

Controlling the Sliding Mode of the Earthquake Simulator Table using Adaptive Uncented Kalman Filter

Nima Rajabi Namini¹, Ramazan Havangi², Amir Hossein Abolmasoumi³

¹PhD, Faculty of Electrical Engineering and Computer, University of Birjand, Birjand, Iran

n.rajabi@birjand.ac.ir

² Associate Professor, Faculty of Electrical Engineering and Computer, University of Birjand, Birjand, Iran

* P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran,

Havangi@birjand.ac.ir

³ Associate Professor, Electrical Engineering Department, Arak University, Arak, Iran

a-abolmasoumi@araku.ac.ir

Abstract:

Earthquakes are known as one of the most important dangerous factors in the field of structural engineering. To maintain public safety and reduce damage caused by earthquakes, structural engineers must design structures that can withstand severe earthquakes using advanced technologies. One of the efficient tools in the field of testing the resistance of structures against earthquakes is the use of an earthquake simulator table. In this paper, the stabilization and control of the earthquake simulator has been investigated using the sliding mode controller and adaptive Uncented Kalman filter. To adapt the Kalman filter without trace, the Tendrin Shib algorithm has been used. In the proposed method, the states of the seismic table are estimated using accelerometer, encoder and camera, and then using the states estimated by the adaptive Uncented Kalman filter, the sliding mode controller is used to stabilize and control the closed loop system of the simulator table. The sliding mode controller tracks the reference input, removing external disturbance and noise. The image processing approach has been used in online measurement of the displacement by the camera. The performance of the proposed structure has been investigated under the simulation and earthquake table of Arak University Research Center.

Keywords: Earthquake shaking table, Adaptive uncenced kalman filter, Sliding mode controller, Image processing.

Article Type: Research

Received: 29. 08. 2023

Revised: 08. 08. 2024

Accepted: 16. 09. 2024

Corresponding author: R. Havangi

Corresponding author's address: University of Birjand, Birjand, Iran



1. Motivation of the work

The earthquake simulator table, which is known as the earthquake table, is one of the most widely used equipments in structural engineering. This table is used to test the resistance of the structure against the earthquake and to detect the sensitivity of the structure with different heights to the frequency of ground movement [1]. Using the seismic table, before the construction of the real structure, the necessary tests are performed on the designed model and the response of the structure is checked in smaller dimensions. One of the things that is considered in the construction of seismic tables is the degree of adaptation of the displacement, speed and acceleration simulated with the displacement, speed and acceleration of the real earthquake. Today, the vibration table is widely used in different sizes and applications all over the world. The main goal of a control system is to restore the input acceleration to the table. This input acceleration may have been recorded during a real earthquake, artificially derived from seismological studies, or be a type of wave such as a sine wave and a random wave. Due to the non-linear, unstable and invisible structure of the seismic table, it is not possible to directly feedback the acceleration and design of the controller.

2. Contributions

In the proposed method to overcome the uncertainty of the covariance matrices of system noise Q and measurement noise R , a recursive adaptive method based on the steepest slope is used. In this method, at the same time as the estimation of the state, the covariances of R and Q are modified in the form of recursive relations from the comparison between the theoretical covariance and the actual covariance related to the sequence of invention with a certain logic. Using the modes estimated by adaptive Kalman filter, the sliding mode controller is used to stabilize and control the closed-loop system of the simulator table. The main innovation of this paper includes the following: (1) designing and implementing a sliding mode controller on an earthquake simulator table taking into account the existing disturbances and uncertainties; (2) using a camera and image processing method to measure displacement, as an innovation to compensate for the shortcomings of encoder and accelerometer sensors; (3) designing an adaptive Kalman filter and using the steepest slope algorithm to adapt noise covariances.

3. Procedures

In this article, the stabilization and control method of the earthquake simulator has been investigated using the sliding mode controller and adaptive Kalman filter. The characteristic of the sliding mode controller is to be resistant to unmodeled dynamics. It also keeps the system stable against uncertainties and disturbing input. The current controller is designed to control the speed of the

earthquake. In the proposed method, after extracting the dynamic equations of the earthquake simulator table, the design of the adaptive Kalman filter to estimate the states of the table is discussed. For this purpose, accelerometer sensor, camera and linear encoder have been used. Accelerometers are used to measure table surface acceleration and table input acceleration, and encoders are also used to measure table position and changes in its position. The encoder sensor used in the seismic table, despite its high accuracy, has a mechanical structure. Therefore, it has problems such as depreciation over time and high cost. In addition, since the encoder sensor is a contact sensor, in some tests to check the behavior of the structure due to the applied force, it leads to the destruction of the structure and as a result, the use of these sensors will be expensive. For this reason, in the proposed method, the camera and image processing technique are also used to measure displacement.

4. Findings

To evaluate the proposed method, its performance is examined in simulation environment and laboratory testing. In the simulation environment, the adaptive Kalman filter's performance is assessed for estimating table parameters and noise removal in both open-loop and closed-loop configurations. The practical evaluation of the proposed control structure is then conducted by analyzing the results of implementation on a shaking table, comparing the performance of the sliding mode controller with the adaptive Kalman filter in the control loop and without it, in tracking simulated earthquake characteristics.

5. Conclusion

This article explores a method for seismic stabilization and control using a sliding mode controller and an adaptive Kalman filter. The fastest descent algorithm is used to adapt the Kalman filter. In the proposed method, earthquake shaking states are estimated using accelerometers, encoders, and cameras, and then the estimated states are used by the adaptive Kalman filter and sliding mode controller to stabilize and control the simulated shake table system. Additionally, an online displacement measurement system based on image processing is presented.

For earthquake shake table control, two experiments are designed. In the first experiment, the sliding mode controller uses the adaptive Kalman filter, while in the second experiment, the sliding mode controller does not use the adaptive Kalman filter. The results indicate that the use of the sliding mode controller significantly reduces the earthquake simulation error. This reduction is more noticeable when the sliding mode controller is used with the adaptive Kalman filter, as it effectively reduces tracking errors for different seismic profiles. The experimental results confirm the superiority of the proposed control method compared to other approaches.

کنترل مد لغزشی میز شبیه‌ساز زلزله با استفاده از فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی

نیما رجبی نمینی^۱، رمضان هاونگی^۲، امیرحسین ابوالمعصومی^۳

۱- دکتری، مهندسی برق-کنترل، دانشگاه بیرجند، بیرجند

n.rajabib@birjand.ac.ir

۲- دانشیار، مهندسی برق-کنترل، دانشگاه بیرجند، بیرجند

havangi@birjand.ac.ir

۳- دانشیار، مهندسی برق-کنترل، دانشگاه اراک، اراک

a-abolmasoumi@araku.ac.ir

چکیده: زلزله‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل خطرناک در زمینه مهندسی سازه شناخته شده‌اند. برای حفظ امنیت عمومی و کاهش خسارات ناشی از زلزله، مهندسان سازه باید با استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته، سازه‌هایی را طراحی کنند که بتوانند در مقابل زلزله‌های شدید مقاومت کنند. یکی از ابزارهای کارآمد در زمینه تست مقاومت سازه‌ها در برابر زلزله، استفاده از میز شبیه‌ساز زلزله است. در این مقاله، پایدارسازی و کنترل شبیه‌ساز زلزله با استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی و فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی مورد بررسی قرار گرفته است. برای تطبیق فیلتر کالمن بی‌رد از الگوریتم تدرین شیب استفاده شده است. در روش پیشنهادی، حالت‌های میز لرزه با استفاده از شتاب‌سنج، انکودر و دوربین تخمین زده شده و سپس با استفاده از تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی، کنترل‌کننده مد لغزشی برای پایدارسازی و کنترل سیستم حلقه بسته میز شبیه‌ساز استفاده می‌شود. کنترل‌کننده مد لغزشی سبب ردیابی ورودی مرجع، حذف اغتشاش بیرونی و نویز می‌شود. در اندازه‌گیری جابجایی توسط دوربین به صورت آنلاین از رویکرد پردازش تصویر استفاده شده است. عدم نیاز به تماس مستقیم با میز، قیمت پایین و دقت خوب از مزایای استفاده از دوربین می‌باشد. عملکرد ساختار پیشنهادی تحت شبیه‌سازی و میز لرزه‌ی مرکز تحقیقات دانشگاه اراک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می‌دهند که روش پیشنهادی از کارآمدی خوبی برخوردار است.

کلمات کلیدی: میز شبیه‌ساز لرزه، فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی، کنترل‌کننده مد لغزشی، پردازش تصویر

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر رمضان هاونگی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - بیرجند - بلوار شوکت آباد - دانشگاه بیرند - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

همچنین سیستم را در برابر عدم قطعیت‌ها و ورودی مزاحم پایدار نگه می‌دارد. کنترل‌کننده حاضر برای کنترل سرعت میز لرزه طراحی شده است. علاوه بر این کارایی و صحت عملکرد کنترل‌کننده در مرحله پیاده‌سازی بستگی به اطلاعات موقعیت و شتابی است که توسط سنسورها به دست می‌آیند. اما در حال حاضر دسترسی به اطلاعات موقعیت و شتاب میز لرزه با مشکلاتی نظیر نویز مواجه است که برای غلبه بر نویز از فیلترهای تطبیفی در حلقه کنترلی استفاده می‌شود.

