینماتیکی حاکم بر سکوی استوارت در بخش دوم ارائه گردیده است. در بخش سوم، تخمین زاویه‌ای غلت و فراز و همچنین الگوریتم کنترلی مورد استفاده ارائه شده است. بخش چهارم به معرفی نمونه آزمایشگاهی ساخته شده و بخش پنجم به نتایج عملی بدست آمده می‌پردازد. در نهایت در بخش ششم، بحث و نتیجه‌گیری نهایی انجام گرفته است.

2- معادلات سینماتیکی حاکم بر سکوی استوارت

در سکوی استوارت، موقعیت‌دهی صفحه‌ی متحرک بوسیله شش محرک مستقل انجام می‌گیرد. سکوی ساخته شده در این تحقیق از شش سروو موتور به عنوان عملگر استفاده می‌کند و بنابراین برای حرکات مختلف انتقالی و دورانی صفحه فوقانی، هر سروو موتور باید دوران زاویه‌ای خاصی را انجام دهد. روابط سینماتیکی ارائه شده در این بخش کمک می‌کند تا برای هر حرکت دلخواه صفحه فوقانی، موقعیت بازوی هر سروو موتور و لذا زاویه‌ی دوران مربوط به آن به دست آید. این روابط، سینماتیک معکوس سکوی استوارت نامیده می‌شوند [14].

2-1- دستگاه‌های مختصات

برای استخراج روابط سینماتیکی دو دستگاه مختصات تعریف می‌شود. همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است، یکی از این دو دستگاه تحت

مزایای این ساختارها نظیر وزن کم، سرعت مناسب، صلبیت زیاد و نسبت بار به وزن بالا برخوردار است [4]. در چند دهه اخیر نسخه‌های مختلف و متنوعی از این مکانیزم توسعه یافته است که هم از نظر ساختار و هم از نظر نوع عملگرهای مورد استفاده با یکدیگر تفاوت دارند. این مکانیزم کاربردهای بسیار متنوعی دارد که از آن جمله می‌توان به استفاده در انواع شبیه‌سازها (شبیه‌ساز هواپیما، خودرو، کشتی و وسایل نقلیه دیگر)، مکانیزم‌های نشانه‌رو، ربات‌های کمک جراح و ابزارآلات ماشین‌کاری چند محوره نام برد. به لحاظ فعالیت‌های تحقیقاتی نیز این مکانیزم موضوع فعالیت‌های علمی تئوریک و تجربی بسیار زیادی بوده که از چند دهه پیش و در موضوعاتی چون تحلیل‌های دینامیکی و حل معادلات [5]، روش‌های کنترلی [6]، بکارگیری در کاربردهای متفاوت [7] و تغییرات ابتکاری در نوع مکانیزم [8] شروع گردیده و هم اکنون نیز ادامه دارد.

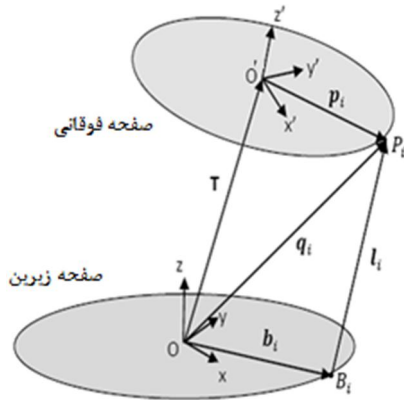
در این تحقیق، موضوع بکارگیری مکانیزم استوارت در دفع فعال ارتعاشات بررسی شده است. در کاربردهای عادی سکوی استوارت، صفحه پائینی ثابت بوده و با اعمال حرکت به بازوهای مختلف، حرکات مختلف دورانی و انتقالی در صفحه فوقانی سکو ایجاد می‌گردد. برای دفع فعال ارتعاشات، روند معکوسی باید صورت گیرد. در این حالت، صفحه پائینی به هر دلیلی دارای انواع حرکات دورانی و انتقالی است. اگر بتوان این حرکات را اندازه‌گیری کرده و انحراف صفحه پائینی از وضعیت تعادل اولیه را تعیین نمود، آنگاه با انجام محاسبات لازم و اعمال بلادرنگ دستورات کنترلی به بازو، می‌توان صفحه فوقانی را در حالت تعادل نگه داشته و حرکات این صفحه و محموله روی آن را از حرکات صفحه پائینی جدا نمود.

گنگ و هاینس در یکی از نخستین فعالیت‌ها برای بکارگیری مکانیزم استوارت در جداسازی ارتعاشات، از یک عملگر خاص با عنوان تر فنول-دی¹ (یک نوع پیژوالکتریک) برای کنترل دقیق سازه‌های فضایی بهره بردند [9]. مکانیزم ساخته شده قادر به جداسازی ارتعاشاتی تا 30 دسی‌بل بوده است. گکسو و همکاران، قابلیت سکوی استوارت در پایدارسازی یک تلسکوپ بسیار بزرگ در برابر اغتشاشات ناشی از باد را مورد بررسی قرار داده‌اند [10]. در این پروژه، صفحه ثابت سکوی استوارت بوسیله تعدادی کابل مرتش حمل می‌گردد که این ارتعاشات نباید به تلسکوپ منتقل شوند. احمد ابوهنیه در رساله‌ی دکترای خود سکویی ساخت که از عملگرهای خطی مغناطیسی بهره می‌برد و هم‌زمان هم برای کنترل وضعیت و جهت دهی تلسکوپ و هم جداسازی آن از ارتعاشات مختلف مورد استفاده قرار می‌گرفت [11]. اسواتوش و همکاران، به بررسی و ساخت یک سکوی استوارت با عملگرهای پیژوالکتریک پرداخته‌اند [12]. در این تحقیق هم جداسازی ارتعاشات و هم اعمال جابجایی و موقعیت‌دهی محدود به دستگاه مد نظر بوده است. در نهایت، رحمت اولابیگ و همکاران، به طراحی بهینه یک سیستم شش درجه آزادی جهت جداسازی فعال ارتعاشات پرداخته‌اند [13]. در این مطالعه از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شده است.

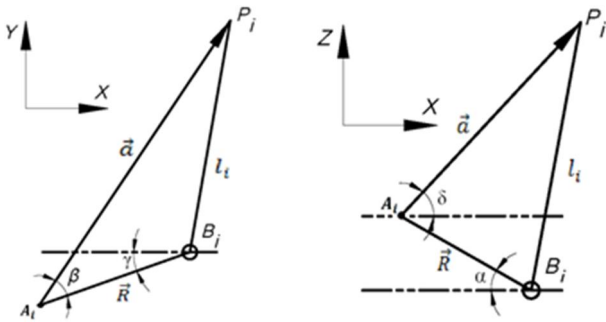
بر خلاف تحقیقات پیشین که عمدتاً به منظور جداسازی فعال ارتعاشات فرکانس بالای دامنه پائین انجام شده‌اند، در این تحقیق حرکات فرکانس پائین اما با دامنه بالا مد نظر بوده است. چنین حرکاتی را بطور مثال می‌توان در وسایل نقلیه دریایی مشاهده نمود. به عنوان نمونه، وسیله‌ای که روی یک قایق قرار دارد متاثر از امواج دریا تحت تاثیر حرکاتی با دامنه بالا و فرکانس پائین است که سکوی استوارت می‌تواند وسیله مناسبی برای جلوگیری از انتقال این حرکات به محموله نصب شده روی آن باشد.

