



کنترل فازی میز لرزه با استفاده از سیستم اندازه گیری جابجایی مبتنی بر پردازش تصویر

سیروس سیاحی¹، محمود حمیدی زاده¹، حسن مرادزاده²، مهدی سلیمانی³، محسن رحمانی⁴

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکترونیک، دانشگاه اراک، اراک

2- استادیار، مهندسی برق، دانشگاه اراک، اراک

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

4- استادیار، مهندسی کامپیوتر، دانشگاه اراک، اراک

* اراک، صندوق پستی 3815688349، m-soleymani@araku.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 مرداد 1393

پذیرش: 25 مرداد 1393

ارائه در سایت: 19 مهر 1393

کلید واژگان:

کنترل کننده فازی ناظر

میز لرزه

پردازش تصویر

اندازه گیری جابجایی

چکیده

طراحی کنترل کننده میز شبیه ساز زلزله به منظور شبیه سازی و تعقیب پروفیل زلزله از موضوعات اساسی در طراحی یک میز لرزه است. در این مقاله کنترل یک میز لرزه در ابعاد آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت اندازه گیری جابجایی میز به صورت بلادرنگ، سیستمی مبتنی بر پردازش تصویر ارائه شده است. میز لرزه توسط یک کنترل کننده تناسبی-انتگرال گیر همراه با یک کنترل کننده فازی ناظر کنترل می شود. کنترل کننده فازی به منظور کمینه کردن خطا، از دو بازخورد جابجایی و شتاب استفاده می کند. برای این منظور، یک دوربین و یک برنامه ی پردازش تصویر جهت اندازه گیری مستقیم و بلادرنگ جابجایی به کار گرفته شده است. نتایج نیز به عنوان بازخورد کنترل کننده از طریق شبکه به کامپیوتر مرکزی انتقال داده می شود. کارایی سیستم پیشنهادی در مقایسه با سیستمی که از انکودر خطی به عنوان سنسور جابجایی و بازخورد کنترل کننده بهره می گیرد، مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنابر نتایج بدست آمده سیستم کنترلی پیاده سازی شده با حالت کنترل کننده فازی تناسبی-انتگرال گیر توانسته است خطای کنترلی را کاهش دهد. همچنین به کار گیری رویکرد پردازش تصویر به منظور اندازه گیری جابجایی میز لرزه، مزایایی از جمله دقت مطلوب، عدم نیاز به تماس مستقیم با میز، اندازه گیری به صورت مستقیم و بلادرنگ و قیمت پایین را به ارمغان می آورد.

Fuzzy control of a seismic shake table using a vision-based displacement measurement system

Sirous Sayahi¹, Mahmood Hamidizadeh¹, Hassan Moradzadeh², Mehdi Soleymani^{1*}, Mohsen Rahmani³

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran

2- Department of Electrical Engineering, Arak University, Arak, Iran

3- Department of Computer Engineering, Arak University, Arak, Iran

* P.O.B. 3815688349, Arak, Iran, m-soleymani@araku.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 25 July 2014

Accepted 16 August 2014

Available Online 11 October 2014

Keywords:

Fuzzy-PI supervisory control

shake table

Image Processing

displacement measurement

ABSTRACT

Control of seismic shake table in order to track the predefined earthquake profile is a key concern in design of seismic shake tables. This paper proposes a vision-based real time displacement measurement system using image processing techniques to control a laboratory-scale seismic shake table. The shake table is controlled via a fuzzy-supervisory controller, an inner PI loop and a fuzzy outer one, whose feedback is provided by the vision-based measurement system. To minimize tracking errors, the fuzzy controller uses displacement and acceleration responses as its feedback. For this purpose, a camera and an image processing application are utilized to measure the motions directly in real time. Results are sent to a host PC through a network as the controller feedback. Proposed system performance is compared with an alternative system which utilizes a linear encoder as displacement sensor and controller feedback. Test results prove effectiveness of the proposed fuzzy system in cutting back the tracking errors. In addition, the vision-based system uses a very low cost camera to measure the displacement directly. It has appropriate accuracy, works in real time, and does not require any contact with the table, compared to the encoder version.

1- مقدمه

طبیعی و ایمن سازی سازه ها در برابر زلزله در نواحی لرزه خیزی مانند ایران

اهمیت اساسی دارد. یکی از راه های مقاوم سازی سازه در مقابل محرک های

خارجی پیش بینی رفتار آن هنگام وقوع زلزله است تا از این طریق در زمان

زلزله از جمله حوادث طبیعی است که هر ساله منجر به خسارت زیادی در

سراسر جهان می شود. لذا اندیشیدن تمهیداتی جهت مقابله با این بلای

Please cite this article using:

S. Sayahi, M. Hamidizadeh, H. Moradzadeh, M. Soleymani, M. Rahmani, Fuzzy control of a seismic shake table using a vision-based displacement measurement system, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 14, pp. 117-124, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

طراحی کردند. سیستم آنها می‌توانست به کمک تکنیک‌های پردازش تصویر جابجایی سازه را به صورت بلادرنگ به دست آورد. هدف آنها اندازه‌گیری میزان جابجایی یک پل به منظور به دست آوردن ظرفیت حمل بار آن بود. آنها برای تأیید سیستم خود در آزمایشگاه روی یک میز لرزه نتایج را با یک سنسور ال‌وی‌دی تی⁵ مقایسه کردند که اعداد به دست آمده خطای 3 درصدی را نشان می‌داد[3]. پژوهشی دیگر در زمینه مانیتورینگ حرکات میز لرزه توسط رودریگز صورت گرفت. وی از یک سنسور ال‌وی‌دی تی برای عمل اندازه‌گیری استفاده کرد که با وجود دقت بالا دارای معایبی نیز بود. چنین سنسورهایی به یک نقطه‌ی مرجع نیاز دارند و همچنین در صورت تخریب سازه استفاده از آنها امکان‌پذیر نیست. وی سیستمی را مبتنی بر ردیابی نشانه‌ها در تصویر طراحی کرد. در این سیستم از نشانه‌های مخصوص AM-⁶ FM استفاده شده است. این کار به صورت آفلاین با سرعت 30 تا 60 فریم بر ثانیه انجام می‌شد. مزیت روش وی استفاده از نوع خاص نشانه‌های AM-FM است که در ردیابی شی کمک شایانی می‌کند[4]. دیوید ماس و همکارانش پژوهشی دیگر در زمینه محاسبه‌ی مستقیم جابجایی سازه‌ها و تحلیل ارتعاشات انجام دادند. آنها از یک دوربین پیشرفته با 420 فریم در ثانیه با رزولوشن پایین برای این اندازه‌گیری استفاده کردند. روش آنها مبتنی بر دنبال کردن اهدافی به شکل بیضوی بود. آنها موفق به اندازه‌گیری ارتعاشات با دقت میکرومتر در یک محدوده فرکانسی گسترده شدند[5].