در دهه‌های گذشته از فیلتر کالمن به منظور کاهش نویز اندازه‌گیری، ترکیب و تخمین پارامترهای سیستم استفاده شده است. فیلتر کالمن دارای سه نسخه‌ی مطرح شامل، فیلتر کالمن خطی، فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF)^۲ و فیلتر کالمن بی‌رد (UKF)^۳ می‌باشد [۸]. در مراجع بسیاری از جمله [۹] از فیلتر کالمن خطی به منظور تخمین پارامترهای فضای حالت سیستم میز لرزه استفاده کرده‌اند و در ادامه از پارامترهای تخمینی به منظور پایدارسازی سیستم حلقه بسته و استخراج مشخصات مطلوب بهره گرفته شده است. در مدل غیرخطی میز لرزه به دلیل حساسیت بالای تخمین داده‌ها بهتر است از فیلتر کالمن غیر خطی UKF استفاده شود و سپس از داده‌های تخمینی به منظور طراحی کنترل‌کننده استفاده کنیم.

در مواردی که بیش از یک سنسور اندازه‌گیری وجود داشته باشد و بهبود و تخمین داده‌های اندازه‌گیری شده مهم باشد از ترکیب داده‌های سنسورها استفاده می‌شود. مبحث ترکیب داده‌های سنسورها دارای کاربردهای زیادی در حوزه‌های حمل و نقل، هوا فضا، ردیابی و غیره است [۱۰]. اگر از چندین سنسور برای اندازه‌گیری پارامترهای سیستم استفاده شده باشد، در بحث ترکیب آنها غیر هم فرکانسی و داشتن کواریانس نویز متفاوت سنسورها از مشکلات اساسی به شمار می‌آید [۱۱].

از سویی دیگر در سال‌های اخیر، پژوهش‌های مختلفی در زمینه تخمین حالت توسط فیلتر کالمن بی‌رد در سیستم‌های غیرخطی شده است. یکی از ملزومات فیلتر کالمن بی‌رد اطلاع داشتن از ماتریس‌های کوواریانس نویز سیستم و اندازه‌گیری است. به هر حال عملکرد فیلتر به طور مستقیم بستگی به اطلاعات اولیه ماتریس‌های کواریانس نویز دارد. از آنجایی که مقادیر ثابت ماتریس‌های کواریانس نویز فرآیند و اندازه‌گیری می‌بایست از قبل تعیین شوند، این قضیه زمان‌بر و دارای خطا می‌باشد. در مراجع بسیاری از جمله [۱۲]، [۱۳] و [۱۴] برای غلبه بر نامعین بودن این کواریانس‌ها روش‌های گوناگونی مانند بیزین، روش‌های فازی و عصبی و الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است که هر یک دارای مشکلاتی می‌باشند.

در این مقاله، به بررسی روش پایدارسازی و کنترل شبیه‌ساز زلزله با استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی و فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی پرداخته شده است. در روش پیشنهادی، پس از استخراج معادلات دینامیکی میز شبیه‌ساز لرزه، به طراحی فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی برای تخمین حالت‌های میز پرداخته می‌شود. برای این منظور، از

میز شبیه‌ساز زلزله که به نام میز لرزه^۱ شناخته می‌شود، از پرکاربردترین تجهیزات در مهندسی سازه است. این میز برای تست مقاومت سازه در برابر زلزله و تشخیص حساسیت سازه با ارتفاع‌های متفاوت به فرکانس حرکت زمین استفاده می‌شود [۱]. با استفاده از میز لرزه، قبل از ساخت سازه واقعی، آزمایشات لازم روی مدل طراحی شده انجام شده و پاسخ سازه در ابعاد کوچکتر بررسی می‌شود. یکی از مواردی که در ساخت میزهای لرزه مورد توجه قرار می‌گیرد، میزان انطباق جابجایی، سرعت و شتاب شبیه‌سازی شده با جابجایی، سرعت و شتاب زمین لرزه واقعی است. امروزه، میز لرزه در اندازه و کاربردهای متفاوتی به طور وسیع در سراسر دنیا استفاده می‌شود. یک سیستم شبیه‌ساز لرزه ۲۰۰۰ تنی [۲]، یک میز لرزه‌ی ۶ درجه آزادی [۳] و یک میز لرزه‌ی هیدروالکتریکی [۴]، تنها چند نمونه‌ی مورد استفاده از این تکنولوژی در سطح صنعتی هستند. اصلی‌ترین هدف یک سیستم کنترلی، بازسازی شتاب ورودی به میز می‌باشد. این شتاب ورودی ممکن است در طول یک زلزله واقعی ضبط شده باشد، به طور مصنوعی از مطالعات زلزله شناسی^۲ استخراج شده باشد، یا نوعی از موج‌ها مانند موج سینوسی و موج تصادفی باشد. به دلیل ساختار غیرخطی، ناپایدار و غیرقابل رویت میز لرزه، امکان فیدبک کردن شتاب و طراحی کنترل‌کننده به طور مستقیم وجود ندارد. از طرف دیگر، شتاب خروجی میز لرزه به دلایلی مانند غیرخطی بودن عملگرها (مخصوصاً عملگرهای هیدرولیکی-الکتریکی)، فعل و انفعالات ساختار کنترلی، عدم قطعیت‌ها در مدل‌سازی سیستم، نویز اندازه‌گیری و غیره نیاز به بازسازی و اصلاح دارد و وجود این عوامل، کنترل شتاب برای یک میز لرزه را بسیار مشکل می‌کند. در کاربردهای عملی از فیدبک جابجایی به منظور پایدارسازی سیستم حلقه بسته‌ی میز لرزه استفاده می‌شود ولی به دلیل وجود عدم قطعیت و نویز اندازه‌گیری، عملکرد سیستم مطلوب نخواهد بود. در سیستم میز لرزه داده‌های سه سنسور شتاب سنج، انکودر و دوربین در دسترس هستند ولی شتاب‌سنج در فرکانس‌های پایین خطای زیادی دارد و استخراج شتاب از سنسور جابجایی همواره با خطا همراه است.

در زمینه کنترل میز لرزه نیز پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. در [۵] یک ساختار کنترلی بر اساس فیدبک مستقیم شتاب ارائه شده است، در [۶] یک ساختار کنترلی بر اساس جبران‌سازی دینامیک غیر خطی عملگرها ارائه شده و در [۷] یک روش ساده‌ی کنترلی بر اساس معکوس تابع تبدیل میان ورودی و جابجایی میز لرزه شکل گرفته است.

عدم قطعیت در پارامترهای مدل میز لرزه و همچنین تغییر پارامترهای فیزیکی به لحاظ تغییرات پارامترهای سازه که روی میز نصب خواهد شد، سبب شد که به سمت طراحی یک کنترلر مقاوم برویم. ویژگی کنترل‌کننده مد لغزشی، مقاوم بودن در برابر دینامیک‌های مدل نشده می‌باشد.

۲- مدل سازی میز لرزه

مدل ریاضی سیستم به شرح زیر است. روابط مربوط به موتور الکتریکی در سیستم مختصات d و q با استفاده از تبدیل پارک به شکل معادلات (۱) تا (۳) صورت می پذیرد. سیستم مختصات d و q یک تبدیل کننده ریاضی جهت تحلیل و مدل سازی ماشین های سه فاز است [۱۶].

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}V_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}\omega i_q \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}V_q - \frac{R}{L_q}i_q + \frac{L_d}{L_q}\omega i_d - \frac{\lambda\omega}{L_d} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2}\rho[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (3)$$

در این روابط L_d و L_q اندوکتانس محورهای q و d هستند، R مقاومت سیم پیچ استاتور است، i_d و i_q جریان محورهای q و d می باشند، V_d و V_q ولتاژ محورهای q و d هستند، ω سرعت زاویه ای روتور، λ دامنه ی شار القا شده توسط آهنرباهای دائم روتور بر روی فازهای استاتور، ρ تعداد جفت قطب ها و T_e گشتاور الکترومغناطیسی است. روابط مکانیکی مربوط به شفت موتور به شرح زیر است:

$$\frac{d}{dt}\omega = \frac{1}{J}(T_e - \beta\omega - T_l) \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (5)$$

که در این روابط J ترکیب لختی روتور و بار، β ضریب اصطکاک لزج^۵ دورانی روتور و بار، θ موقعیت زاویه ای روتور، T_l گشتاور بار می باشد. در ادامه مکانیزم بال اسکرو نیز به شکل زیر مدل شده است:

$$T = \frac{FL}{\xi} \quad (6)$$

که در روابط بالا T گشتاور وارد شده بر محور، F نیروی خطی، L گام بال اسکرو و ξ بازدهی می باشد. برای یک بال اسکرو عادی بازدهی در حدود ۹۰ درصد است. معادله (۷) ارتباط بین نیروی محرکه و شتاب زاویه ای شفت موتور را نشان می دهد. و معادله (۸) گشتاور بار وارد شده بر شفت موتور را با توجه به بازدهی بال اسکرو نشان می دهد.