2- Roll
3- Pitch

1- Terfenol-D



شکل 2 دستگاه‌های مختصات و بردارهای تعریف شده روی سکوی استوارت



شکل 3 نحوه قرارگیری بازوی سروو موتورها نسبت به صفحات XY و XZ

$$\vec{a} = a(\cos\delta \cos\beta, \cos\delta \sin\beta, \sin\delta) \quad (6)$$

در معادله‌ی 6، زاویه‌ی γ زاویه نصب هر موتور نسبت به راستای x می‌باشد. زاویه β زاویه‌ی انحراف پایه نسبت به محور z است. حال با توجه به معادله 4، روابط مربوط به اندازه‌ی پایه‌های سکو بسط داده شده و مقدار دوران بازوی هر سروو موتور به دست می‌آید. روابط بسط داده شده بصورت رابطه 7 خواهند بود:

$$\begin{cases} l_x = -R \cos\alpha \cos\gamma + a \cos\delta \cos\beta \\ l_y = -R \cos\alpha \sin\gamma + a \cos\delta \sin\beta \\ l_z = R \sin\alpha \cos\gamma + a \sin\delta \end{cases} \quad (7)$$

سه معادله‌ی بالا دارای سه مجهول δ ، β و α است که هر سه زاویه متغیر می‌باشند. از این سه زاویه تنها زاویه‌ی α قابل کنترل می‌باشد زیرا میزان دوران سروو موتورها، تنها پارامترهای قابل کنترل هستند. برای حل سه معادله‌ی غیرخطی فوق از روش‌های عددی باید استفاده شود.

2-3- حل عددی

در این تحقیق برای حل عددی معادلات غیرخطی از روش نیوتن-رافسون استفاده شده است. طبق این روش، برای دستگاه معادلات خطی بصورت $F(x) = 0$ از رابطه 8 استفاده می‌شود:

$$\vec{x}_{n+1} = \vec{x}_n - \frac{f(\vec{x}_n)}{f'(\vec{x}_n)} \quad (8)$$

که در آن بردار \vec{x}_n بردار پاسخ دستگاه معادله‌ی غیرخطی بوده و برای مساله این تحقیق برابر بردار نشان داده شده در رابطه 9 است:

$$\vec{x}_n = \begin{pmatrix} \alpha \\ \delta \\ \beta \end{pmatrix} \quad (9)$$

برای حل عددی ابتدا معادلات 7 را به صورت تابع 10 بازنویسی می‌کنیم:

$$f = \begin{cases} -R \cos\alpha \cos\gamma + a \cos\delta \cos\beta - l_x = 0 \\ -R \cos\alpha \sin\gamma + a \cos\delta \sin\beta - l_y = 0 \\ R \sin\alpha \cos\gamma + a \sin\delta - l_z = 0 \end{cases} \quad (10)$$

عنوان دستگاه مرجع (دستگاه $O-XYZ$) به صفحه زیرین متصل بوده و دستگاه اینرسی به شمار می‌رود. دستگاه دیگر (دستگاه $O-X'Y'Z'$) به صفحه فوقانی متصل بوده و همراه با آن حرکات انتقالی و دورانی خواهد داشت. این دستگاه مختصات را دستگاه بدنی می‌نامیم.

طبق رابطه 1، بردار T که مبدا دو دستگاه مختصات را به یکدیگر وصل می‌کند، موقعیت خطی مرکز صفحه متحرک را نسبت به دستگاه مرجع مشخص می‌کند:

$$T = [X \ Y \ Z]^T \quad (1)$$

موقعیت زاویه‌ای صفحه متحرک با تعیین وضعیت زاویه‌ای دستگاه بدنی نسبت به دستگاه مرجع مشخص می‌شود. این وضعیت توسط سه زاویه موسوم به زاویه‌ی اوپلر تعیین می‌گردد. از این سه زاویه، دو زاویه غلت (φ) و فراز (θ) نسبت به سطح افقی و زاویه دیگر موسوم به زاویه سمت $^1(\psi)$ نسبت به یک سمت مرجع اندازه‌گیری می‌شوند. برای تبدیل هر بردار از دستگاه بدنی به دستگاه مرجع، از ماتریس تبدیل رابطه 2 استفاده می‌شود [15]:

$$[R]^{oo} = \begin{bmatrix} C_\theta C_\psi & -C_\theta S_\psi + S_\varphi S_\theta C_\psi & S_\theta S_\psi + C_\varphi S_\theta C_\psi \\ C_\theta S_\psi & C_\theta C_\psi + S_\varphi S_\theta S_\psi & -S_\theta C_\psi + C_\varphi S_\theta S_\psi \\ -S_\theta & S_\varphi C_\theta & C_\varphi C_\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در رابطه فوق:

$$C_k = \cos(k), \quad S_k = \sin(k)$$

برای موقعیت دهی به سکو و تعیین میزان جابجایی هر عملگر، باید مختصات و محل قرارگیری مفاصل کروی، عملگرها و پایه‌ها در دستگاه مختصات مرجع مشخص شوند. در شکل 2، نقطه P_i ، موقعیت مکانی مفاصل کروی در صفحه فوقانی و نقطه B_i موقعیت مکانی روتور سروو موتورها روی صفحه زیرین را نشان می‌دهد. طبق این شکل، مختصات بردار q_i نسبت به دستگاه مختصات مرجع با معادله‌ی 3 به دست می‌آید:

$$[q_i]^o = [T]^o + [R]^{oo}[p_i]^o \quad (3)$$

حال می‌توان بردار فاصله از روتور سروو موتورها تا مفصل کروی صفحه بالا برای هر کدام از پایه‌ها را با استفاده از رابطه‌ی 4 به دست آورد:

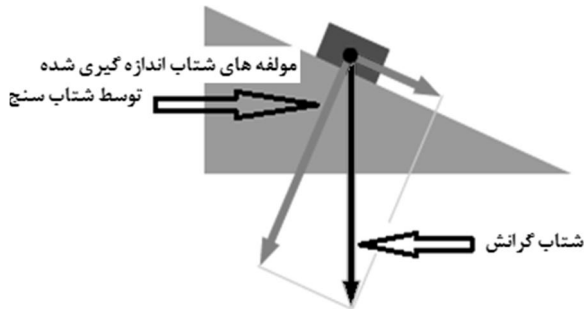
$$[l_i]^o = [T]^o + [R]^{oo}[p_i]^o - [b_i]^o \quad (4)$$

بردار b_i موقعیت مکانی روتور سروو موتورها را در دستگاه مختصات مرجع مشخص می‌کند. در معادله‌ی 4 به ازای $i=1:6$ شش معادله به دست می‌آید. با این شش معادله، طول موثر پایه‌ها برای ایجاد موقعیت مناسب سکو به دست می‌آید. طول موثر، بیانگر اندازه‌ی بازه حرکتی هر عملگر می‌باشد.