در زمینه کنترل میز لرزه نیز پژوهش‌های مختلفی در سال‌های اخیر انجام شده است. سکی و همکاران به منظور کنترل یک میز لرزه و سازه‌ی نصب شده بر روی آن از یک بازخورد جبران کننده‌ی تطبیقی استفاده کردند[6]. همچنین در این زمینه یانگ و همکارانش برای بهبود عملکرد یک میز لرزه‌ی آزمایشگاهی در شبیه سازی زلزله از الگوریتم کنترلی با سه حالت کنترلی بازخوردی و پیش خوراند مبتنی بر اصل تخصیص قطب بهره بردند[7]. کنترل تأخیر زمان⁷ که یک تکنیک کنترلی قوی برای سیستم‌های غیرخطی محسوب می‌شود، توسط لی و همکارانش برای بهبود عملکرد ردیابی میز لرزه مورد استفاده قرار گرفت[8]. چیس و همکارانش نیز کنترل کننده‌ی را به منظور کاهش اختلالات شتاب توسعه دادند[9]. در پژوهشی که توسط جیناو و همکارانش انجام شد مجموعه‌ای با نه میز و شانزده محرکه‌ی سرو مورد بررسی قرار گرفت و یک کنترل کننده‌ی DSP به عنوان یک سیستم کاملاً دیجیتال برای این منظور به کار گرفته شد[10]. ایروچی و همکارانش نیز کاربرد کنترل کننده‌های مختلف را برای کنترل یک میز لرزه مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه‌ی آنها شامل کنترل فاز و دامنه⁸، لغو هارمونیک تطبیقی⁹، کنترل معکوس تطبیقی¹⁰ و تکرار برخط¹¹ می‌شد[10]. در این بین مزیت روش پیشنهادی نسبت به کارهای قبلی استفاده از حالت کنترلی ناظر بوده که این امکان را فراهم می‌کند که علاوه بر بهبود عملکرد کنترل کننده‌ی سطح پایین‌تر، از سایر کنترل کننده‌ها مانند حالت مود لغزشی به عنوان ناظر بهره برد. مزیت دیگر، استفاده از یک کنترل کننده‌ی ناظر فازی می‌باشد که برای کنترل سیستم‌های غیرخطی پیچیده از قواعد بیانی بهره برده و دانش یک فرد باتجربه را در سیستم کنترلی به کار می‌برد.

وارد شدن نیرو، سازه عکس‌العملی متناسب با شرایط موجود از خود نشان دهد. پیش‌بینی این رفتار ملزم به اندازه‌گیری پاسخ سازه در مقابل نیروهای وارد شده است. اما انجام چنین آزمایشاتی بر روی سازه‌ی واقعی هنگام وقوع زلزله از نظر هزینه و مسائل ایمنی به صرفه نیست و در مواردی نیز حتی امکان آن وجود ندارد. لذا بهتر است در ابتدا آزمایشات لازم بر روی مدلی در سطح آزمایشگاهی انجام شود. میز لرزه ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی زلزله و مطالعه‌ی رفتار سازه‌ها است. با استفاده از این ابزار سودمند می‌توان قبل از ساخت سازه‌ی واقعی آزمایشات لازم را بر روی مدل طراحی شده انجام داد و پاسخ سازه را در ابعادی کوچک‌تر مورد بررسی قرار داد. یکی از مواردی که در ساخت میزهای لرزه مورد توجه قرار می‌گیرد میزان دقت آنها در شبیه‌سازی رفتار یک زلزله‌ی واقعی است. در این حالت معیار دقت میز لرزه، میزان انطباق پاسخ‌های جابجایی، سرعت و شتاب میز و سیگنال مبنا یا همان پروفیل زلزله است. برای این منظور از میز شبیه‌ساز زلزله با عنوان "لرزا" که در دانشگاه اراک توسعه یافته، استفاده شده است.

از سویی دیگر در سال‌های اخیر پردازش تصویر با رشدی محسوس در بسیاری از زمینه‌ها نفوذ کرده و امروزه بسیاری از سیستم‌های کنترلی در قالب ماشین‌های بینایی از آن سود می‌برند. ردیابی اشیا¹ و اندازه‌گیری جابجایی از جمله مباحث جذابی هستند که در حوزه‌ی پردازش تصویر مورد توجه قرار می‌گیرند. در این پژوهش یک سیستم اندازه‌گیری جابجایی مبتنی بر پردازش تصویر ارائه می‌شود. هدف اصلی، استفاده از این سیستم اندازه‌گیری برای کنترل و اندازه‌گیری جابجایی حرکات میز لرزه است. برای کنترل میز لرزه از دو کنترل کننده‌ی مستقل تناسبی-انتگرال گیر² و کنترل کننده‌ی تناسبی-انتگرال گیر با کنترل کننده‌ی ناظر فازی استفاده شده است. کنترل کننده‌ی تناسبی-انتگرال گیر نقش اصلی را در کنترل میز ایفا می‌کند و کنترل کننده‌ی فازی ناظر برای کنترل میز لرزه به منظور کاهش خطای دنبال کردن سیگنال زلزله طراحی شده است.

سیستم‌های فازی کاربرد وسیعی در علوم مختلف دارند، که از مهم‌ترین آنها می‌توان به کنترل سیستم‌های مهندسی اشاره کرد. پیاده‌سازی مفاهیم کلامی با استفاده از منطق و ریاضیات فازی در مقایسه با پیچیدگی ریاضیات کلاسیک، بسیار ساده و قابل فهم است. از طرف دیگر کنترل کننده‌ی فازی یک کنترل کننده‌ی مقاوم است و در صورت طراحی مناسب دقت قابل قبولی دارد [1].

در دهه‌ی گذشته پژوهش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی میزان جابجایی سازه‌های عمرانی هنگام اعمال نیروهای خارجی و نظارت بر کارایی آنها صورت گرفته که در بین روش‌های موجود پردازش تصویر روشی نوین است که پیشرفت‌های قابل توجهی نیز داشته است. به منظور اندازه‌گیری مستقیم میزان جابجایی سازه‌های عمرانی مانند پل‌ها رویکردی مبتنی بر بینایی ماشین مورد بررسی قرار گرفت. چند دیود نورافشان³ قرمز رنگ روی یک صفحه‌ی یکنواخت نصب گردیده است. با استفاده از یک دوربین با دقت بالا که در فاصله‌ی معینی از دیودهای نورافشان قرار می‌گرفت، میزان جابجایی سازه هنگام وارد شدن نیرو به دست می‌آمد. داده‌ها با سرعت 30 فریم در ثانیه⁴ به یک کامپیوتر انتقال می‌یافت، سپس یک نرم‌افزار برای ردیابی حرکات، مبتنی بر رنگ دیودهای نورافشان به کار می‌رفت[2]. لی و همکارانش سیستمی مبتنی بر پردازش تصویر برای مانیتورینگ سازه‌ها

5- LVDT: Linear Variable Differential Transformer

6- Amplitude modulated – Frequency modulated

7- Time Delay Control (TDC)

8- Amplitude Phase Control (APC)

9- Adaptive Harmonic Cancellation (AHC)

10- Adaptive Inverse Control (AIC)

11- On Line Iteration (OLI)

1- Object tracking

2- Independent Proportional Integrator controller

3- LED: Light-Emitting Diode

4- fps: frame per second

$$I(x, y, t) = I(x + u, y + v, t + dt) \quad (1)$$

در این رابطه I ماتریس تصویر و u و v بیانگر جابجایی پیکسل هستند. این نکته کمک می کند که بتوان به راحتی مختصات مرکز علامت را از طریق میانگین گیری از مقادیر پیکسل ها به دست آورد. برای کاهش محاسبات، تصویر ورودی به چند بخش تقسیم می شود. با این کار نیازی به پیمایش همه ی پیکسل ها نیست. یک مثال از این روال و تصویر ورودی در شکل 1 نشان داده شده است.