$$F = ML\dot{\omega} \quad (7)$$

$$T_l = \frac{ML^2\dot{\omega}}{\xi} \quad (8)$$

که در این روابط $\dot{\omega}$ شتاب زاویه ای شفت موتور و M جرم کل صفحه است. برای مدل کردن دقیق میز باید وزن صفحه را نیز در معادلات قرار دهیم. اگر سازه ای به جرم m_1 را بر روی میز قرار گیرد جرم کل برابر است با:

$$M = m + m_1 \quad (9)$$

سنسور شتاب سنج، دوربین و انکودر خطی استفاده شده است. شتاب سنج ها برای اندازه گیری شتاب سطح میز و شتاب ورودی به میز و انکودرها نیز برای اندازه گیری موقعیت میز و تغییرات موقعیت آن مورد استفاده قرار می گیرند. سنسور انکودر بکار رفته در میز لرزه با وجود دقت بالایی که دارد، دارای ساختار مکانیکی است. از این رو دارای مشکلاتی از قبیل مستهلک شدن در طول زمان و هزینه بالا است. علاوه بر این، از انجایی که سنسور انکودر یک سنسور تماسی است، در برخی آزمایش ها برای بررسی رفتار سازه در اثر نیروی وارد شده، منجر به تخریب سازه می شود و در نتیجه استفاده از این سنسورها هزینه بر خواهد بود. از این جهت، در روش پیشنهادی، از دوربین و تکنیک پردازش تصویر نیز برای اندازه گیری جابجایی استفاده شده است. هزینه بسیار پایین، دقت بالا و بدون تماسی بودن آن از مزایای این روش است. با استفاده از این سه سنسور در کنار هم، در صورت معیوب شدن هر یک از سنسورها، سیستم می تواند به کار خود ادامه دهد. در فیلتر کالمن بی رد طراحی شده، از الگوریتم تندرین شیب برای تطبیق کواریانس های نویزها استفاده شده است. در واقع، در روش پیشنهادی برای غلبه بر نامعینی ماتریس های کواریانس نویز سیستم Q و نویز اندازه گیری R ، از یک روش تطبیقی بازگشتی مبتنی بر تندرین شیب استفاده شده است. در این روش همزمان با تخمین حالت، کواریانس های Q و R به صورت روابط بازگشتی از مقایسه بین کواریانس نظری و کواریانس واقعی مربوط به دنباله ابداع با منطق خاصی اصلاح می شوند. با استفاده از حالت های تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن بی رد تطبیقی، کنترل کننده مد لغزشی برای پایداری و کنترل سیستم حلقه بسته میز شبیه ساز استفاده می شود. نوآوری اصلی این مقاله شامل موارد زیر است: (۱) طراحی و پیاده سازی یک کنترل کننده مد لغزشی بر روی یک میز شبیه ساز زلزله با در نظر گرفتن اغتشاشات و عدم قطعیت های موجود؛ (۲) استفاده از دوربین و روش پردازش تصویر به منظور اندازه گیری جابجایی، به عنوان یک نوآوری جهت جبران نواقص سنسورهای انکودر و شتاب سنج؛ (۳) طراحی فیلتر کالمن بی رد تطبیقی و بهره گیری از الگوریتم تندرین شیب برای تطبیق کواریانس های نویز. تفاوت این مقاله با مقاله قبلی نویسندگان [۱۵] در افزایش تعداد سنسورها و جایگزینی فیلتر کالمن بی رد تطبیقی به جای فیلتر کالمن توسعه یافته تطبیقی است. علاوه بر این، در این مقاله از کنترل کننده مد لغزشی استفاده شده است. این تغییرات به برطرف شدن چالش های مطرح شده در مقاله قبلی نویسندگان، از جمله شیوه تعیین گروه های فازی، تعداد قوانین، و حجم محاسبات منجر می شود.

ساختار بقیه این مقاله به صورت زیر است: بخش ۲ مدل سازی میز لرزه گفته می شود. در بخش ۳ به کنترل میز لرزه با استفاده کنترل کننده مد لغزشی و فیلتر کالمن تطبیقی بی رد پرداخته شده است. در بخش ۴ پیاده سازی و نتایج بدست آمده از آن، تحت زلزله ی مشخص آورده شده است. نتیجه گیری در بخش ۵ آمده است.

$$s = \omega - \omega_{des} \quad (11)$$

ورودی کنترلی شامل دو عبارت δ_{eq} و δ_{reach} می‌باشد. عبارت ورودی δ_{reach} تضمین می‌کند که حالت‌های سیستم به سطح s برسند و عبارت δ_{eq} هدفش حفظ حالت‌ها بر روی سطح s است. ورودی کنترلی نهایی از جمع این دو عبارت به دست می‌آید:

$$\delta = \delta_{eq} + \delta_{reach} \quad (12)$$

با توجه به شرط لغزش:

$$S\dot{S} < -\eta|S| \quad (13)$$

به دست خواهد آمد:

$$\delta_{reach} = k \operatorname{sgn}(s) \quad (14)$$

که k و η مقادیر ثابت هستند. برای به دست آوردن δ_{eq} باید شرط $\dot{s} = 0$ برقرار شود. بنابراین خواهیم داشت:

$$\dot{s} = \dot{\omega} - \dot{\omega}_{des} = 0 \quad (15)$$

با جاگذاری رابطه (۴) در رابطه (۱۵) داریم:

$$\dot{s} = \frac{1}{J}(T_e - \beta\omega - T_l) - \dot{\omega}_{des} = 0 \quad (16)$$

برای به دست آوردن δ_{eq} که در اینجا گشتاور الکتریکی لازم می‌باشد، با قرار دادن رابطه (۱۶) برابر صفر داریم:

$$\delta_{eq} = \beta\omega + T_l + j\dot{\omega}_{des} \quad (17)$$

یکی از معایبی که در روش کنترل مد لغزشی وجود دارد، بروز وزوز است که به دلیل غیر پیوسته بودن قانون کنترلی حول سطح $s=0$ به وجود می‌آید. برای بهبود عملکرد کنترل کننده در عمل از تابع $\operatorname{sat}(s/\varphi)$ به جای تابع $\operatorname{sgn}(s)$ استفاده می‌شود. بنابراین قانون کنترلی به صورت زیر خواهد بود.

$$\delta = \beta\omega + T_l + j\dot{\omega}_{des} - k \operatorname{sat}(s/\varphi) \quad (18)$$

که در آن φ ضخامت لایه مرزی است و با تنظیم آن می‌توان وزوز را کاهش داد.

۳-۲- فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی

مدل غیر خطی میز لرزه را در حالت کلی می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$x_k = f(x_{k-1}) + w_{k-1} \quad (19)$$

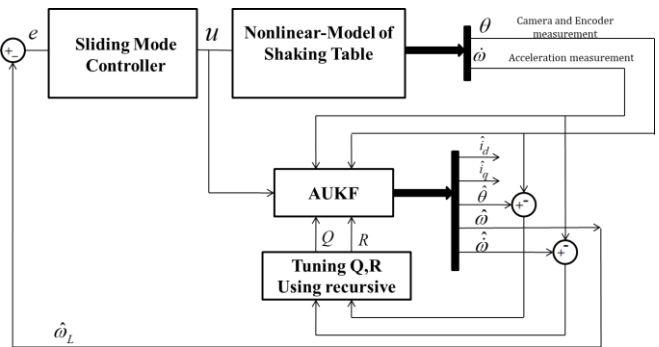
$$y_k = h(x_k) + v_k \quad (20)$$

در این روابط $x_k \in R^n$ بیانگر پارامترهای فضای حالت، $y_k \in R^m$ داده‌های اندازه‌گیری شده، $w_{k-1} \sim N(0, Q_{k-1})$ نویز مدل، $v_k \sim N(0, R_k)$ نویز اندازه‌گیری، f سیستم غیر خطی مورد نظر و h مدل اندازه‌گیری است [۱۸]. در میز لرزه، بردار حالت و خروجی به صورت زیر تعریف می‌شود:

۳- کنترل میز لرزه با استفاده کنترل کننده مد

لغزشی و فیلتر کالمن تطبیقی بی‌رد

شکل ۱ بلوک دیاگرام کلی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود اطلاعات سنسورهای انکودر خطی، دوربین و شتاب‌سنج وارد فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی شده است و سپس تمام حالت‌های سیستم تخمین زده می‌شود. از سرعت خطی تخمین زده شده توسط فیلتر $\hat{\omega}_L$ فیدبک گرفته و از سرعت خطی مرجع ω_{Lr} (سرعت خطی زلزله چالفاخت و کوبه به عنوان ورودی مطلوب) کم شده و خطای محاسباتی وارد کنترل کننده مد لغزشی می‌شود. دقت شود که سرعت زاویه‌ای موتور و سرعت خطی رفت و برگشت میز لرزه با ضرایب عددی به هم مرتبط می‌شوند. در ادامه هر کدام از قسمت‌های روش پیشنهادی تشریح می‌گردد.



شکل (۱): بلوک دیاگرام فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی و کنترل کننده مد لغزشی برای کنترل سرعت میز لرزه

۳-۱- کنترل کننده مد لغزشی

دلیل استفاده از کنترل کننده مد لغزش در این پژوهش، ردیابی شتاب و سرعت مرجع است. این کنترل کننده به دلیل دارا بودن قوام مناسب و همچنین امکان پیاده‌سازی بالا، مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷]. نحوه‌ی عملکرد کنترل کننده میز لرزه به این گونه است که متناسب با خطای بین پروفیل زلزله مرجع با پروفیل زلزله شبیه‌سازی شده توسط میز لرزه، فرمان کنترلی برای کاهش خطا به عملکرد آن فرستاده می‌شود. در ادامه به طراحی کنترل کننده برای سیستم مدل شده در مختصات d و q پرداخته می‌شود. حال کنترل کننده مد لغزشی برای کنترل سرعت سیستم میز لرزه طراحی می‌شود. سطح لغزش به صورت زیر بیان می‌شود:

$$s(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \alpha\right)^{n+1} \tilde{x} \quad (10)$$

که در آن $\tilde{x}(t) = \omega - \omega_{des}$ خطای ردیابی بین سرعت ω و سرعت مطلوب ω_{des} با توجه به زلزله مرجع می‌باشد. همچنین n درجه سیستم و α یک ثابت مثبت است. بنابراین سطح لغزش برابر است با:

در یک سطر یا به عبارتی تعداد ستون‌ها است. با در اختیار داشتن مختصات مرکز علامت در هر فریم از تصویر، جابجایی میز بر حسب تعداد پیکسل‌ها محاسبه می‌شود. با این حال، هدف نهایی تعیین جابجایی میز بر حسب میلی‌متر است. بنابراین، لازم است ابعاد هر پیکسل بر حسب میلی‌متر تعیین شود. برای این منظور، ابتدا با توجه به ابعاد علامت مشکی‌رنگ و تعداد پیکسل‌هایی که در تصویر اشغال می‌کند، می‌توان ابعاد هر پیکسل را به میلی‌متر محاسبه کرد.