2-2- محاسبه میزان دوران سروو موتورها

در بخش قبل روابط مربوط به اندازه‌ی طول پایه‌ها به دست آمد. در این بخش، روابطی سینماتیکی برای مشخص کردن میزان دوران سروو موتورها با توجه به حرکت سکوی فوقانی بدست خواهد آمد. در شکل 3 نحوه‌ی قرارگیری بازوی سروو موتورها و پایه‌ها در صفحات XY و XZ و راستای این بردارها مشخص شده است. در این شکل، R بردار طول بازوی سروو موتور، a طول هر کدام از پایه‌ها و l_i بردار فاصله از روتور سروو موتورها تا مفصل کروی سکوی بالا می‌باشد. بردار A_i نیز نشان‌دهنده فاصله از مبدا تا مفصل بازوپایه i امین سروو موتور است. زاویه α میزان دوران بازوی هر سروو موتور نسبت به خط مبدا (سطح افق) می‌باشد که با کنترل این زاویه برای هر سروو موتور موقعیت سکو کنترل می‌گردد. با توجه به شکل 3 بردارهای R و a به صورت رابطه 5 و 6 نوشته می‌شوند:

$$\vec{R} = R(-\cos\alpha \cos\gamma, -\cos\alpha \sin\gamma, \sin\alpha) \quad (5)$$



شکل 4 نحوه اندازه گیری زاویه شیب توسط سنسور شتاب

$$\begin{aligned} \vec{x}_{k+1} &= f(\vec{x}_k, \vec{u}_k) + \vec{w}_k \\ \vec{z}_k &= g(\vec{x}_k, \vec{u}_k) + \vec{v}_k \end{aligned} \quad (12)$$

که بردار متغیرهای حالت، \vec{u} بردار متغیرهای کنترلی و \vec{z} بردار متغیرهای اندازه گیری است. متغیرهای \vec{w} و \vec{v} به ترتیب بردار نویز فرایند و نویز اندازه گیری بوده و k نیز نشان دهنده گام زمانی است. با تعریف ماتریس های A و H به صورت رابطه 13:

$$A_k = \left. \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} \right|_{\vec{x}_k, \vec{u}_k}, H_k = \left. \frac{\partial g}{\partial \vec{x}} \right|_{\vec{x}_k} \quad (13)$$

معادله ی فیلتر کالمن گسترش یافته به صورت رابطه 14 خواهد بود [17]:

$$\begin{cases} k_k = A_k P_k A_k^T + R_k \\ \hat{x}_{k+1} = f(\hat{x}_k, u_k) + K_k (z_k - g(\hat{x}_k)) \\ P_{k+1} = A_k P_k A_k^T + Q_k - K_k (H_k P_k A_k^T + R_k) K_k^T \end{cases} \quad (14)$$

که K بهره فیلتر کالمن، P ماتریس کواریانس خطای تخمین، و Q و R به ترتیب ماتریس کواریانس نویز فرایند و نویز اندازه گیری می باشند. علامت \wedge روی حروف به معنی متغیر تخمینی می باشد.

3-4- معادلات تخمین زوایا و سرعت های زاویه ای غلت و فراز

از روابط سینماتیکی 15 به عنوان معادلات حالت حاکم استفاده شده است:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} &= p + q \sin \varphi \tan \theta + r \cos \varphi \tan \theta \\ \dot{\theta} &= q \cos \varphi - r \sin \varphi \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن p, q, r سرعت های زاویه ای اندازه گیری شده توسط ژيروسکوپ بوده و زوایای غلت (φ) و فراز (θ) بطور غیر مستقیم توسط شتاب سنسور تعیین می شوند. سنسور شتاب به شدت نسبت به نویز حساس است و ژيروسکوپ نیز دارای بایاس می باشد. از همین رو با استفاده از فیلتر کالمن سعی در جبران ضعف های هر یک از سنسورها با ترکیب اطلاعات آنها در این بستر شده است. معادلات 15 به عنوانی مدلی از سیستم که همواره برقرار است در نظر گرفته می شود که شکل گسسته ی آن بصورت رابطه 16 خواهد بود:

$$\begin{aligned} \varphi_{k+1} &= \varphi_k + \Delta T(p + q \sin \varphi_k \tan \theta_k + r \cos \varphi_k \tan \theta_k) \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + \Delta T(q \cos \varphi_k - r \sin \varphi_k) \end{aligned} \quad (16)$$

به علت بایاس، خروجی ژيروسکوپ با گذشت زمان دارای خطا می شود. به همین جهت بایاس ژيروسکوپ ثابت اما کوپل شده با نویز سفید در نظر گرفته می شود [18]. در نتیجه، روابط 16 بصورت روابط 17 بازنویسی می شود:

$$\begin{aligned} \varphi_{k+1} &= \varphi_k + \Delta T((\omega_{x_k} - b_{x_k}) + (\omega_{y_k} - b_{y_k}) \sin \varphi_k \tan \theta_k + (\omega_{z_k} - b_{z_k}) \cos \varphi_k \tan \theta_k) \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + \Delta T((\omega_{y_k} - b_{y_k}) \cos \varphi_k - (\omega_{z_k} - b_{z_k}) \sin \varphi_k) \\ b_{x_{k+1}} &= b_{x_k} \\ b_{y_{k+1}} &= b_{y_k} \end{aligned} \quad (17)$$

که $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ نشانگر مقادیر سرعت های زاویه ای اندازه گیری شده توسط ژيروسکوپ بوده و بعنوان ورودی در نظر گرفته می شوند. b_x و b_y نیز معرف بایاس ژيروسکوپ در جهات x و y هستند. روابط 17 کاملاً غیرخطی بوده و ابتدا با استفاده از روابط 13 و حول نقطه تعادل (که در این تحقیق وضعیت افقی می باشد) خطی سازی می شوند و سپس در الگوریتم فیلتر کالمن (روابط

مشتق بردار تابع فوق تشکیل یک ماتریس ژاکوبین 3×3 به صورت رابطه 11 می دهد:

$$J = \begin{bmatrix} R \sin \alpha \cos \gamma & -a \sin \delta \cos \beta & -a \cos \delta \sin \beta \\ R \sin \alpha \sin \gamma & -a \sin \delta \sin \beta & a \cos \delta \cos \beta \\ R \cos \alpha \cos \gamma & a \cos \delta & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

با استفاده از رابطه 8 و بصورت تکرار شونده، دستگاه معادلات غیرخطی رابطه 10 در هر گام زمانی حل شده و زاویه دوران هر یک از سرو موتورها بدست می آید.