الگوریتم پردازش تصویر در هر ستون به دنبال پیکسل هایی هست که مقادیری کمتر از مقدار آستانه دارند. مقدار آستانه مقداری است که مستطیل مشکی را از پس زمینه ی تصویر جدا می کند. هر ستون که در آن تعداد پیکسل های با مقدار کمتر از آستانه نزدیک به تعداد پیکسل های عرض مستطیل مشکی رنگ باشد از مختصات مکانی آن پیکسل ها میانگین گرفته می شود و محاسبات عمودی در آن ستون خاتمه می یابد. عدد به دست آمده از حاصل این میانگین مختصات مرکز علامت در راستای عمودی است. همین روش برای به دست آوردن مرکز افقی علامت نیز به کار می رود و از این طریق مختصات دو بعدی تنها از طریق پیمایش چند سطر و ستون تصویر در کمترین زمان ممکن به دست می آید. در واقع تعداد سطر و ستون پیمایش شده بستگی به موقعیت علامت در تصویر دارد. سپس با داشتن مختصات مرکز علامت در هر فریم از تصویر جابجایی میز به دست می آید. رابطه ی 2 این فرایند را نشان می دهد.

$$y = \frac{\sum_{i \in [0, R]} i [I(i, y_n) < T]}{\sum_{i \in [0, R]} 1 [I(i, y_n) < T]} \quad (2)$$

در این رابطه y مختصات مرکز هدف در راستای عمودی است. مختصات مرکز هدف در راستای افقی نیز با روشی مشابه به دست می آید. R تعداد پیکسل های موجود در یک ستون یا همان تعداد سطرها و T مقدار آستانه است. y_n نیز ستون هایی است که باید پردازش شود و از رابطه ی 3 به دست می آید.

$$y_n = \sum_{j=1}^n \frac{C \times j}{n} \quad (3)$$

در اینجا با توجه به ابعاد تصویر و مستطیل سیاه رنگ، تصویر به 8 قسمت تقسیم می شود. بنابراین در رابطه ی 3، n برابر 8 است. C نیز تعداد پیکسل های موجود در یک سطر یا همان تعداد ستون ها است. این روش کمک می کند تا تنها با پیمایش تعداد اندکی پیکسل، مختصات مرکز هدف به سرعت به دست آید. با داشتن مختصات مرکز علامت در هر فریم از تصویر، جابجایی میز بر حسب تعداد پیکسل به دست می آید. اما هدف محاسبه ی جابجایی میز بر حسب میلی متر است. لذا باید ابعاد هر پیکسل بر حسب میلی متر به دست آید. برای این کار ابتدا با توجه به ابعاد علامت مشکی رنگ و تعداد پیکسل هایی که در تصویر اشغال می کند، می توان ابعاد هر پیکسل را بر حسب میلی متر به دست آورد. این ابعاد به اندازه ی علامت مورد نظر و فاصله ی دوربین تا آن بستگی دارد. لذا در ابتدا باید با تنظیم دوربین در مکان مشخص ابعاد پیکسل را بر حسب میلی متر به دست آورد، سپس اقدام به اندازه گیری جابجایی میز نمود.

با تغییر فاصله ی دوربین نسبت به صفحه ی هدف تنها علامت مورد ردیابی بزرگ و کوچک می شود و در دنبال کردن مرکز هدف تفاوتی حاصل نمی شود. اما مسئله ای که باید بدان توجه کرد این است که با توجه به ثابت بودن تعداد پیکسل های موجود در هر فریم با تغییر فاصله ی دوربین،

هدف اصلی این پژوهش به کارگیری رویکرد پردازش تصویر در اندازه گیری جابجایی میز لرزه و سنجش تأثیر آن در کنترل فازی ناظر و بلادرنگ میز است. یک انکودر خطی نیز جهت اندازه گیری حرکات میز استفاده می شود. انکودر خطی به عنوان یک حسگر تماسی با وجود دقت بالایی که دارد دارای معایبی نیز می باشد. ممکن است به کارگیری آن در آزمایشگاه و روی میز لرزه تا حدودی ساده به نظر برسد، اما نصب و مکان یابی چنین ادواتی در سازه های واقعی دشوار، زمان بر و در مواردی نیز غیرممکن است. به علاوه اینکه هزینه ی بالایی را می طلبد. همچنین استفاده از چنین سنسورهایی نیازمند یک نقطه ی مرجع است که این نقطه خود به شرایط محیطی بستگی دارد [3]. برخی از آزمایشات نیز برای مطالعه ی رفتار سازه در مقابل نیروی وارد شده منجر به تخریب سازه می شوند، که در چنین مواردی استفاده از سنسورهای تماسی، غیرممکن یا هزینه بر خواهد بود [4]. همچنین استفاده از ابزار مکانیکی مانند انکودر خطی مشکلات این گونه سیستم ها از قبیل مستهلک شدن را در طول زمان به همراه خواهد داشت.

لذا راه حل پیشنهادی برای رفع چنین مشکلاتی استفاده از یک سنسور مبتنی بر پردازش تصویر به عنوان جایگزینی برای سنسور موجود است که علاوه بر داشتن دقت مناسب، هزینه ی بسیار پایینی دارد و بدون تماس با میز به صورت بلادرنگ نیز عمل می کند. بر اساس تحقیقات جابجایی و سرعت از جمله مهم ترین سیگنال ها در کنترل کننده های صنعتی هستند [11]. از آنجا که در برخی از کاربردهای بلادرنگ مانند کنترل و مانیتورینگ سازه ها اندازه گیری شتاب از طریق شتابسنج به راحتی انجام می شود، سرعت و جابجایی نیز قابل دسترسی است. اما با توجه به میزان خطایی که خود شتابسنج دارد، انترگرال گیری از خروجی آن نیز به منظور رسیدن به سرعت و جابجایی، میزان خطا را افزایش می دهد [۲،۳،۵]. اما در صورتی که از روش پردازش تصویر استفاده شود می توان به صورت مستقیم جابجایی را به دست آورد. سیستم پیشنهادی جهت اندازه گیری مستقیم و بلادرنگ جابجایی میز لرزه به کمک تکنیک های پردازش تصویر طراحی شده است که برای کنترل میز استفاده می شود. لذا یک دوربین حرکات میز را ثبت کرده و یک برنامه ی پردازش تصویر موقعیت میز را در هر فریم بدست می آورد. نتایج از طریق شبکه به کامپیوتر انتقال داده می شود. سپس کنترل کننده ی فازی از این نتایج برای کنترل حرکات میز استفاده می کند.