شکل (۲): دوربین مورد استفاده جهت اندازه‌گیری جابجایی میز لرزه

تفاوت فیلتر کالمن بی‌رد با فیلتر کالمن توسعه یافته در آن است که از جنبه آمار به مورد تخمین می‌پردازد. در این نوع از فیلتر توزیع تخمین زده می‌شود. در حالت کلی برای آنکه یک توزیع احتمالی مشخص شود نیاز به دانستن ممان‌های آن تا مرتبه بی‌نهایت وجود دارد؛ حال آنکه در این نوع از فیلتر، ممان مرتبه اول، میانگین و ممان مرتبه دوم تخمین زده می‌شود.

این فیلتر به جای خطی سازی معادله‌ی دیفرانسیل و سپس استفاده از روش کالمن کلاسیک برای تخمین داده‌ها، از تغییر فرم بی‌رد^۶ برای ایجاد مقادیر متوسط و کواریانس‌ها به طور مستقیم استفاده می‌کند. مراحل پیش‌بینی و به‌روزرسانی در فیلتر کالمن بی‌رد به شرح زیر است: در گام نخست، نقاط سیگما به صورت زیر تولید می‌شوند.

$$X = \left[\bar{X} \quad \bar{X} + \sqrt{L + \lambda} \sqrt{P_x} \quad \bar{X} - \sqrt{L + \lambda} \sqrt{P_x} \right] \quad (25)$$

که X یک ماتریسی از نقاط سیگما را تشکیل می‌دهد. $\bar{X}$ و P_x به ترتیب میانگین پیشین و کواریانس از متغیر x هستند. در این روش، برای هر یک از حالت‌های سیستم یک سری نقاط ایجاد می‌شود که به آن‌ها نقاط سیگما گفته می‌شود. در نهایت، نقاطی انتخاب می‌شوند که شامل کمترین مربع خطا هستند. البته، همان‌طور که مشخص است، نیاز به محاسبه ریشه دوم ماتریس وجود دارد. روشی که برای این منظور توصیه می‌شود، استفاده از روش محاسباتی چالسکی^۷ است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sqrt{P_x} = P_x P_x^T \quad (26)$$

$$x_k = [i_d, i_q, \theta, \omega, \dot{\omega}]^T$$

$$y_k = \begin{bmatrix} y_{Encoder} \\ y_{Camera} \\ y_{Acceleration} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \theta \\ \omega \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{Encoder} \\ r_{camera} \\ r_{Acceleration} \end{bmatrix} \quad (21)$$

خروجی سیستم توسط سه سنسور انکودر و دوربین و شتاب‌سنج با مقدار نویزهای متفاوت $r_{Acceleration}$ و $r_{Encoder}$ و r_{camera} در دسترس است. نحوه اندازه‌گیری جابجایی با استفاده از پردازش تصویر توضیح داده می‌شود. هدف از پردازش تصویر در این پژوهش، اندازه‌گیری پاسخ جابجایی صفحه متحرک میز لرزه است. برای این منظور یک صفحه به رنگ پس زمینه سفید که در وسط آن علامتی مستطیل شکل به رنگ مشکی با ابعاد مشخص و معلوم به عنوان هدف مورد نظر برای ردیابی بر روی میز نصب شده است. یک دوربین ۳۰ فریم نیز در فاصله مشخص از صفحه هدف قرار داده شده است. تصویر ورودی، تصویری سیاه و سفید است و هر پیکسل مقداری بین ۰ تا ۲۵۵ دارد. ماتریس تصویر توسط رابطه زیر تشکیل می‌شود:

$$I(x, y, t) = I(x + u, y + v, t + dt) \quad (22)$$

در این رابطه I ماتریس تصویر و u و v بیانگر جابجایی پیکسل هستند. الگوریتم پردازش تصویر در هر ستون به دنبال پیکسل‌هایی هست که مقداری کمتر از مقدار آستانه دارند. مقدار آستانه مقداری است که مستطیل مشکی را از پس زمینه تصویر جدا می‌کند. هر ستون که در آن تعداد پیکسل‌های با مقدار کمتر از آستانه نزدیک به تعداد پیکسل‌های عرض مستطیل مشکی رنگ باشد از مختصات مکانی آن پیکسل‌ها میانگین گرفته می‌شود و محاسبات عمودی در آن ستون پایان می‌پذیرد. عدد به دست آمده از این میانگین مختصات مرکز علامت مشکی در راستای عمودی است. همین روش برای به دست آوردن مرکز افقی علامت نیز به کار می‌رود. بنابراین با داشتن مختصات مرکز علامت در هر فریم از تصویر جابجایی میز به دست می‌آید. رابطه (۲۲) این فرآیند را نشان می‌دهد.

$$y = \frac{\sum_{i \in [0, R]} \mathbb{I}[I(i, y_n) < T]}{\sum_{i \in [0, R]} \mathbb{I}[I(i, y_n) < T]} \quad (23)$$

در رابطه فوق y مختصات مرکز هدف در راستای عمودی است. مرکز هدف در راستای افقی نیز به همین روش به دست می‌آید. بنابر این با به دست آوردن مرکز علامت (مستطیل مشکی) در راستای عمودی و افقی جابجایی میز θ محاسبه می‌شود. R تعداد پیکسل‌های موجود در یک ستون و T مقدار آستانه و y_n نیز ستون‌هایی است که باید پردازش شود و از رابطه (۲۴) به دست می‌آید.

$$y_n = \sum_{j=1}^n \frac{C \times j}{n} \quad (24)$$

در اینجا، با توجه به ابعاد تصویر و مستطیل سیاه‌رنگ، تصویر به ۸ قسمت تقسیم می‌شود، به‌طوری که در رابطه فوق، n برابر ۸ در نظر گرفته شده است. همچنین، C نشان‌دهنده تعداد پیکسل‌های موجود

کواریانس خروجی و P_k^{xy} کواریانس بین حالت و خروجی است. ψ ماتریس نقاط سیگمای خروجی است. در این پژوهش از یک دوربین ساده استفاده شده است. فاصله بهینه دوربین تا هدف مورد ردیابی ۲۵ سانتیمتر و طول علامت مورد ردیابی نیز ۴ سانتیمتر است.

همچنین بردار نویز سیستم $w_k \sim (0, Q_k)$ یک نویز گوسی سفید با میانگین صفر و کواریانس $Q_k = E[w_k w_k^T]$ می باشد که هم بعد با بعد بردار حالت سیستم است.

$$Q_k = \text{diag}[q_k^1 \quad q_k^2 \quad q_k^3 \quad q_k^4 \quad q_k^5] \quad (31)$$

نویز اندازه گیری $v_k \sim (0, R_k)$ یک نویز سفید با میانگین صفر و کواریانس $R_k = E[v_k v_k^T]$ می باشد و اندازه گیری ها توسط سنسورهای انکودر و دوربین و شتاب سنج جمع آوری شده است.

$$R_k = \text{diag}[r_k^1 \quad r_k^2 \quad r_k^3] \quad (32)$$

در فیلتر کالمن باید از ماتریس های کواریانس نویز سیستم Q و کواریانس نویز اندازه گیری R اطلاع دقیق داشت. برای رسیدن به این هدف از روش های تطبیقی استفاده می شود.

۳-۲-۳- روش تطبیق کواریانس مبتنی بر تندترین شیب

به منظور ارائه راهکاری برای غلبه بر نامعینی کواریانس های نویز، ابتدا اختلاف حاصل از اندازه گیری ها به صورت زیر تعریف می شود:

$$r_k^z = y_k - \hat{y}_{k|k-1} \quad (33)$$

کواریانس واقعی باقی مانده رابطه فوق با میانگین گیری از این دنباله طبق رابطه زیر تخمین زده می شود [۱۹]:

$$C_k^r = \frac{1}{M} \sum_{i=k-M+1}^k r_i^z r_i^{z'} \quad (34)$$

در این رابطه M یک بازه از تعداد خاصی از دنباله برای تخمین است. حال با در دست داشتن کواریانس واقعی C_k^r و نظری P_k^{yy} سیستم تابع هزینه به شکل زیر تعریف می شود:

$$J_k = \frac{1}{2} \text{tr} \left[\left(P_k^{yy} - C_k^r \right) \left(P_k^{yy} - C_k^r \right)^T \right] \quad (35)$$

بنابراین برای کمینه کردن تابع هزینه باید کواریانس واقعی و نظری با هم برابر باشند، در غیر این صورت اگر کواریانس های نویز سیستم و اندازه گیری با مقدار واقعی خود متفاوت باشد بین این دو کواریانس اختلاف ایجاد می شود. الگوریتم تطبیق برای کواریانس نویز سیستم و اندازه گیری به صورت زیر است:

$$q_k^n = \left| \lambda_{q,k}^n q_{k-1}^n + \mu_{q,k}^n \right| \quad (36)$$

$$r_{k+1}^m = \left| \lambda_{r,k+1}^m r_k^m + \mu_{r,k+1}^m \right| \quad (37)$$

هنگامی که نقاط سیگما تولید شد، هر نقطه از طریق تابع غیر خطی f در رابطه (۱۹) به دست می آید، و آن ها را در ماتریس جدیدی به نام $X_{k|k-1}^{(i)}$ که ماتریسی از تبدیل نقاط سیگما است قرار می گیرند.

$$X_{k|k-1}^{(i)} = f(X_{k-1}^{(i)}, u_{k-1}) \quad i=0,1,\dots,2L \quad (27)$$

در تبدیل نقاط سیگما از زیرنویس $k|k-1$ استفاده می شود، این امر بدان معنی است که این مقدار پیش بینی شده از نقاط سیگما بر اساس اطلاعات به دست آمده از مرحله زمانی گذشته است. توجه شود که در تمامی روابط بالا نویس (i) نشان دهنده ستون i ام ماتریس است.