3- تخمین وضعیت و کنترل حلقه بسته

در جداسازی صفحه فوقانی سکوی استوارت از حرکات صفحه زیرین، لازم است که مقدار این حرکات نسبت به وضعیت مرجع اندازه گیری شوند. همانطور که قبلاً گفته شد، در این تحقیق، جداسازی دو حرکت دورانی غلت و فراز مد نظر می باشد. این دو حرکت دورانی، نسبت به سطح افق اندازه گیری می شوند و بنابراین وضعیت مرجع، سطح افقی (صفحه عمود بر بردار شتاب جاذبه) می باشد. برای تخمین این دو حرکت دورانی و همچنین مشتق آنها یعنی سرعت های زاویه ای متناظر، از سنسورهای ممز استفاده شده است. در این بخش، نحوه تخمین زوایا و سرعت های زاویه ای غلت و فراز توضیح داده می شود.

3-1- اندازه گیری زاویه با استفاده از سنسور شتاب

برای تخمین زاویه و سرعت زاویه ای از ترکیب سنسورهای شتاب و ژيروسکوپ سرعت زاویه ای استفاده شده است. ژيروسکوپ مستقیماً سرعت زاویه ای را اندازه می گیرد اما تخمین زاویه از روی سنسور شتاب بصورت غیر مستقیم انجام می شود. در شکل 4 مفهوم بکار رفته برای تخمین زاویه از روی سنسور شتاب نشان داده شده است. شتاب گرانش همواره عمود بر سطح افق است. سنسور شتاب می تواند شتاب های وارده بر سه محور بدنی خود را اندازه بگیرد. در حالتی که جسم و شتاب سنسور متصل به آن بصورت افقی قرار دارند، شتاب خوانده شده توسط سنسور در یک امتداد برابر شتاب جاذبه (g) و در دو امتداد دیگر برابر صفر خواهد بود. اما هنگامیکه جسم نسبت به سطح افقی زاویه پیدا می کند، شتاب جاذبه مولفه هایی در امتداد محورهای سنسور شتاب پیدا می کند. بدین ترتیب با مقایسه مقدار شتاب محورهای مختلف سنسور شتاب می توان به میزان تغییر زاویه جسم از وضعیت مرجع پی برد [16].

3-2- ترکیب سنسورها با استفاده از فیلتر کالمن

در صورت ایده آل بودن شتاب سنسور و ژيروسکوپ و عاری بودن محیط از هر گونه نویز و اغتشاشات، می توان مستقیماً از سنسور شتاب برای تخمین زاویه و از ژيروسکوپ برای اندازه گیری سرعت زاویه ای استفاده نمود. اما در عمل به هیچ وجه این وضعیت ایده آل وجود ندارد. سنسورهای شتاب بسیار حساس به اغتشاشات خارجی بوده و خود نیز در حالت سکون دارای اندکی نوسان در خروجی هستند. ژيروسکوپ ها نیز دارای خطای بایاس هستند و هنگامیکه از خروجی آنها انتگرال گرفته می شود، منجر به رشد خطای قابل ملاحظه در اندازه گیری ها می شوند. فیلتر کالمن ابزاری کارآمد برای تخمین متغیرهای حالت یک سیستم با استفاده از ترکیب بین معادلات حاکم با اندازه گیری های انجام شده توسط سنسورها است. در این تحقیق، از فیلتر کالمن گسترش یافته برای ترکیب شتاب سنسور با ژيروسکوپ سرعت زاویه ای و تخمین متغیرهای مورد نیاز سیستم کنترلی استفاده شده است.

3-3- الگوریتم فیلتر کالمن گسترش یافته

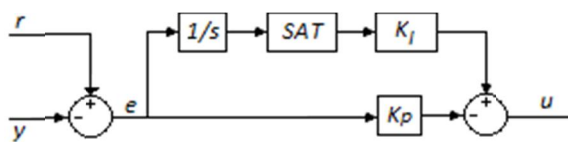
فیلتر کالمن گسترش یافته برای سیستم های غیرخطی بکار می رود. در حالت کلی، معادلات حالت سیستم در وضعیت گسسته بصورت رابطه 12 می باشد:

قرارگیری مفاصل کروی روی محیط دایره‌ای با شعاع 14cm قرار گیرند تا پایه‌ها در زمانی که حرکتی توسط سکو صورت نگرفته، در حالت قائم قرار داشته باشند. در شکل 7، سکوی استوارت ساخته شده نشان داده شده است.

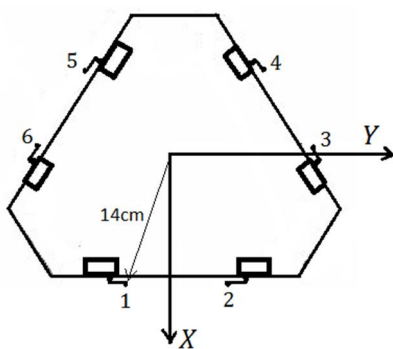
4-2- عملگرهای الکتریکی

همان‌طور که قبلاً نیز مورد اشاره قرار گرفت، در این تحقیق از سروو موتورهای الکتریکی به عنوان عملگرهای سکوی استوارت استفاده شده است. سروو موتورهای مورد استفاده ساخت شرکت تاورپرو² بوده و با وزن 55 گرمی، حداکثر گشتاور 1N.m و حداکثر سرعت 300 درجه بر ثانیه دارند.

بازه حرکت زاویه‌ای سروو موتورها مورد استفاده در سکوی ساخته شده در حدود 130 درجه می‌باشد. با توجه به ابعاد انتخاب شده برای سازه و همچنین محدودیت‌های مختلف حرکتی شامل محدودیت دوران سروو موتورها، محدودیت حرکت مفاصل و نظایر آن، سکوی آزمایشگاهی ساخته شده در این تحقیق دارای ± 4 سانتیمتر حرکت انتقالی در راستای x و y و ± 6 سانتیمتر در راستای z می‌باشد. به همین ترتیب، این سکو از ± 50 درجه حرکت دورانی سمتی و ± 19 درجه حرکت دورانی غلت و فراز برخوردار است. با توجه به این توضیحات، سکوی ساخته شده در این تحقیق توانایی جداسازی حرکات دورانی غلت و فراز تا ± 19 درجه را خواهد داشت.



شکل 5 بلوک دیگرام اصلاح شده کنترل کننده تناسبی-انترگرالی



شکل 6 نحوه چینش سروو موتورها روی صفحه زیرین سکو



شکل 7 نمایی از سکوی استوارت ساخته شده

14) مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدین ترتیب، تخمین مناسبی از وضعیت سکوی استوارت حاصل شده و اثرات نویز و اغتشاش و سایر خطاها به حداقل می‌رسد. لازم به ذکر است مقادیر ماتریس‌های کواریانس نویز فرآیند و نویز اندازه‌گیری (ماتریس‌های R و Q در رابطه 14) با سعی و خطا و به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بهترین تخمین حاصل گردد.