2- اندازه گیری جابجایی با استفاده از تکنیک های پردازش تصویر

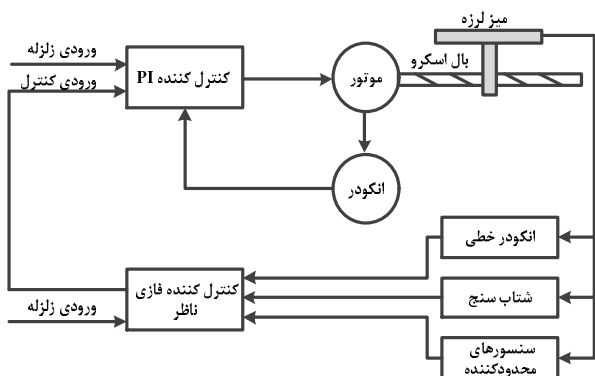
کارایی و صحت عملکرد میز لرزه به دقت در شبیه سازی زلزله بستگی دارد. پردازش تصویر روشی است که با کارایی مناسب می تواند در اندازه گیری مستقیم جابجایی میز به کار رود. برای این منظور یک صفحه با پس زمینه ی سفید بر روی میز نصب شده که در وسط آن علامتی مستطیل شکل به رنگ مشکی به عنوان هدف مورد نظر برای ردیابی قرار گرفته است. طراحی چنین صفحه ی هدف ساده ای به منظور کاهش محاسبات و افزایش سرعت اجرای برنامه است. یک دوربین نیز در فاصله ی مشخص از صفحه ی هدف قرار داده شده است. یک برنامه ی پردازش تصویر نیز به منظور یافتن مختصات مرکز هدف به صورت بلادرنگ در هر فریم طراحی شده است. تصویر ورودی، تصویری سیاه و سفید است و هر پیکسل مقداری بین 0 تا 255 دارد. فرض می شود ظاهر یک پیکسل از فریمی به فریم دیگر تغییر نمی کند. برای یک تصویر سیاه و سفید، این بدان معناست که روشنایی پیکسل متعلق به یک شی در فریم های مختلف ثابت است. این فرض به صورت رابطه (1) بیان می شود.

تناسبی-انتگرال‌گیر ثابت و غیرقابل تغییر است. در واقع نقش کنترل‌کننده‌ی فازی صرفاً نظارت و اصلاح رفتار کنترل‌کننده از طریق تغییر سیگنال ورودی کنترلی با توجه به میزان خطای ردیابی و تغییرات آن می‌باشد و تا حد زیادی عملکرد کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرال‌گیر را بهبود می‌بخشد.

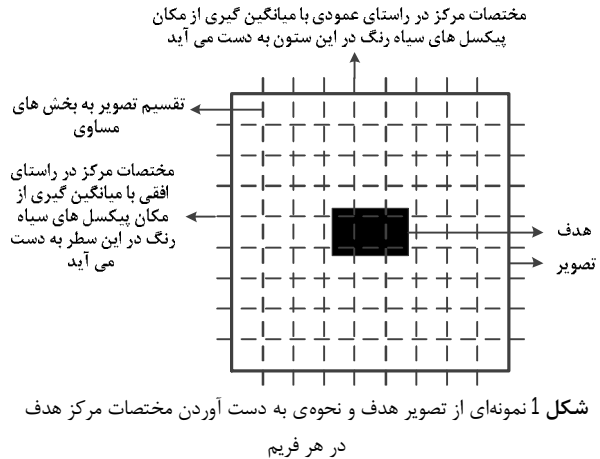
ساختار کنترلی در شکل 2 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده‌ی میز لرزه شامل دو حلقه‌ی کنترلی است. حلقه‌ی داخلی کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرال‌گیر است. این کنترل‌کننده از پروفیل زلزله به عنوان ورودی مرجع و از خروجی انکودر محور موتور به عنوان بازخورد استفاده می‌کند. حلقه‌ی بیرونی یک کنترل‌کننده‌ی فازی است که از خطاهای شتاب و جابجایی به عنوان ورودی استفاده می‌کند. این کنترل‌کننده یک انکودر خطی را به عنوان سنسور جابجایی به کار می‌گیرد. همچنین از یک شتاب‌سنج میمز² برای اندازه‌گیری شتاب استفاده می‌کند. پس از محاسبه‌ی خطاهای شتاب و جابجایی، کنترل‌کننده‌ی فازی سیگنال‌های کنترلی را به حلقه‌ی داخلی می‌فرستد. در پژوهش حاضر از سرو موتور و بال اسکرو به منظور انتقال نیرو به میز لرزه استفاده شده است. با توجه به فرکانس کاری پایین میز امکان استفاده از استپ موتور نیز در این طرح وجود دارد. همچنین موتورهای خطی نیز به عنوان یک مکانیزم جایگزین مطرح می‌باشند. لیکن مزیت اصلی این طرح سادگی، هزینه‌ی پایین و قابلیت پیاده‌سازی کنترل‌کننده با هزینه و پیچیدگی پایین می‌باشد.

با توجه به اینرسی بالای مجموعه، میز دارای یک محدودیت فرکانسی است و با افزایش فرکانس، دامنه کاری قابل حصول کاهش می‌یابد. به طوری که برای یک موج هارمونیک با دامنه‌ی 100 میلی‌متر، بیشینه فرکانس قابل حصول 5 هرتز می‌باشد. لیکن همان‌گونه که در نتایج نیز مشاهده می‌شود این میز قابلیت شبیه‌سازی پروفیل‌های مقیاس‌بندی شده‌ی زلزله‌های واقعی متوسط با مقیاس یک دوم را دارا است. همچنین شبیه‌سازی زلزله‌های با دامنه‌ی پایین و تا فرکانس 25 هرتز بدون مقیاس‌بندی قابل اجرا است.

کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرال‌گیر با توجه به ورودی مرجع و ورودی کنترلی که کنترل فازی برای آن تأمین می‌کند، تفاوت سرعت موتور و مقدار مطلوب جهت تولید خروجی مناسب را محاسبه می‌کند. ساختار کنترل-کننده‌ی تناسبی-انتگرال‌گیر در شکل 3 نشان داده شده است. همان‌طور که ذکر شد این کنترل‌کننده از پارامترهای ثابت و غیرقابل تغییر استفاده می‌کند و به ترتیب ضرایب P و I آن برابر 150 و 100 می‌باشد. در شکل 4 نیز اجزای اصلی میز لرزه و سیستم اندازه‌گیری مبتنی بر پردازش تصویر نشان داده شده است.