۳-۲-۱- پیش بینی

$$\hat{x}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2L} \eta_i^m x_{k|k-1}^{(i)} \\ P_{k|k-1} = Q_{k-1} + \sum_{i=0}^{2L} \eta_i^c \left(x_{k|k-1}^{(i)} - \hat{x}_{k|k-1} \right) \left(x_{k|k-1}^{(i)} - \hat{x}_{k|k-1} \right)^T \quad (28)$$

که $\hat{x}_{k|k-1}$ و $P_{k|k-1}$ به ترتیب تخمین بردار حالت و کواریانس خطای تخمین قبل از اندازه گیری است و $X_{k|k-1}^{(i)}$ ماتریسی از تبدیل نقاط سیگما است. η^m و η^c به ترتیب میانگین و کواریانس وزن های هستند که بر روی نقاط سیگما قرار می گیرند. مرحله بعد، انتقال نقاط سیگما از طریق تابع مشاهدات می باشد.

$$\psi_{k|k-1}^{(i)} = h(X_{k|k-1}^{(i)}, u_k) \quad i=0,1,\dots,2L \quad (29)$$

که ψ ماتریس نقاط سیگمای خروجی است. این نقاط سیگمای خروجی سپس برای محاسبه $\hat{y}_{k|k-1}$ خروجی پیش بینی شده مورد استفاده قرار می گیرند.

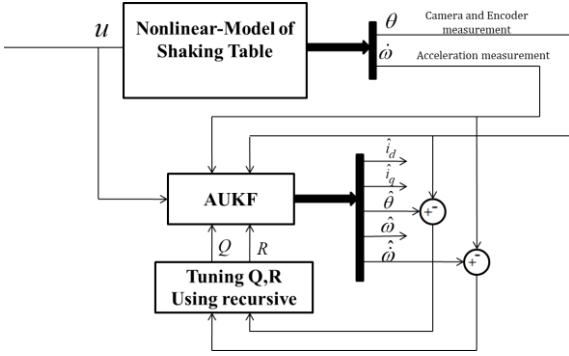
۳-۲-۲- بروزرسانی

$$\hat{y}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2L} \eta_i^m \psi_{k|k-1}^{(i)} \\ P_k^{yy} = R_k + \sum_{i=0}^{2L} \eta_i^c \left(\psi_{k|k-1}^{(i)} - \hat{y}_{k|k-1} \right) \left(\psi_{k|k-1}^{(i)} - \hat{y}_{k|k-1} \right)^T \\ P_k^{xy} = \sum_{i=0}^{2L} \eta_i^c \left(x_{k|k-1}^{(i)} - \hat{x}_{k|k-1} \right) \left(\psi_{k|k-1}^{(i)} - \hat{y}_{k|k-1} \right)^T \\ k_k = P_k^{xy} (P_k^{yy})^{-1} \\ \hat{x}_k = \hat{x}_{k|k-1} + k_k \left(y_k - \hat{y}_{k|k-1} \right) \\ P_k = P_{k|k-1} - k_k P_k^{xy} k_k^T \quad (30)$$

که $\hat{x}_k$ و P_k به ترتیب تخمین بردار حالت و کواریانس خطای تخمین بعد از اندازه گیری است. K_k بهره فیلتر و P_k^{xy} ماتریس

$$\begin{aligned} \gamma_0: \beta_k &\leq x_{\alpha,r}^2, & \forall k \\ \gamma_1: \beta_k &\leq x_{\alpha,r}^2, & \exists k \end{aligned} \quad (44)$$

با توجه به رابطه فوق تا زمانی که شرط γ_0 برقرار است، R_k تطبیق داده می‌شود و در غیر اینصورت، Q_k تطبیق داده می‌شود. ساختار کنترلی مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۳): ارتباط موازی بین سیستم و فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی

۴- نتایج

برای ارزیابی روش پیشنهادی، عملکرد آن در محیط شبیه‌سازی و تست آزمایشگاهی بررسی می‌شود. در محیط شبیه‌سازی بخش ۴-۱ ابتدا در حالت حلقه باز و بدون وجود کنترل‌کننده مطابق شکل (۳) و سپس در حالت حلقه بسته با وجود کنترل‌کننده، عملکرد فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی برای تخمین پارامترهای میز و حذف نویز ارزیابی می‌شود. در بخش ۴-۲ به منظور ارزیابی عملی ساختار کنترلی ارائه شده به بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی بر روی میز لرزه، مقایسه‌ای بین عملکرد کنترل‌کننده مد لغزشی در حضور فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی در حلقه کنترلی و بدون حضور آن در ردیابی مشخصات زلزله شبیه‌سازی شده انجام شده است.

۴-۱- نتایج شبیه‌سازی

ابتدا مطابق شکل (۳) در حالت حلقه باز و بدون وجود کنترل‌کننده عملکرد فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی برای تخمین پارامترهای میز $[d \ i_q \ \theta \ \omega \ \dot{\omega}]^T$ ارزیابی می‌شود. ورودی سیستم حلقه باز (شامل درایور و موتور) سرعت خطی حرکت زمین است که در زلزله چالفانت ثبت شده است. خروجی سیستم توسط سه سنسور انکودر، دوربین و شتاب‌سنج با مقدار نویزهای متفاوت اندازه‌گیری می‌شود. پارامترهای مورد نیاز میز برای شبیه‌سازی مطابق جدول (۱) انتخاب شده‌اند. در این جدول پارامترهای m و m_1 به ترتیب جرم صفحه و سازه به صورت دستی وزن و اندازه‌گیری شده‌اند. پارامترهای L_q ، L_d ، R ، ρ ، λ ، β ، j مربوط به موتور الکتریکی و پارامترهای ξ و L مربوط به بال اسکرو می‌باشند که از ورق مشخصات موتور الکتریکی و بال اسکرو تعیین شده‌اند. جهت کسب اطلاعات کاملتر در این زمینه به

در این رابطه q_{k-1}^n کواریانس تطبیقی نویز سیستم و r_k^m کواریانس تطبیقی نویز اندازه‌گیری است. پارامترهای $\mu_{q,k}^n$ ، $\lambda_{q,k}^n$ ، $\mu_{r,k+1}^m$ ، $\lambda_{r,k+1}^m$ با استفاده از قاعده‌ی تندترین شیب باید به گونه‌ای اصلاح شوند که تابع هزینه کمینه شود. برای این کار از روابط زیر استفاده می‌شود [۲۰]:

$$\begin{aligned} \lambda_{r,k+1}^m &= \lambda_{r,k}^m - \eta_k^R r_{k-1}^m \cdot \text{sgn} \left(\lambda_{r,k}^m r_{k-1}^m + \mu_{r,k}^m \right) \\ &\times \text{tr} \left(\frac{\partial R}{\partial r_k^m} \left(P_k^{yy} - C_k^r \right) \right) \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \mu_{r,k+1}^m &= \mu_{r,k}^m - \eta_k^R \cdot \text{sgn} \left(\lambda_{r,k}^m r_{k-1}^m + \mu_{r,k}^m \right) \\ &\times \text{tr} \left(\frac{\partial R}{\partial r_k^m} \left(P_k^{yy} - C_k^r \right) \right) \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{q,k}^n &= \lambda_{q,k-1}^n - \eta_k^Q q_{k-2}^n \cdot \text{sgn} \left(\lambda_{q,k-1}^n q_{k-2}^n + \mu_{q,k-1}^n \right) \\ &\times \text{tr} \left(H_k \frac{\partial Q}{\partial q_{k-1}^n} H_k^T \left(P_k^{yy} - C_k^r \right) \right) \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \mu_{q,k}^n &= \mu_{q,k-1}^n - \eta_k^Q \cdot \text{sgn} \left(\lambda_{q,k-1}^n q_{k-2}^n + \mu_{q,k-1}^n \right) \\ &\times \text{tr} \left(H_k \frac{\partial Q}{\partial q_{k-1}^n} H_k^T \left(P_k^{yy} - C_k^r \right) \right) \end{aligned} \quad (41)$$

در روابط فوق η_k^Q و η_k^R پارامترهای آموزش هستند که به صورت تجربی انتخاب می‌شوند و تابع sgn تابع علامت است. با توجه به رابطه (۳۲) یک ماتریس مربعی با ابعاد m است و نیز با