3-5- الگوریتم کنترلی

با اضافه شدن سنسورها به سیستم، وظیفه‌ی حرکت‌دهی به سکو بر عهده‌ی سنسورها خواهد بود. هنگامیکه عاملی باعث حرکت دورانی صفحه زیرین سکوی استوارت گردد کنترل حلقه بسته بلافاصله با فیدبکی که از الگوریتم تخمین وضعیت می‌گیرد، به سروو موتورها دستور حرکت بر طبق زاویه‌ی محاسبه شده با روابط سینماتیکی اما بطور معکوس می‌دهد. بدین ترتیب، صفحه فوقانی سکو در وضعیت مرجع اولیه خود باقی مانده و جداسازی حرکات انجام می‌پذیرد.

با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق رسیدن به ساختاری با پایداری مناسب و دقت بالا بود، تصمیم بر آن شد از کنترل کننده تناسبی-انترگرالی استفاده شود. ساختار تناسبی-انترگرالی دارای یک اشکال عمده می‌باشد که در حالت جهش ناگهانی در حرکت سیستم، انترگرال گیر سعی در رساندن خود به مقدار مطلوب خواهد داشت. طی مسیر رسیدن انترگرال گیر به حالت مطلوب، مقدار انترگرال زیاد خواهد شد. وقتی مقدار انترگرال بزرگ است لازم است مدت زمانی بگذرد تا سیستم به حالت رفتار خطی اولیه خودش بازگردد (بعد از دشوار عمل انترگرال). این پدیده پایان انترگرال¹ نامیده می‌شود. برای اجتناب از این حالت یک اشباع کننده بعد از انترگرال اضافه می‌شود تا مقادیر ماکزیمم و مینیمم آن را محدود کند [19]. شکل 5 بلوک دیگرام اصلاح شده کنترل کننده تناسبی-انترگرالی را نشان می‌دهد.

4- معرفی نمونه آزمایشگاهی

قسمت‌های مختلف سکوی ساخته شده در این پروژه را می‌توان به دو دسته کلی اجزای مکانیکی و اجزای الکترونیکی تقسیم کرد. این اجزا شامل سکوهای زیرین و فوقانی، مفاصل کروی، سروو موتورها، پایه‌ها و سنسورها می‌باشد که در این بخش به اختصار توضیح داده خواهند شد.

4-1- سازه سکو

همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود سکوی پایینی به شکل مثلث ساخته شده است که در آن بازوی سروو موتورها دو به دو با یکدیگر در یک راستا قرار گرفته‌اند. سروو موتورها به نحوی به سکوی زیرین متصل شده‌اند که بطور مثال، بازوی دو سروو موتور 1 و 2 در صفحه yz دوران می‌کند (زاویه‌ی α در شکل 3). به دلیل اینکه حرکت بازوهای سروو موتورها در یک صفحه بوده و یک عامل محدودیت حرکت می‌باشد، لذا از مفاصل کروی استفاده شده تا سکو قابلیت انجام دوران حول هر سه جهت x ، y و z را داشته باشد. در سکوی زیرین، مفاصل کروی بوسیله‌ی پیچ به بازوی سروو موتورها متصل شده و در سکوی بالا در داخل خود سکو جداسازی شده‌اند. مفاصل کروی بالا و پایین به وسیله‌ی یک میله‌ی صلب به هم متصل می‌شوند. بدین ترتیب ساختار کل سکو کاملاً صلب بوده و تنها متغیر، زاویه‌ی دوران سروو موتورها می‌باشد. محل قرارگیری مفاصل کروی در سکوی زیرین که با شماره‌های 1 تا 6 در شکل 6 مشخص شده‌اند، روی دایره‌ای با شعاع 14cm انتخاب شده است. برای ساخت سکوی فوقانی نیز هدف اصلی بر آن بوده که محل

3-4- سنسورها و اجزای الکترونیکی

اجزای الکترونیکی در این تحقیق از سه بخش سنسور، کامپیوتر و برد الکترونیکی رابط تشکیل شده است. سنسور شتاب مورد استفاده در تخمین زوایای غلت و فراز با عنوان ADXL345 ساخت شرکت آنالوگ دیوایسز¹ بوده و قادر است در سه جهت متعامد، حداقل $\pm 0/004$ و حداکثر ± 16 برابر شتاب جاذبه (g) را اندازه بگیرد. این شتابسنج دارای خروجی دیجیتال بوده و از دو پروتکل SPI یا I²C با میکروکنترلر ارتباط برقرار می‌کند. حداکثر رزولوشن این سنسور 13 بیت می‌باشد.

سنسور سرعت زاویه‌ای، ITG3205 نام داشته و یک ژيروسکوپ سه محوره ساخت شرکت اینونسنس² است که توسط آن می‌توان در سه محور متعامد و حداکثر تا $2000 \text{ }^\circ/\text{s}$ را اندازه گیری نمود.

دو سنسور معرفی شده بر روی صفحه زیرین قرار گرفته و جهت اندازه‌گیری میزان انحراف زاویه‌ای آن از وضعیت افقی بکار می‌روند. برای اندازه‌گیری وضعیت زاویه‌ای صفحه فوقانی از یک شتابسنج جداگانه روی این صفحه استفاده شده است.

از یک برد الکترونیکی برای ارتباط بین سنسورها و عملگرها با کامپیوتر استفاده شده است. اطلاعات خام سنسورها توسط این برد اخذ گردیده و به کامپیوتر و نرم‌افزار نوشته شده با ویژوال سی شارپ که ویژه این پروژه تهیه شده است ارسال می‌گردد. تمامی روابط مربوط به تخمین وضعیت توسط فیلتر کالمان، محاسبات سینماتیکی مربوط به سکوی استوارت و همچنین الگوریتم‌های کنترلی در این نرم‌افزار و بصورت بلادرنگ³ پیاده‌سازی شده‌اند. پس از محاسبه زاویه دوران مربوط به هر سروو موتور در کامپیوتر، این اطلاعات به برد الکترونیکی ارسال شده و برد توسط این اطلاعات، شش سروو موتور سکوی استوارت را کنترل می‌کند.