شکل 2 ساختار کنترلی میز لرزه



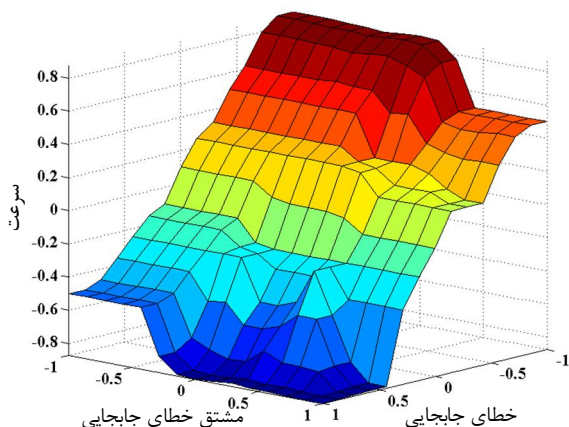
تفکیک‌پذیری¹ جابجایی محاسبه شده توسط برنامه تغییر می‌کند. از آنجا که تغییر تفکیک‌پذیری در برنامه‌ی پردازش تصویر لحاظ شده است لذا خللی در کار آن ایجاد نمی‌شود. اما این مسئله به معنی دلخواه بودن فاصله‌ی دوربین از هدف نیست، بلکه این فاصله در محدوده‌ی مشخصی که نوع دوربین و ابعاد هدف تعیین می‌کنند، تعریف می‌شود. بهترین فاصله‌ی دوربین نسبت به صفحه‌ی هدف، فاصله‌ای است که اولاً در هیچ فریمی علامت مورد ردیابی از محدوده‌ی تصویر خارج نشود و ثانیاً علامت مورد ردیابی بزرگترین اندازه‌ی خود را در تصویر داشته باشد و بالاترین تفکیک‌پذیری را در اختیار قرار دهد. از آنجا که در این پژوهش از یک وب‌کم ساده با زاویه‌ی دید 54 درجه استفاده شده است و طول علامت مورد ردیابی نیز برابر 4 سانتی‌متر است، فاصله‌ی بهینه‌ی دوربین تا هدف مورد ردیابی 25 سانتی‌متر برآورد شد.

3- ساختار کنترلی میز لرزه

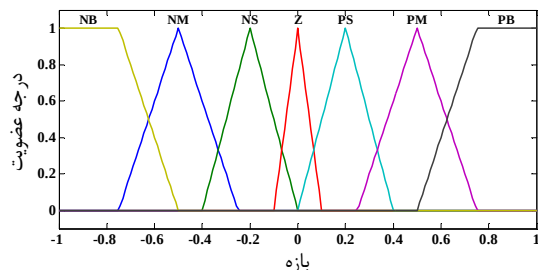
در سیستم پیشنهادی یک کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرال‌گیر به همراه یک کنترل‌کننده‌ی فازی ناظر به کار گرفته شده است. کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرال‌گیر برای کنترل سیستم به کار می‌رود؛ در حالی که کنترل‌کننده‌ی فازی می‌تواند به عنوان ناظر برای کاهش خطا استفاده شود[12]. در حقیقت کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرال‌گیر با کنترل سرعت موتور متصل به میز نقش اصلی را در دنبال کردن پروفیل زلزله ایفا می‌کند.

کنترل‌کننده‌ی فازی به دلیل استفاده از قواعد زبانی، ساده و قابل فهم بوده و طراح می‌تواند تجربیات خود را در پیاده‌سازی کنترل‌کننده اعمال کند. همچنین از آنجا که این کنترل‌کننده قابلیت تنظیم دارد، می‌توان از آن در سیستم‌های غیرخطی نیز استفاده کرد[13]. کنترل‌کننده‌ی فازی ناظر می‌تواند با هدف جبران خطای کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرال‌گیر به کار گرفته شود.

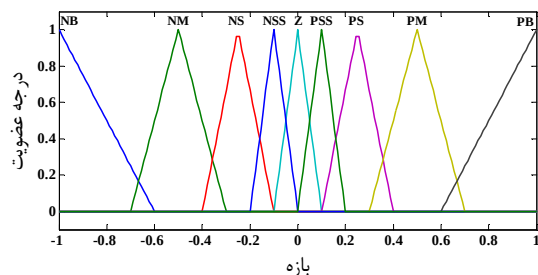
از آنجا که در اکثر سیستم‌های عملی پیچیده یک حلقه‌ی کنترلی نمی‌تواند به خوبی نیازها را برآورده کند، ساختار کنترلی چند سطحی مطرح می‌شود. در این روش کنترل‌کننده‌ی سطح پایین‌تر سرعت بالایی دارد و مستقیماً خروجی کنترلی را اعمال می‌کند و کنترل‌کننده‌ی سطح بالاتر که سرعت پایین‌تری نیز دارد نقش نظارت را ایفا می‌کند و ضرایب کنترل‌کننده-ی سطح پایین را اصلاح می‌کند[14]. کنترل فازی علاوه بر کاهش قابل توجه حجم محاسبات و بی‌نیازی از روابط پیچیده‌ی کنترل کلاسیک، عملکرد رضایت‌بخشی نیز دارد[15]. در این پژوهش پارامترهای کنترل‌کننده‌ی



شکل 5 سطح کنترلی مربوط به کنترل کننده فازی ناظر با ورودی‌های خطای جابجایی و مشتق آن



شکل 6 توابع تعلق مربوط به ورودی خطای جابجایی و مشتق آن



شکل 7 توابع تعلق مربوط به خروجی تعیین کننده سرعت موتور

جدول 1 قواعد فازی مربوط به کنترل کننده فازی ناظر با خطای جابجایی و مشتق

خطای مشتق جابجایی							خطای جابجایی
PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB	
PM	PM	PB	PB	PB	PB	PB	NB
PSS	PS	PS	PM	PM	PM	PB	NM
PSS	PSS	PS	PS	PS	PS	PS	NS
NSS	NSS	Z	Z	Z	PSS	PSS	Z
NS	NS	NS	NS	NS	NSS	NSS	PS
NB	NM	NM	NM	NS	NS	NS	PM
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NM	PB

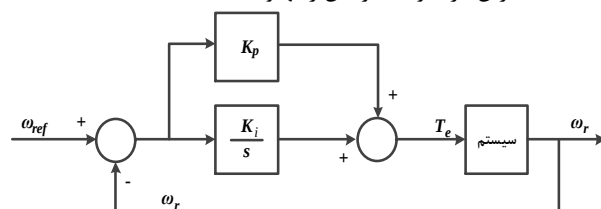
* NB = negative big, NM = negative medium, NS = negative small, NSS = negative small small, Z = zero, PSS = positive small small, PS = positive small, PM = positive medium, PB = positive big

به منظور کاهش خطای جابجایی لازم است که بازخوردی قابل اعتماد از جابجایی داشته باشیم. سیستم قبلی از خروجی انکودر به عنوان بازخورد استفاده می‌کند. در حقیقت یک انکودر خطی به منظور اندازه‌گیری میزان

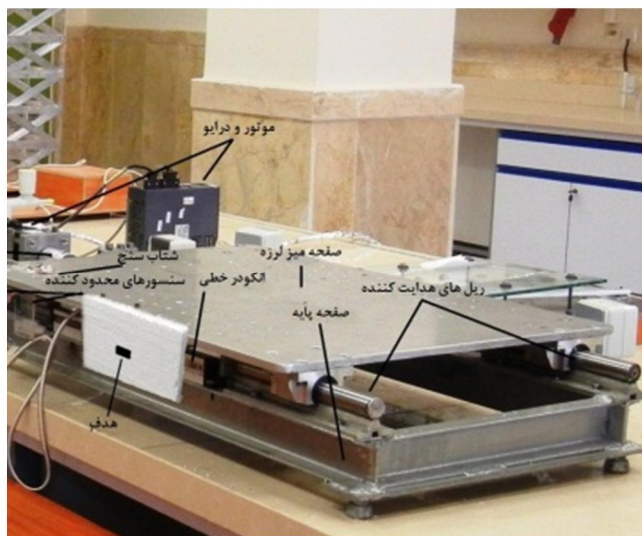
برنامه‌ی کنترلی در محیط نرم‌افزار لَب‌ویو پیاده‌سازی شده است. این برنامه با هدف دنبال کردن مقادیر جابجایی و شتاب زلزله‌ی واقعی پیاده‌سازی شده است. بدین منظور داده‌های مرجع به کنترل کننده داده می‌شوند، سپس خروجی‌های کنترل با توجه به داده‌های بازخورد و مقادیر خطا محاسبه می‌شوند. سطح کنترلی کنترل کننده در شکل 5 و توابع تعلق و قواعد فازی در شکل‌های 6 و 7 و جدول 1 قابل مشاهده است.