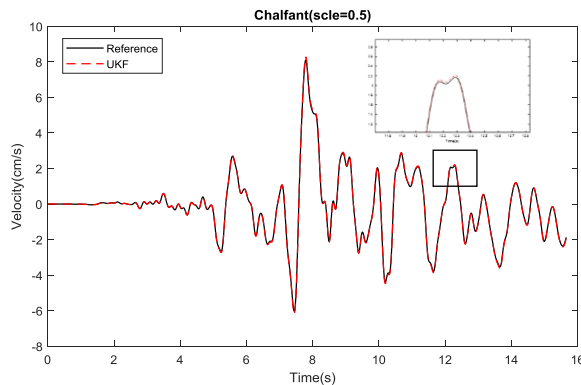
با توجه به رابطه (۳۱)، این یک ماتریس مربعی با ابعاد n است. در ادامه، برای تطبیق هم‌زمان ماتریس‌های Q و R و به‌منظور جلوگیری از ناپایداری فیلتر، مسئله تطبیق این ماتریس‌ها به تشخیص خطا مرتبط می‌شود و به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\beta_k = e_k^T (P_k^{yy} + R_k) e_k \quad (42)$$

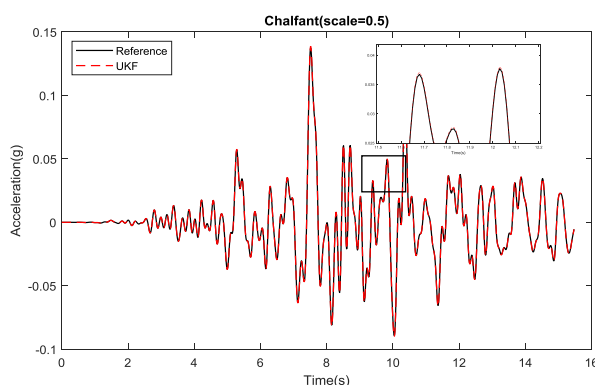
رابطه فوق یک تابع با توزیع احتمالی x^2 و درجه آزادی τ است. مقدار τ برابر با ابعاد بردار اندازه‌گیری است. حال به کمک رابطه زیر مقدار α به عنوان سطح اطمینان تعیین می‌شود:

$$P(x^2 > x_{\alpha,r}^2) = \alpha; \quad 0 < \alpha < 1 \quad (43)$$

در این رابطه $x_{\alpha,r}^2$ مقدار آستانه می‌باشد. در نهایت برای استفاده از روابط (۳۶) و (۳۷) جهت تطبیق هم‌زمان ماتریس‌های کواریانس نویز سیستم و اندازه‌گیری از رابطه زیر استفاده می‌شود:

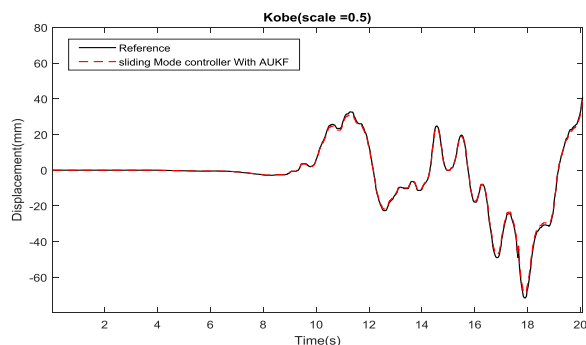


شکل (۵): مقدار واقعی و تخمین زده شده $\dot{w}$ توسط فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی



شکل (۶): مقدار واقعی و تخمین زده شده $\ddot{w}$ توسط فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی

حال مطابق شکل (۱) عملکرد حلقه بسته سیستم در حضور کنترل-کننده مد لغزشی طراحی شده و فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی در حلقه کنترلی در ردیابی مشخصات زلزله شبیه‌سازی شده (زلزله کوبه) ارزیابی می‌شود. شکل‌های (۷) تا (۹) به ترتیب مقادیر تخمین زده شده پارامترهای جابجایی مرجع، سرعت مرجع و شتاب مرجع توسط فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی و مقدار واقعی‌شان نشان داده شده است. در هر شکل مقدار مرجع با مقادیر تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی مقایسه شده‌اند. مطابق نتایج بدست آمده ردیابی ورودی مرجع به ازای فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی به خوبی صورت گرفته است.



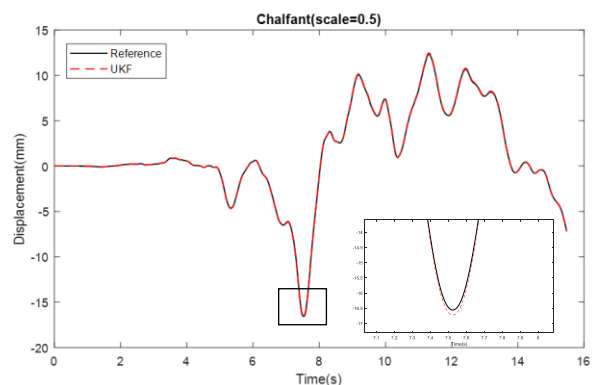
شکل (۷): ورودی جابجایی مرجع و مقادیر تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی در حضور کنترل‌کننده

مرجع [۱۵] مراجعه شود. با توجه به اینکه هدف از بهینه‌سازی کاهش هم‌زمان خطای ردیابی جابجایی و شتاب زلزله مطابق شکل (۳) است، داده‌های انکودر، دوربین و شتاب‌سنج که آغشته به نویز هستند وارد فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی شده و برای تنظیم R و Q سیگنال واقعی سیستم و سیگنال تخمین زده شده وارد واحد تطبیقی می‌شود.

جدول (۱): پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی

واحد	مقدار	پارامتر
H	۰/۰۰۵۲۵	$L_d = L_q$
Ohm	۰/۹۵۸۵	R
-	۸	ρ
Nm/rad/s	۰/۰۰۰۳۰۳۵	β
v/rad/s	۰/۱۸۲۷	λ
-	٪۹۰	ξ
kgm ²	۰/۰۰۸۰۵۵۱۲	j
Mm	۲۰	L
Kg	۱۶/۷۵	m
Kg	۱۰	m_1

در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) پارامترهای جابجایی، سرعت و شتاب مرجع با مقادیر تخمین زده شده مقایسه شده‌اند. در هر نمودار مقدار واقعی و مقدار تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی نشان داده شده است. مطابق نتایج حاصله نویزهای اندازه‌گیری کاملاً حذف شده و مقدار تخمینی هر پارامتر با مقدار واقعی آن تطابق دارد. در این آزمایش توانایی فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی در حذف نویز و تخمین پارامترهای سیستم با استفاده از ترکیب اطلاعات سه سنسور انکودر، دوربین و شتاب‌سنج با مقدار نویزهای متفاوت ارائه شده است.



شکل (۴): مقدار واقعی و تخمین زده شده θ توسط فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی

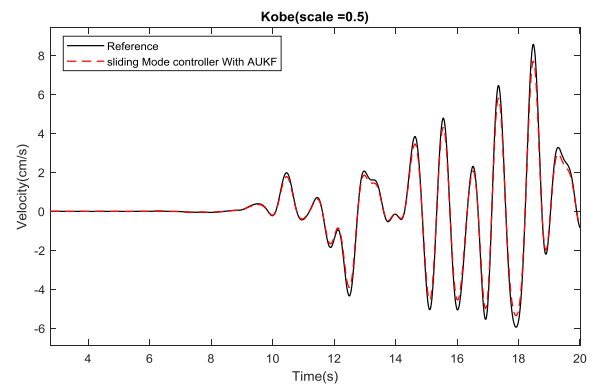
عنوان عملکرد بهره می‌برد. علاوه بر این بال اسکرو حرکت دورانی موتور را به حرکت خطی تبدیل می‌کند.

سنسورهای این میز شامل یک انکودر خطی ۵ میکرومتری است که جابجایی صفحه را اندازه‌گیری می‌کند. یک شتاب‌سنج آنالوگ مدل ADXL203 که شتاب افقی میز را اندازه‌گیری می‌کند و یک دوربین ساده که در فاصله مناسب روبروی صفحه میز قرار می‌گیرد جهت اندازه‌گیری جابجایی. علاوه بر این سخت افزار کنترل‌کننده میز لرزه شامل یک درایور سروو، یک کارت اخذ اطلاعات^۸ از نوع ۱۷۱۶، یک میکروکنترلر ATMEGA۳۲ و یک رایانه شخصی می‌باشد. ارتباط بین این اجزا به صورت زیر می‌باشد: انکودر خطی اطلاعات خود را به میکروکنترلر ارسال می‌کند و میکروکنترلر بعد از محاسبه، موقعیت میز لرزه را از طریق کارت اخذ اطلاعات به رایانه ارسال می‌کند در همین حال شتاب میز لرزه نیز توسط کارت اخذ اطلاعات به رایانه شخصی، که در آن برنامه کنترلی شبیه‌سازی شده قرار دارد، ارسال می‌کند. دوربین نیز از طریق گذرگاه سریال عمومی (USB)^۹ اطلاعات را به رایانه ارسال می‌کند علاوه بر این از دو سنسور مادون قرمز CNY70 برای امنیت میز لرزه هنگامی که جابجایی آن بیش از محدوده مجاز مثلاً ± 90 میلی‌متر است به عنوان سوئیچ برای توقف برنامه استفاده شده است. مشخصات میز لرزه به طور خلاصه در جدول (۲) بیان شده است.