5- نتایج

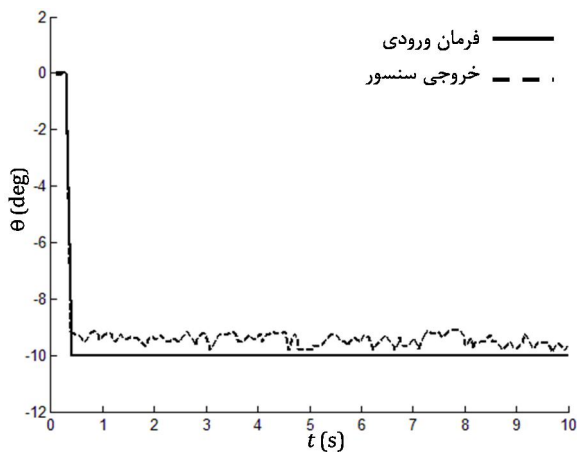
نتایج تست‌های انجام گرفته روی سکوی استوارت ساخته شده، در دو بخش حلقه باز و حلقه بسته ارائه شده است. در بخش حلقه باز، دستورات مشخصی به سکوی فوقانی اعمال گردیده و خروجی حاصله از اندازه‌گیری با دستور داده شده مقایسه شده است. در بخش حلقه بسته، حرکات دورانی مختلفی به سکوی زیرین وارد شده است تا توانایی سیستم کنترلی در جداسازی صفحه فوقانی از حرکات سکوی زیرین بررسی گردد.

5-1- تست‌های حلقه باز

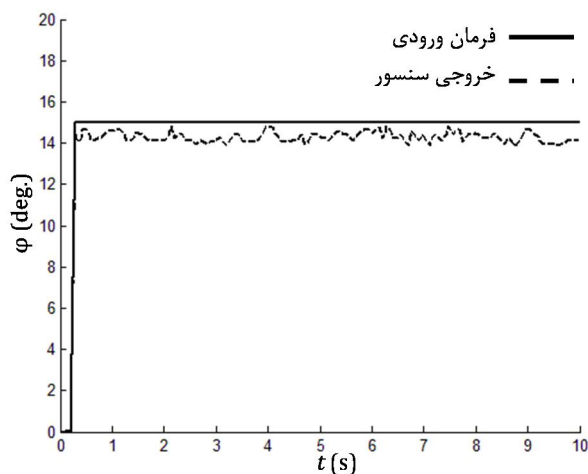
برای بررسی عملکرد صحیح سکوی استوارت ساخته شده در این تحقیق و سنجش میزان توانایی آن در تعقیب دقیق دستورات مختلفی که برای انجام حرکات دورانی و انتقالی سکوی فوقانی صادر می‌شود، تست‌های مختلف حلقه باز انجام پذیرفت. با توجه به اهمیت دو حرکت دورانی غلت و فراز، نتایج مربوط به این دو حرکت ارائه شده است. شکل 8 پاسخ سکوی استوارت ساخته شده به دستور پله فراز به اندازه 10- درجه را نشان می‌دهد. نمودار خط‌چین مربوط به سنسور شتاب نصب شده روی سکوی فوقانی و زاویه تخمین زده شده توسط آن است. ملاحظه می‌شود که سکوی توانسته دستور داده شده را با دقتی در حدود 1 درجه دنبال کند. مشابه همین تست برای حرکت غلت انجام گردید و در آن دستوری به اندازه 15+ درجه بصورت پله به سکوی داده شد. شکل 9 نتیجه بدست آمده را نشان می‌دهد. همانطور که

مشاهده می‌شود در این مود نیز سکوی توانسته با دقتی در حدود 1 درجه دستور داده شده را تعقیب کند. در ادامه برای بررسی رفتار پیوسته سکوی، دستور متغیر از صفر تا 18+ درجه و سپس تا 10- درجه برای حرکت فراز به آن داده شد. در شکل 10 نتیجه حاصله ارائه شده است که نشان از پاسخ مناسب سکوی به دستورات داده شده دارد.

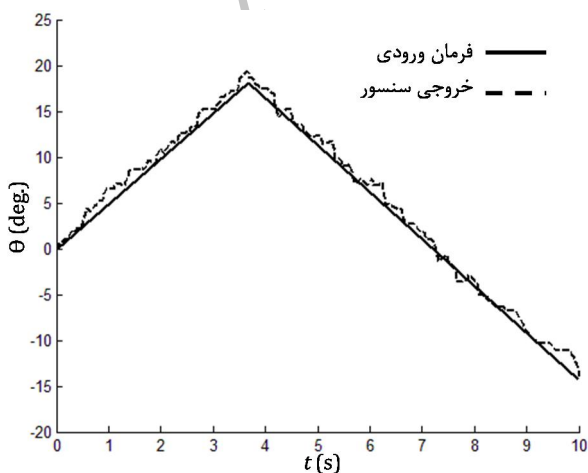
برای بررسی عملکرد فیلتر کالمان، سنسورهای مورد استفاده در سکوی روی یک سطح صاف و افقی قرار داده شده و خروجی آنها مورد بررسی قرار گرفت.



شکل 8 پاسخ حلقه باز سکوی استوارت به ورودی پله فراز به اندازه 10- درجه

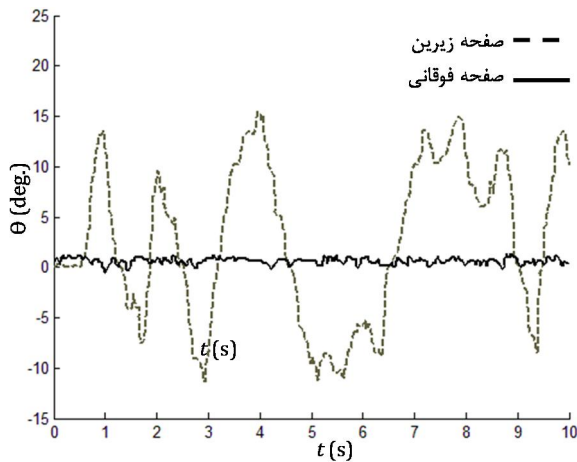


شکل 9 پاسخ حلقه باز سکوی استوارت به ورودی پله غلت به اندازه 15+ درجه

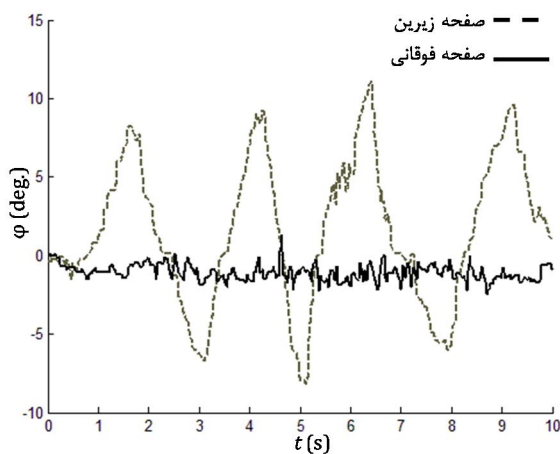


شکل 10 پاسخ حلقه باز سکوی استوارت به ورودی متغیر زاویه فراز

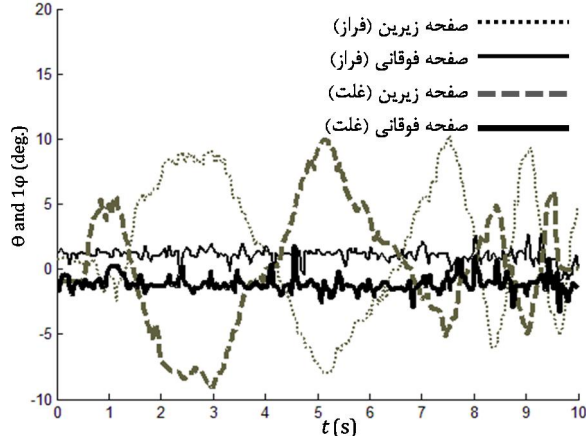
1- Analog Devices
2- Invensense
3- Real-time