قواعد فازی بر مبنای جبران خطای جابجایی و مشتق آن بدست آمده است. از آنجا که خروجی کنترلی ضربی از سرعت دورانی موتور می‌باشد و در نتیجه با در نظر گرفتن گام‌های بال اسکرو با بالا رفتن سرعت دورانی موتور سرعت خطی افزایش می‌یابد و با کاهش سرعت دورانی، سرعت خطی نیز کاهش می‌یابد، بنابراین در صورتی که خطای جابجایی و مشتق آن مقدار بزرگ منفی باشد با افزایش حداکثری خروجی و سرعت خطی سعی در جبران این خطا شده است. سایر قواعد نیز بر همین مبنای و با در نظر گرفتن ضریب تاثیر بالاتر برای خطای جابجایی استنتاج شده است. همچنین در کنترل کننده فازی طراحی شده، ضرایب ورودی خطای جابجایی، ورودی مشتق خطای جابجایی و خروجی به ترتیب برابر 2، 0/07 و 1 است.

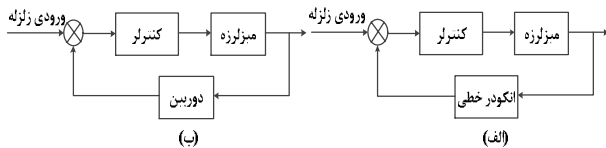
بسته به نوع محرکه‌ی به کار گرفته شده به طور عمده دو نوع میز لرزه وجود دارد: میز لرزه الکتروپنوماتیک و میز لرزه با محرکه‌ی هیدرولیکی. هر دو نوع معایب و مزایایی نسبت به هم دارند. بزرگ‌ترین مزایای میز لرزه‌ی الکتروپنوماتیک قیمت پایین و هزینه کم تعمیر و نگهداری آن در قیاس با نوع هیدرولیکی می‌باشد [16]. علاوه بر اینکه محرکه میز الکتروپنوماتیکی می‌باشد روش کنترلی آن با توجه به حالت ناظری که دارد دارای این قابلیت می‌باشد که عملکرد کنترل کننده‌ی سطح پایین‌تر را بهبود بخشیده و خطای آن را کاهش دهد. علاوه بر این می‌توان کنترل کننده‌ی ناظر را با سایر کنترل کننده‌ها جایگزین کرده و عملکرد آن را بهبود بخشید.



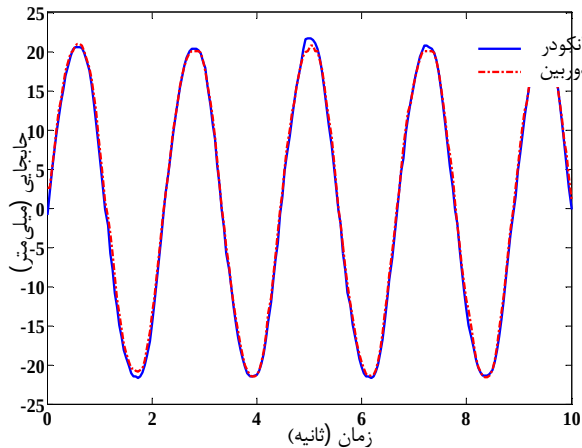
شکل 3 ساختار کنترل کننده‌ی تناسبی- انتگرال گیر



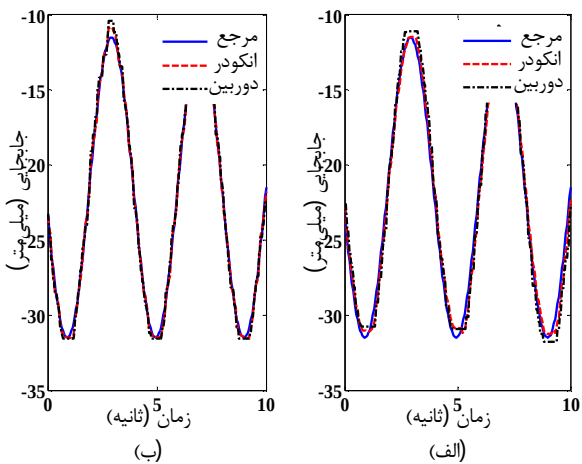
شکل 4 اجزای میز لرزه و سیستم اندازه‌گیری مبتنی بر پردازش تصویر



شکل 8 ساختار کنترلی میز (الف) با بازخورد انکودر (ب) با بازخورد دوربین



شکل 9 جابجایی اندازه‌گیری شده توسط انکودر و برنامه‌ی پردازش تصویر با ورودی موج سینوسی در حالت آفلاین



شکل 10 مقایسه‌ی بین مقدار مرجع و جابجایی اندازه‌گیری شده توسط انکودر و دوربین در حالت آنلاین (الف) سیستم قبلی با بازخورد انکودر (ب) سیستم پیشنهادی با بازخورد دوربین

جدول 2 مقایسه‌ی بین مقدار داده‌ی مرجع و جابجایی اندازه‌گیری شده

توسط انکودر و دوربین		
خطای RMS (%)		
بازخورد دوربین	بازخورد انکودر	
3/8673	2/0197	دوربین-داده‌ی مرجع
2/6427	1/2646	انکودر-داده‌ی مرجع
2/8449	1/4692	دوربین-انکودر

به منظور سنجش عملکرد سیستم در حالت واقعی از یک ورودی زلزله استفاده می‌شود. در اینجا از زلزله‌ی طیس که سال 1978 در ایران رخ داده

جابجایی میز به کار گرفته شده است. بنابراین داده‌های شبیه‌سازی زلزله و خروجی انکودر به کنترلر داده می‌شود تا تغییرات لازم اعمال شود و خطا تا حد ممکن کاهش یابد.

همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است، در سیستم جدید انکودر خطی با دوربین و برنامه‌ی پردازش تصویر به منظور اندازه‌گیری جابجایی میز جایگزین شده است. برای سادگی در این شکل حلقه‌ی داخلی نشان داده نشده است.