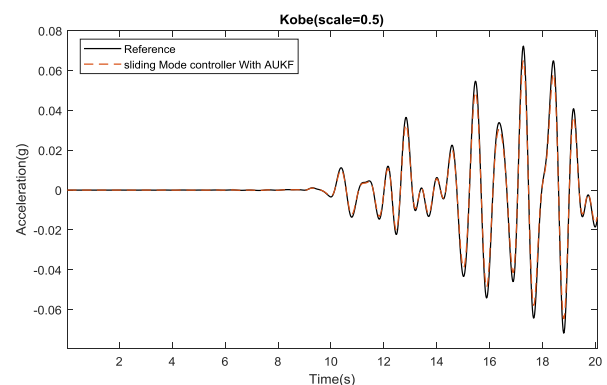
به منظور ارزیابی عملی ساختار کنترلی ارائه‌شده، نتایج حاصل از پیاده‌سازی روی میز لرزه مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی، عملکرد کنترل‌کننده مد لغزشی در حضور و عدم حضور فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی در حلقه کنترلی برای ردیابی مشخصات زلزله شبیه‌سازی شده مقایسه شده است. برای این منظور، از مقیاسی از دو زلزله چالفانت و کوبه استفاده شده است. مشخصات این زلزله‌ها در جدول (۳) ارائه شده است [۲۱].

جدول (۲): مشخصات میز لرزه

مقادیر/تعاریف	تجهیزات/مشخصات
PMSM	نوع موتور
۱Kwat	توان موتور
(۷۵۰×۵۵۰)mm	ابعاد میز (B×L)
±۹۰	جابجایی (mm)
۱۰۰۰	بیشینه سرعت (mm/s)
۲	بیشینه شتاب (g)
۳۵	بیشینه بار (kg)
۲۰	گام بال اسکرو (mm)
سنسور شتاب‌سنج دوجته با محدوده اندازه‌گیری $\pm 1/75$	سنسور شتاب‌سنج
۵	رزولوشن سنسور شتاب‌سنج (μm)
۱۶/۷۵	وزن صفحه (kg)



شکل (۸): ورودی سرعت مرجع و مقادیر تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی در حضور کنترل‌کننده



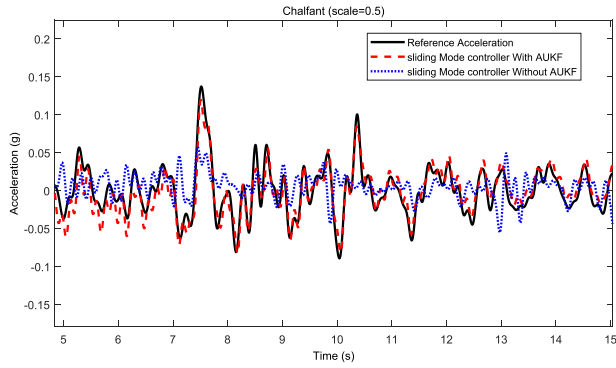
شکل (۹): ورودی شتاب مرجع و مقادیر تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی در حضور کنترل‌کننده



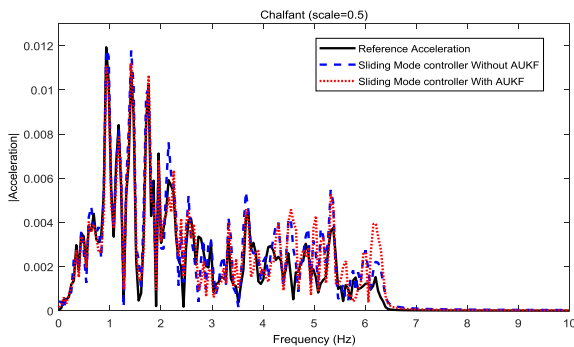
شکل (۱۰): نمای کلی از میز لرزه‌ی مورد استفاده

۲-۴- نتایج تست آزمایشگاهی

به منظور بررسی میزان عملکرد ساختار کنترلی ارائه شده در واقعیت، از میز لرزه‌ی مرکز تحقیقات دانشگاه اراک استفاده شده است. میز لرزه‌ی استفاده شده به همراه اجزای اصلی در شکل (۱۰) نشان داده شده است [۲۱]. میز لرزه از نوع الکتریکی با یک درجه آزادی می‌باشد. این میز از یک موتور سنکرون آهنربای دائم و یک بال اسکرو به



شکل (۱۳): مقایسه بین شتاب مرجع برای زلزله چالفانت



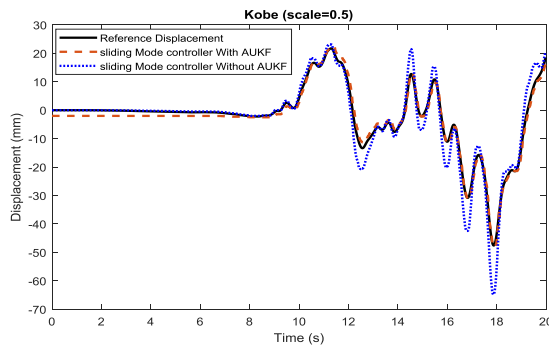
شکل (۱۴): مقایسه بین شتاب مرجع برای زلزله چالفانت در حوزه

فرکانس

در این مرحله نتایج حاصل از پیاده سازی کنترل کننده مد لغزشی در حضور فیلترکالمن بی رد تطبیقی در حلقه کنترلی و بدون حضور آن با ورودی مرجع بر روی زلزله کوبه آورده شده است. شکل‌های (۱۵) تا (۱۸) به ترتیب نتایج جابجایی، سرعت و شتاب را نشان می‌دهند. RMSE در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۴): مقایسه RMSE ردیابی با UKF و بدون UKF

شتاب	سرعت	جابجایی	RMSE
۰/۹۱۲	۰/۸۴۶	۰/۶۲۳	SMC Without UKF
۰/۳۲۰	۰/۰۷۵	۰/۰۳۲	SMC With UKF



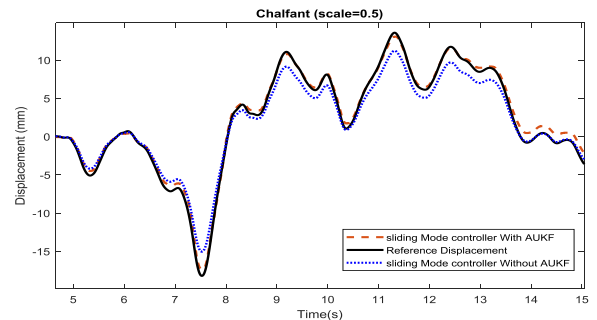
شکل (۱۵): مقایسه بین جابجایی مرجع برای زلزله کوبه

جدول (۳): مشخصات زلزله‌های مرجع

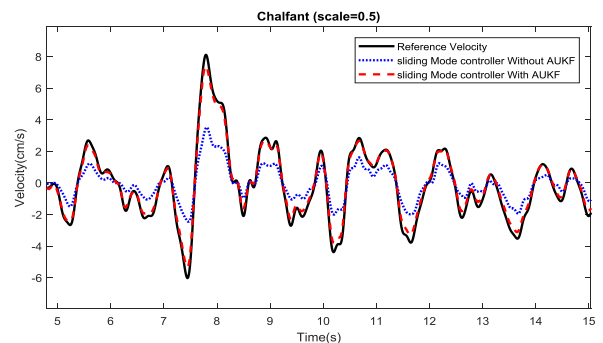
زلزله مرجع	مشخصات
زلزله کوبه	ایستگاه: Nishi-Akashi دامنه: CUE ۶/۹ منبع اطلاعات:
زلزله چالفانت	ایستگاه: Zack Brothers دامنه: ۵/۹ منبع اطلاعات: CDMG:

زمان اجرای الگوریتم تطبیقی پارامترهای $\lambda_{r,1}$ و $\mu_{r,1}$ و $\lambda_{q,0}$ و $\mu_{q,0}$ در آغاز الگوریتم مقداردهی می‌شوند. این پارامترها نباید زیاد کوچک انتخاب شوند، به دلیل تاثیر این پارامترها بر روی R و Q، در آغاز فرآیند نباید R کوچکتر از مقدار حقیقی و Q بزرگتر از مقدار واقعی خود شود. در ادامه بر اساس تاثیری که η_k^R و η_k^Q به ترتیب بر روی R و Q دارند، η_k^R در حدود ۰/۱ انتخاب می‌شود و η_k^Q را می‌توان بزرگتر یا کوچکتر از این مقدار انتخاب کرد. چرا که ماتریس R به طور مستقیم موجب افزایش یا کاهش P_k^{yy} می‌شود ولی وابستگی P_k^{yy} به ماتریس Q با H_k است.

شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) به ترتیب نتایج جابجایی، سرعت و شتاب را نشان می‌دهند. همچنین در جدول (۴) برای ارزیابی روش پیشنهادی جذر میانگین مربع خطای ردیابی (RMSE) پارامترهای جابجایی، سرعت و شتاب توسط کنترل کننده مد لغزشی در حضور فیلترکالمن بی رد تطبیقی در حلقه کنترلی و بدون حضور آن با ورودی مرجع نشان داده شده است.