شکل 13 جداسازی صفحه فوقانی از حرکات دورانی مود فراز



شکل 14 جداسازی صفحه فوقانی از حرکات دورانی مود غلت



شکل 15 جداسازی صفحه فوقانی از حرکات دورانی همزمان فراز و غلت

همانطور که مشاهده می‌شود، سکوی فوقانی در حالت افقی باقی مانده و صرفاً نوسانات اندکی نزدیک به زاویه صفر داشته است. در این تست، انحراف معیار حرکات اعمالی به صفحه زیرین برابر 8/61 درجه بوده که این مقدار در صفحه فوقانی به 0/36 درجه کاهش یافته است. همان‌طور که در شکل 14 نشان داده شده است، در مود غلت نیز کنترل کننده به خوبی توانسته سکوی فوقانی را از حرکات صفحه زیرین جدا ساخته و انحراف معیار حرکات دورانی را از 5 درجه در صفحه زیرین به 0/5 درجه در صفحه فوقانی برساند.

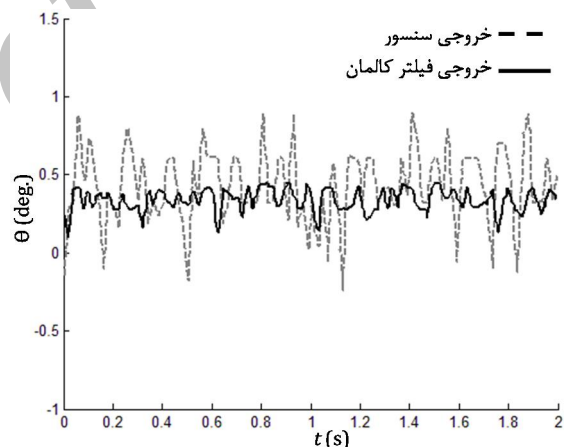
برای بررسی قابلیت سکوی جداسازی همزمان حرکات فراز و غلت، تست جداگانه‌ای انجام شد و در آن حرکات دورانی غلت و فراز بطور همزمان

در شرایط ایده‌آل، زوایای فراز و غلت بدست آمده از خروجی سنسور شتاب در این حالت باید صفر باشند اما در واقعیت، خروجی سنسورها همواره دارای خطا و نویز است. فیلتر کالمان باید بتواند نوسانات ناشی از نویزهای مختلف سنسورها را کاهش دهد. دو شکل 11 و 12 نتایج حاصله را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که در هر دو مود، فیلتر کالمان توانسته دامنه نوسانات تخمین زاویه را کاهش دهد. در مود فراز، انحراف معیار نوسانات از 0/264 به 0/085 و در مود غلت از 0/130 به 0/047 کاهش یافته است.

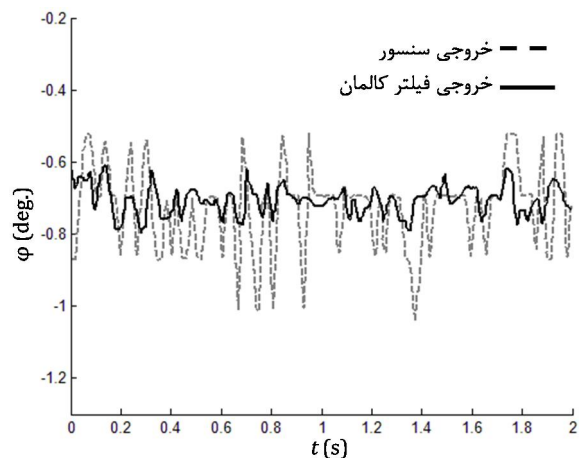
درباره شکل‌های 11 و 12 لازم به ذکر است که به علت قرارگیری سنسورها روی یک سطح ساکن و بدون ارتعاش، نوسانات در خروجی سنسورها در دو تست انجام شده حداقل مقدار را داشته‌اند. در محیط‌های ارتعاشی، خطا و نوسانات تخمین زاویه بسیار بیشتر بوده و تأثیر فیلتر کالمان در چنین موقعیت‌هایی نمایان‌تر خواهد بود.

2-5- تست‌های حلقه بسته

در این بخش، حرکات مختلف دورانی در سه حالت به صفحه زیرین سکوی وارد شد و تأثیر کنترل کننده بر میزان جلوگیری از انتقال این حرکات به صفحه فوقانی بررسی گردید. در تست اول و دوم، دو حرکت دورانی فراز و غلت بصورت مجزا به سکوی وارد گردید. شکل‌های 13 و 14 نتایج بدست آمده را نشان می‌دهند. در شکل 13، حرکات دورانی مختلفی در مود فراز به صفحه زیرین سکوی اعمال شده که دامنه این حرکات بین 15- تا 15+ درجه قرار دارد.



شکل 11 مقایسه خروجی خام زاویه فراز با خروجی فیلتر شده با الگوریتم کالمان در وضعیت صفر درجه



شکل 12 مقایسه خروجی خام زاویه غلت با خروجی فیلتر شده با الگوریتم کالمان در وضعیت صفر درجه

بدیهی است که به سنسورهای دیگری (بطور مثال قطب نما) نیاز خواهد بود. در صورتی که انحراف از وضعیت مرجع، بصورت جابجایی بوده و سکو نیز روی وسیله متحرک قرار داشته باشد اندازه‌گیری میزان انحرافات محموله از وضعیت مرجع و بازخورد آن به سیستم کنترلی جهت جبران دشوار خواهد بود. برای مواقعی که ماموریت محموله، ردیابی یا نشانه‌گیری یک هدف خاص است می‌توان از روش‌هایی نظیر پردازش تصاویر ویدیویی یا تصاویر راداری جهت بازخورد به سیستم کنترلی استفاده نمود.