4- نتایج آزمایشات

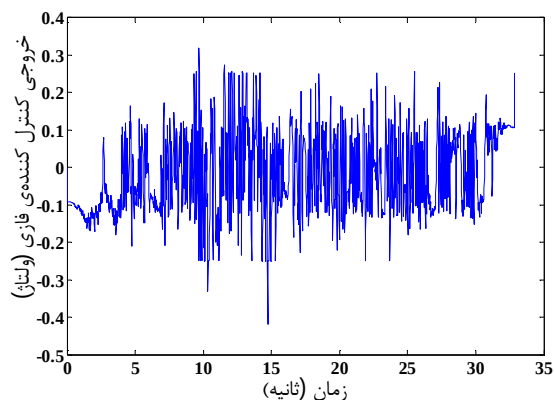
برای تأیید عملکرد سیستم مبتنی بر پردازش تصویر در ابتدا به صورت آفلاین مقایسه‌ای بین نتایج الگوریتم پردازش تصویر و خروجی انکودر صورت گرفته است. برای این کار از یک دوربین با 240 فریم در ثانیه استفاده شده و یک موج سینوسی به عنوان ورودی به میز داده شده است. سپس جابجایی میز توسط انکودر و پردازش تصویر به صورت هم‌زمان محاسبه شده که نتایج حاصل در شکل 9 قابل مشاهده است.

نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم پردازش تصویر با دقت خوبی عملکردی نزدیک به انکودر دارد و خطای آن در مقایسه با خروجی انکودر حدود 3 درصد است. بنابراین می‌توان به برنامه‌ی پردازش تصویر به عنوان یک سنسور جابجایی جایگزین با دقت مناسب اعتماد کرد. از آنجا که هدف به دست آوردن جابجایی میز به صورت بلادرنگ است یک وب‌کم با قابلیت فیلم‌برداری 30 فریم در ثانیه استفاده شده است. این دوربین دارای یک سنسور CMOS با زاویه دید 54 درجه است. برنامه‌ی پردازش تصویر هر بار به صورت بلادرنگ یک فریم از دوربین دریافت می‌کند و پس از محاسبه‌ی میزان جابجایی میز بر حسب میلی‌متر نتایج به دست آمده را از طریق شبکه به کامپیوتر میزبان ارسال می‌کند. سپس کنترلر موجود در کامپیوتر میزبان که اکنون از بازخورد برنامه‌ی پردازش تصویر استفاده می‌کند، با توجه به میزان جابجایی میز و مقدار مرجع تغییرات لازم را اعمال می‌کند.

برای سنجش صحت عملکرد سیستم جدید و مشاهده‌ی تأثیر استفاده از پردازش تصویر در برنامه‌ی کنترلی میز، دو آزمایش انجام شده است. در آزمایش اول کنترل‌کننده از خروجی انکودر به عنوان بازخورد استفاده می‌کند. سپس خروجی انکودر و برنامه‌ی پردازش تصویر با مقدار مرجع مورد مقایسه قرار گرفته می‌گیرد. در آزمایش دوم برنامه‌ی پردازش تصویر جانشین انکودر شده و بازخورد کنترل‌کننده از آن تأمین می‌شود و آزمایش اول بار دیگر تکرار می‌شود. نتایج حاصل در شکل 10 نشان داده است. رابطه‌ی 4 نیز برای محاسبه‌ی خطای آرام‌اس استفاده شده است.

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x(i) - x(i)_{ref})^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x(i))^2}} \times 100 \quad (4)$$

در این رابطه x سیگنال بدست آمده از آزمایش و x_{ref} سیگنال مرجع می‌باشد. N نیز برابر تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده در هر آزمایش می‌باشد. اثربخشی سیستم پیشنهادی در کنترل حرکات میز در جدول 2 نشان داده شده است. در آزمایش فوق داده‌ی مرجع یک موج سینوسی است که به عنوان ورودی به سیستم داده می‌شود. داده‌های جدول 2 نتایج قابل قبولی را از سیستم پیشنهادی نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج در صورت جایگزینی انکودر با برنامه‌ی پردازش تصویر، سیستم در بیشینه مقدار اختلاف، خطایی حدود 3/5 درصد خواهد داشت.



شکل 12 تغییرات خروجی کنترل کننده فازی در شبیه‌سازی زلزله‌ی طبس

جدول 3 میزان خطای انکودر و برنامه‌ی پردازش تصویر در شبیه‌سازی زلزله‌ی طبس در سیستم مبتنی بر پردازش تصویر

خطای RMS (%)	
4/8449	دوربین - داده‌ی مرجع
5/1882	انکودر - داده‌ی مرجع
5/9398	دوربین - انکودر

برای کنترل میز به صورت بلادرنگ دو آزمایش طراحی شد. در آزمایش اول کنترل کننده از خروجی انکودر به عنوان بازخورد استفاده می‌کند و در آزمایش دوم دوربین و برنامه‌ی پردازش تصویر جایگزین انکودر می‌شود. به عبارت بهتر یک بار انکودر و بار دیگر برنامه‌ی پردازش تصویر به عنوان بازخورد کنترل کننده استفاده می‌شوند، اما در هر دو حالت انکودر و برنامه‌ی پردازش تصویر به صورت همزمان به منظور اندازه‌گیری بلادرنگ جابجایی میز به کار گرفته می‌شوند. در این دو آزمایش با مقایسه‌ی داده‌ی مرجع با خروجی انکودر و خروجی برنامه‌ی پردازش تصویر مشاهده می‌شود که خطای آراماس بین خروجی برنامه‌ی پردازش تصویر و داده‌ی مرجع در حالتی که کنترل کننده از بازخورد دوربین استفاده می‌کند، حدود 3/5 درصد است. این عدد برای سیستمی که از بازخورد انکودر استفاده می‌کند، کمی بهتر بوده و حدود 2 درصد است و در نتیجه چنین سیستمی خطای کمتری را نشان می‌دهد. این مسئله برای خروجی انکودر نیز در این دو آزمایش صادق است. در واقع در صورتی که از بازخورد برنامه‌ی پردازش تصویر استفاده شود، جابجایی اندازه‌گیری شده توسط انکودر نسبت به داده‌ی مرجع آراماس خطای 2/6 درصدی دارد، در حالی که با تغییر بازخورد به انکودر این خطا به 1/2 درصد می‌رسد. با وجود نتایج به دست آمده و با توجه به مزیت‌های ذکر شده برای سیستم پیشنهادی، این سیستم جایگزین قابل اعتمادی است و کارایی آن با دقت مطلوبی نزدیک به سیستم قبلی است.

همچنین زلزله‌ی طبس به عنوان یک نمونه‌ی ورودی واقعی به کار گرفته شد. سیستم ارائه شده در شبیه‌سازی یک زلزله‌ی واقعی و کنترل بلادرنگ میز لرزه نیز بسیار مؤثر عمل کرد تا جایی که خطای آراماس در بیشینه مقدار خود برابر 5 درصد شد. لازم به ذکر است که در این آزمایش کنترل کننده تنها از بازخورد دوربین و برنامه‌ی پردازش تصویر استفاده کرده است. لذا در مقایسه با سیستمی که از انکودر به عنوان سنسور جابجایی استفاده می‌کند، سیستم پیشنهادی از یک وب‌کم بسیار ارزان‌قیمت برای