شکل (۱۱): مقایسه بین جابجایی مرجع برای زلزله چالفانت



شکل (۱۲): مقایسه بین سرعت مرجع برای زلزله چالفانت

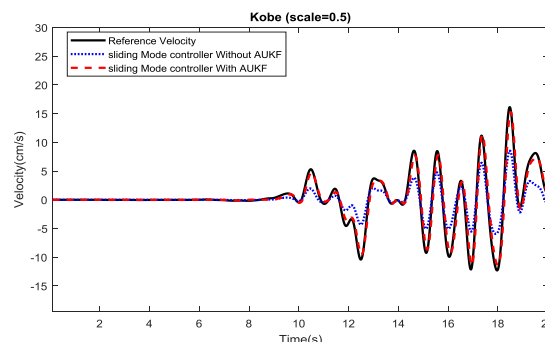
مناسبی را منجر می‌شود. بیشترین خطا مربوط به زمانی است که تغییر جهت در ورودی مشاهده می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

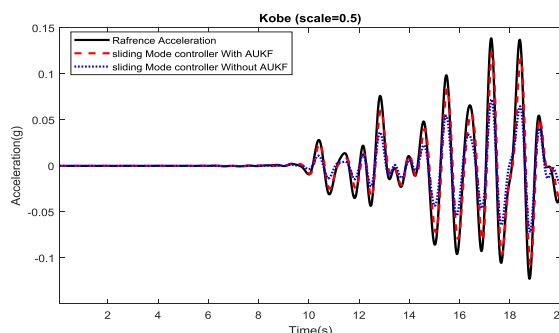
در این مقاله، یک روش پایداری و کنترل شبیه‌ساز زلزله با استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی و فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی مورد بررسی قرار گرفته است. برای تطبیق فیلتر کالمن بی‌رد از الگوریتم تندترین شیب استفاده شده است. در روش پیشنهادی، حالت‌های میز لرزه با استفاده از شتاب‌سنج، انکودر و دوربین تخمین زده شده و سپس با استفاده از حالت‌های تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی، کنترل‌کننده مد لغزشی برای پایداری و کنترل سیستم حلقه بسته میز شبیه‌ساز استفاده می‌شود. علاوه بر این یک سیستم اندازه‌گیری جابجایی آنلاین مبتنی بر پردازش تصویر ارائه شده است. سیستم پیشنهادی از یک دوربین بسیار ارزان قیمت برای اندازه‌گیری جابجایی بهره می‌گیرد. همچنین دقت مطلوب، عملکرد آنلاین و عدم نیاز به تماس با میز لرزه از دیگر مزایای سیستم مبتنی بر پردازش تصویر است. برای کنترل میز شبیه‌ساز زلزله دو آزمایش طراحی شده است. در آزمایش اول کنترل‌کننده مد لغزشی از فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی استفاده می‌کند و در آزمایش دوم کنترل‌کننده مد لغزشی از فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی استفاده نمی‌کند. نتایج حاکی از آن است که استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی خطای شبیه‌سازی زلزله را تا حد زیادی کاهش داده است. این مورد درباره‌ی کنترل‌کننده مد لغزشی در حضور فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی بیشتر به چشم می‌خورد و این کنترل‌کننده توانسته است خطای ردیابی پروفیل زلزله‌ی چالفانت و کوبه را کاهش دهد. نتایج تجربی برتری روش کنترلی پیشنهادی را نسبت به سایر روش‌ها را تأیید می‌کند.

مراجع

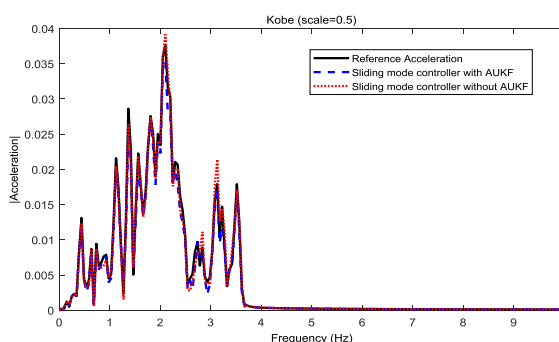
- [1] X. Li, T. Yang, W. Li, M.J. Brennan, M. Zhu, L. Wu, On the adaptive synchronous control of a large-scale dual-shaker platform system. *Journal of Vibration and Control*. 2023 Apr;29(7-8):1644-55.
- [2] L. Van Den Einde, JP. Conte, JI. Restrepo, R. Bustamante, M. Halvorson, TC. Hutchinson, CT. Lai, K. Lotfizadeh, JE. Luco, ML. Morrison, G. Mosqueda, NHERI@ UC San Diego 6-DOF large high-performance outdoor shake table facility. *Frontiers in Built Environment*. 2021 Jan 12;6:580333.
- [3] G. Fiorentino, C. Cengiz, F. De Luca, G. Mylonakis, D. Karamitros, M. Dietz, L. Diloru, D. Lavorato, B. Briseghella, T. Isakovic, C. Vrettos, Integral abutment bridges: investigation of seismic soil-structure interaction effects by shaking table testing. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2021 May;50(6):1517-38.
- [4] J. Liang, Z. Ding, Q. Han, H. Wu, J. Ji, Online learning compensation control of an electro-hydraulic shaking table using Echo State Networks. *Engineering*



شکل (۱۶): مقایسه بین سرعت مرجع برای زلزله کوبه



شکل (۱۷): مقایسه بین شتاب مرجع برای زلزله کوبه



شکل (۱۸): مقایسه بین شتاب مرجع برای زلزله کوبه در حوزه فرکانس

جدول (۵): مقایسه RMSE ردیابی با UKF و بدون UKF

RMSE	جابجایی	سرعت	شتاب
SMC Without UKF	۰/۷۸۸	۰/۷۵۱	۰/۸۹۱
SMC With UKF	۰/۲۳۲	۰/۱۸۸	۰/۳۱۱

همان‌طور که از نمودارهای بالا مشخص است سیستم مبتنی بر ترکیب اطلاعات به روش فیلتر کالمن بی‌رد تطبیقی و استفاده از کنترل‌کننده مد لغزشی توانسته پروفیل زلزله چالفانت و کوبه را به خوبی ردیابی کند در حالی که بدون حضور فیلتر، کنترل‌کننده مد لغزشی عملکرد مناسبی نداشته است. البته کنترل‌کننده مد لغزشی به دلیل مقاوم بودن ساختار آن، با وجود تغییرات محیطی نظیر اصطکاک و فرسایش همچنان عملکرد مناسبی را ارائه خواهد نمود. فیلتر کالمن بی‌رد نیز به دلیل آن که تابع توزیع احتمال را تقریب می‌زند، عملکرد

- motor based on parameter identification. *Electronics*. 2022 Mar 24;11(7):1012.
- [17] Z. Xu, T. Yan, SX. Yang, SA. Gadsden, Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2023 May 3.
- [18] J. Hou, J. Liu, F. Chen, P. Li, T. Zhang, J. Jiang, X. Chen, Robust lithium-ion state-of-charge and battery parameters joint estimation based on an enhanced adaptive unscented Kalman filter. *Energy*. 2023 May 15;271:126998.
- [19] L. Jiang, H. Zhang, Redundant measurement-based second order mutual difference adaptive Kalman filter. *Automatica*. 2019 Feb 1;100:396-402.
- [20] M. Kumar, S. Mondal, State estimation of radar tracking system using a robust adaptive unscented Kalman filter. *Aerospace Systems*. 2023 Apr 15:1-7.
- [21] Earthquake and Station Details. Retrieved from <http://www.peer.berkeley.edu>.
- Applications of Artificial Intelligence. 2023 Aug 1;123:106274.
- [5] A. Najafi, BF. Spencer Jr, Modified model-based control of shake tables for online acceleration tracking. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2020 Dec;49(15):1721-37.
- [6] BS. Twitchell, MD. Symans, Analytical modeling, system identification, and tracking performance of uniaxial seismic simulators. *Journal of engineering mechanics*. 2003 Dec;129(12):1485-8.
- [7] BF. Spencer Jr, G. Yang, Earthquake simulator control by transfer function iteration. In *Proceedings of the 12th ASCE engineering mechanics conference* 1998 May 17 (pp. 17-20).
- [8] M. Moradi, H. Bolandi, M. Abedi, Federated Extended Kalman Filter for Sensor Fault Detection and Isolation. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2017; 13 (4) :71-79
- [9] J. Yao, D. Di, G. Jiang, S. Gao, H. Yan, Real-time acceleration harmonics estimation for an electro-hydraulic servo shaking table using Kalman filter with a linear model. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2013 Apr 29;22(2):794-800.
- [10] L. Kong, X. Peng, Y. Chen, P. Wang, M. Xu, Multi-sensor measurement and data fusion technology for manufacturing process monitoring: a literature review. *International journal of extreme manufacturing*. 2020 Mar 30;2(2):022001.
- [11] N. Sadeghzadeh Nokhodberiz, B. Soltani, M. Pasand, H. Radmanesh, Additive Multi-rate Delayed Extended Kalman Filter Attitude Estimation Fusing Gyroscope and Star Tracker Sensors. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2023; 20 (3) :149-158
- [12] Y. Wei, S. Lyu, W. Li, X. Yu, Z. Wang, L. Guo, Contact Force Estimation of Robot Manipulators With Imperfect Dynamic Model: On Gaussian Process Adaptive Disturbance Kalman Filter. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2023 Jun 5.
- [13] D. Sabzevari, A. Chatraei, INS/GPS sensor fusion based on adaptive fuzzy EKF with sensitivity to disturbances. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2021 Nov;15(11):1535-49.
- [14] S. Yazdkhasti, D. Sabzevari, JZ. Sasiadek, Adaptive H-infinity extended Kalman filtering for a navigation system in presence of high uncertainties. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2023 May;45(8):1430-42.
- [15] N. Rajabi Namini, R. HAVANGI, Design and Implementation of Fuzzy Sliding Mode Controller for Motion Control of an Electric Shake Table Using Adaptive Extended Kalman Filter. *Nashriyyah -i Muhandisi -i Barq va Muhandisi -i Kampyutar -i Iran*, 2021;19(2):90-98.
- [16] Y. Huang, J. Zhang, D. Chen, J. Qi, Model reference adaptive control of marine permanent magnet propulsion

زیر نویس ها

- ¹ Shaking Table
² Seismological
³ Extended Kalman Filter
⁴ Unscented Kalman filter
⁵ viscous friction
⁶ Unscented Transform
⁷ Cholesky
⁸ DAQ card
⁹ Universal Serial Bus