7- مراجع

- [1] V. E. Gough and S.G. Whitehall, Universal tyre testing machine, *Proc. Ninth International Technical Congress F.I.S.I.T.A.*, 117, May 1962.
- [2] D. Stewart, A platform with six degrees of freedom, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 180(15): 371-386, 1965-66.
- [3] J. Angeles, *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems, Theory, Methods and Algorithms*, Second Edition, New York: Springer, 2006.
- [4] L. W. Tsai, *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*, New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [5] M. Mahboobkhan, M. J. Nategh, S. E. Khadem, Dynamic analysis of a hexapod machine tool table and comparative investigation of the effective forces, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 37, pp. 29-38, 2009. (In Persian)
- [6] H. Azizan, M. Keshmiri, and M. Jafarinassab, Designing a Stable Model-Based Fuzzy Controller for a Novel 6-DOF Parallel Manipulator with Rotary Actuators, *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, (AIM 2011).
- [7] Andrea Mura, Six d.o.f. displacement measuring device based on a modified Stewart platform, *Mechatronics*, Vol. 21, No. 8, pp. 1309-1316, 2011.
- [8] H. Rezvani, and M. Keshmiri, Design of Length Measuring System for Stewart Platform Using New Forward Kinematics Solution, *Proceedings of the 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision*, December, 2010, Singapore.
- [9] Z. Geng and L. S. Haynes, Six-degree-of-freedom active vibration isolation using a Stewart platform mechanism, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 5, pp. 725-744, July 1993.
- [10] R. Gexue, L. Qiuhai, H. Ning, N. Rendong, P. Bo, On vibration control with Stewart parallel mechanism, *Mechatronics*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-13, 2004.
- [11] A. A. Hanieh, *Active isolation and damping of vibrations via Stewart platform*, PhD Thesis, Université Libre de Bruxelles, Active Structures Laboratory, 2003.
- [12] P. Svatoš, Z. Shika, P. Steinbauer, J. Závřel, T. Vampola, M. Valášek, "Synthesis and Implementation of Vibration Suppression by 6 DOF Active Platform", *Bulletin of applied mechanics* Vol. 7, No. 28, pp. 85-90, 2011.
- [13] R. U. Baig and S. Pugazhenthii, Design optimization of an active vibration isolation system, *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 6, No. 30, pp. 6882-6890, 2011.
- [14] B. Dasgupta and T. S. Mruthyunjaya, A Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 33, No. 8, pp. 1135-1152, 1998.
- [15] P. H. Zipfel, *Modelling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics*, Second Edition, pp. 74-75, AIAA, 2007.
- [16] M. Euston, P. Coote, R. Mahony, K. Jonghyuk, and T. Hamel, A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing UAV, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, 2008.
- [17] M. S. Grewal and A. P. Andrews, *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*, Second Edition, pp. 178-181, New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [18] A. O. Kivrak, *Design of control systems for a quadrotor flight vehicle equipped with inertial sensors*, MSc Thesis, Atılım University, 2006.
- [19] E. Davoodi, M. Rezaei, Dynamic modeling, simulation and control of a quadrotor using MEMS sensors' experimental data, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 176-184, 2009. (In Persian)

به صفحه زیرین سکو اعمال گردید. در شکل 15 نتیجه بدست آمده از این تست مشاهده می‌شود. در این تست، انحراف معیار حرکات دورانی فراز از $5/4$ درجه در صفحه زیرین به $0/56$ درجه در صفحه فوقانی کاهش یافته است. همچنین در مود غلت، انحراف معیار حرکات صفحه زیرین برابر $5/1$ درجه بوده که مقدار آن در صفحه فوقانی به $0/69$ درجه رسیده است.

6- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، ساخت یک سکوی استوارت در ابعاد آزمایشگاهی و بررسی تجربی استفاده از آن به عنوان یک جداساز ارتعاش بود که در این زمینه مقولاتی چون راه‌اندازی و کالیبراسیون سنسورها، کاهش اثرات نویز و ارتعاشات بر روی خروجی سنسورها، تخمین زوایا از طریق فیلتر کالمن، ایزولاسیون حرکات فرکانس پایین و دامنه کوتاه سکوی زیرین حول دو محور x و y (حرکت‌های غلت و فراز) و در نهایت کنترل سکوی فوقانی بررسی و عملیاتی شدند. برای جداسازی حرکات صفحه فوقانی سکو از حرکات صفحه زیرین، از یک کنترل کننده‌ی تناسبی-انتگرالی استفاده گردید و بطور عملی نشان داده شد که سکوی ساخته شده قادر است دامنه حرکات دورانی صفحه زیرین را بیشتر از 10 برابر در صفحه فوقانی کاهش دهد.

فعالیت‌های انجام یافته در این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی بوده و بدون در نظر گرفتن محموله و وزن آن روی سکوی فوقانی بوده است. با توجه به نوع عملگرهای استفاده، توانایی سکو در جداسازی حرکات با فرکانس بالا محدود است و افزودن وزنه روی سکوی فوقانی باعث بیشتر شدن این محدودیت خواهد شد. برای پیاده‌سازی عملیاتی، عوامل مختلفی همچون وزن محموله، فرکانس و دامنه حرکات وارده، تعداد درجات آزادی جداسازی، دقت مورد نیاز و ... در طراحی سکو و انتخاب نوع عملگرها و سنسورها باید در نظر گرفته شوند. بطور مثال هر اندازه وزن محموله بیشتر بوده و/یا فرکانس حرکات وارده به آن بیشتر باشد، به عملگرهایی با توان بالاتر نیاز خواهد بود. از سوی دیگر، فرکانس حرکات وارده به تنهایی می‌تواند نوع عملگر انتخابی را تغییر دهد. به عنوان مثال، عملگرهای هیدرولیکی توان بسیار بالایی دارند اما این توان بالا عمدتاً ناشی از قابلیت اعمال نیروی بالای آنها است و سرعت کاری بسیار محدود می‌باشد. بنابراین اگر فرکانس حرکات بالا باشد، نمی‌توان از عملگرهای هیدرولیکی استفاده نمود.

تعداد درجات آزادی از مسائل بسیار مهمی است که نقش تعیین کننده در انتخاب نوع سکو دارد. به عنوان مثال در بسیاری از کاربردها، وسیله متحرک حامل محموله، در جهات مختلف حرکت می‌کند و در صورتیکه به حفظ محموله در جهت خاصی مورد نیاز باشد و میزان انحراف سمتی وسیله متحرک بالاتر از یک مقدار مشخص باشد، سکوی استوارت کلاسیک قادر به تغییر زاویه سمت مورد نظر نخواهد بود و لازم است که در سکوی استوارت کلاسیک تغییرات ابتکاری لحاظ گردد.

وضعیتی که محموله نصب شده روی سکو باید موقعیت و وضعیت زاویه‌ای خود را نسبت به آن حفظ کند وضعیت مرجع نامیده می‌شود. در مورد وضعیت زاویه‌ای، دو زاویه غلت و فراز مشابه هم هستند از این نظر که نسبت به سطح افق (سطح عمود بر شتاب جاذبه) اندازه گرفته می‌شوند. بنابراین اگر هدف، حفظ محموله در وضعیت افقی باشد، همانند این تحقیق باید از سنسورهایی نظیر ژيروسکوپ زاویه و سرعت زاویه‌ای برای اندازه‌گیری میزان انحرافات سکو نسبت به سطح افق استفاده نمود. در مورد زاویه سمت