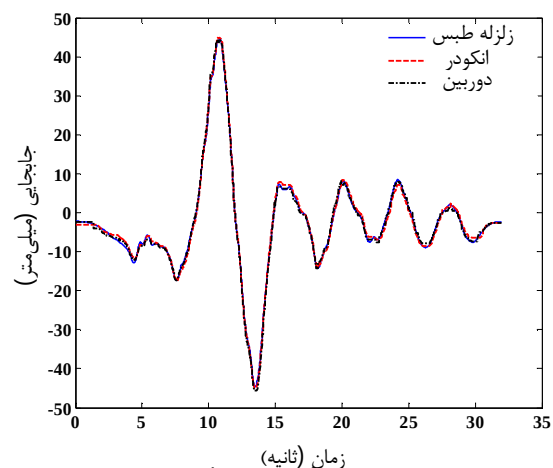
است به عنوان یک نمونه ورودی استفاده شده است [17]. در این مورد نیز از سیستم پردازش تصویر به عنوان سنسور جابجایی و بازخورد کنترلی استفاده می‌کند. نتایج در شکل 11 نشان داده شده است. همچنین نمودار تغییرات خروجی کنترل کننده فازی در شبیه‌سازی این زلزله در شکل 12 قابل مشاهده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیستم پیشنهادی در شبیه‌سازی زلزله‌ی واقعی نیز به خوبی عمل کرده و تأثیر مناسبی در کنترل کننده داشته است. در این آزمایش کنترل کننده از دوربین و برنامه‌ی پردازش تصویر به عنوان بازخورد استفاده کرده است. خطای سیستم مبتنی بر پردازش تصویر در بیشینه مقدار خود حدود 5 درصد است. میزان خطای انکودر و برنامه‌ی پردازش تصویر در شبیه‌سازی زلزله‌ی مذکور در جدول 3 آمده است.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سیستم اندازه‌گیری جابجایی بلادرنگ مبتنی بر پردازش تصویر برای کنترل میز لرزه ارائه شد. همچنین ساختاری دو سطحی برای کنترل میز به کار گرفته شد. نتایج حاکی از آن است که استفاده از کنترل کننده فازی ناظر خطای شبیه‌سازی زلزله را تا حد زیادی کاهش داده است. این مورد درباره‌ی کنترل کننده فازی ناظر با ورودی‌های خطای جابجایی و مشتق آن بیشتر به چشم می‌خورد و این کنترل کننده توانسته است خطای ردیابی پروفیل زلزله‌ی طبس و همچنین موج سینوسی شبیه‌سازی شده را کاهش دهد. به عنوان مثال در صورتیکه از کنترل کننده فازی ناظر استفاده شود، آراماس خطای جابجایی برای موج سینوسی نسبت به حالتی که کنترل کننده ناظر وجود نداشته باشد، تا حدود 80 درصد بهبود می‌یابد. همچنین با تغییر ضرایب فازی خروجی از 1 به 0/5 و سپس به 0/25 مشاهده می‌شود که آراماس خطای جابجایی نیز افزایش می‌یابد. در واقع کاهش این ضریب از یک حد خطای شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد.

برای سنجش کارایی الگوریتم پردازش تصویر نیز، جابجایی اندازه‌گیری شده با خروجی انکودر، به عنوان یک مرجع تأیید شده برای اندازه‌گیری جابجایی، در حالت آفلاین مقایسه شد. این الگوریتم نتایج بسیار نزدیکی به انکودر ارائه داد، به طوری که خطای آراماس در بیشینه مقدار به 3 درصد می‌رسد. این آزمایش صرفاً به منظور صحت‌سنجی برنامه‌ی پردازش تصویر انجام گرفته و در این حالت از دوربین و برنامه‌ی پردازش تصویر به منظور کنترل میز استفاده نشده است.



شکل 11 مقایسه بین ورودی مرجع (زلزله‌ی طبس) و جابجایی اندازه‌گیری شده توسط انکودر و برنامه‌ی پردازش تصویر (بازخورد دوربین)

اندازه‌گیری جابجایی بهره می‌گیرد. علاوه بر این دقت مطلوب، عملکرد بلادرنگ و عدم نیاز به تماس با میز لرزه از دیگر مزایای سیستم جدید است.

6- مراجع

- [8] D. Lee, C. Lim, Y. Park, Y. Park, H. Kim and J. Park, The tracking control of uni-axial servo-hydraulic shaking table system using time delay control, in *SICE-ICASE International Joint Conference*, Busan, Korea, 2006.
- [9] J. Geoffrey Chase, N. H. Hudson, J. Lin, R. Elliot and A. Sim, Nonlinear Shake Table Identification and Control for Near-Field Earthquake Testing, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 461-482, 2005.
- [10] J. Ji, W. Yan, Z. Li, F. Li, The Large-scale Nine-Shaking-Tables Array System: Development, Construction, Application and Research, in *5th European Conference on Structural Control*, Genoa, Italy, 2012.
- [11] S. Thenozhi, W. Yu, R. Garrido, A novel numerical integrator for velocity and position estimation, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 35, No. 6, pp. 824-833, 2013.
- [12] J. Jantzen, *Foundations of Fuzzy Control*, Chichester, England: John Wiley & Sons, 2007.
- [13] M. Soleymani, V. Nekoonam, A.A. Ghadimi, Optimal fuzzy controller design for an active tripod stable platform using virtual prototyping, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 168-174, 2014. (In Persian)
- [14] L. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, New Jersey, USA: Prentice Hall, 1997.
- [15] S.A. Moosavi, A. Entezari, Active control of structures using fuzzy approach: Theory and Practice, in *11th students Conference on Civil Engineering*, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran, 2004. (In Persian)
- [16] T. Baran, A.K. Tanrikulu, C. Dundar and A.H. Tanrikulu, Construction and Performance Test of a Low-Cost Shake Table, *Experimental Techniques*, Vol. 35, No. 4, pp. 8-16, 2011.
- [17] Tabas earthquake pattern. Retrieved from: <http://peer.berkeley.edu/nga/data?doi=NGA0138>.
- [1] A. Keymasi Khalaji, S.A.A. Moosavian, Design and implementation of a fuzzy sliding mode control law for a wheeled robot towing a trailer, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 81-88, 2014. (In Persian)
- [2] A. Mazen Wahbeh, John P. Caffrey, Sami F. Masri, Direct Measurement of Displacements in Vibrating Structures Through Vision-Based Approaches, *Emirates Journal of Engineering Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 105-110, 2004.
- [3] J. Jae Lee, Y. Fukuda, M. Shinozuka, S. Cho, C. Yun, Development and Application of a Vision-Based Displacement Measurement System for Structural Health Monitoring of Civil Structures, *Journal of Smart Structures and Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 373-384, 2007.
- [4] P. Rodrigues, Monitoring of Induced Motions in a Shake Table Test via Optical Motion Tracking: Preliminary Results, in *Proceeding of the 43rd Asilomar conference on Signals, systems and computers*, Pacific Grove, USA, 1-4 November, 2009.
- [5] D. Mas, J. Espinosa, A.B. Roig, B. Ferrer, J. Perez, C. Illueca, Measurement of Wide Frequency Range Structural Microvibrations with a Pocket Digital Camera and Sub-Pixel Techniques, *Optical Society of America*, Vol. 51, No. 14, pp. 2664-2671, 2012.
- [6] K. Seki, M. Iwasaki, M. Kawafuku, H. Hirai and K. Yasuda, Adaptive Compensation for Reaction Force With Frequency Variation in Shaking Table Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 10, pp. 3864 - 3871 2009.
- [7] X. Yang, H. Hongxing and Han Junwei, Three State Controller Design of