

طراحی کنترل کننده مکانیزم منعطف موازی

نیلوفر رمودی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،
nilufar.ramrudi@ut.ac.ir

فرزاد آیت‌اله‌زاده شیرازی*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،
fshirazi@ut.ac.ir

مریم مهنما

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،
m.mahnama@ut.ac.ir

مهران خانلقی

دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،
mehrankh97@gmail.com

چکیده

در این مقاله، کنترل یک مکانیزم منعطف شامل دو عملگر پیزوالکتریک بررسی می‌شود که قابلیت حرکت در مقیاس میکرونی در دو جهت X و Y را داراست. کاربرد این مکانیزم در میکروسکوپ نیروی اتمی برای حرکت دادن نمونه در مسیرهای مشخص و اسکن سطح نمونه است. هدف این تحقیق کاهش میزان خطای حرکتی و بهبود قابلیت دنبال کردن مسیر در مکانیزم است. ابتدا به معرفی مکانیزم منعطف مدنظر و ویژگی‌های آن پرداخته می‌شود. پس از معرفی هیستریزس و مدل‌های ریاضی آن، با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات پارامترهای مدل هیستریزس به‌دست آمده و در انتها پس از شناسایی مدل ریاضی پیزوالکتریک، یک کنترل کننده انتگرالی-تناسبی برای سیستم حلقه بسته پایدار طراحی می‌شود که خطای ردیابی کمتر از ۰/۱ درصد حاصل شده است. **واژه‌های کلیدی:** الگوریتم PSO، عملگر پیزوالکتریک، کنترل کننده PI، مکانیزم منعطف، هیستریزس.

Controller Design for a Compliant Parallel Mechanism

N. Ramrudi	School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
F. A. Shirazi	School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
M. Mahnama	School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
M. Khanloghi	School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

This research presents control of a XY Nano-positioning stage using a compliant parallel mechanism with small crosstalk and yaw motion that are used in atomic force microscopes (AFM). The stage consists of two flexure displacement amplifiers driven by piezoelectric actuators. The piezoelectric actuator is explored to simultaneously reduce error of motion and fine motion tracking using controller. After identifying the system features, the Bouc-Wen hysteresis Model is established and the parameters of model are identified through particle swarm optimization (PSO) algorithm. An inverse feedforward control strategy is developed, then the PI controller is designed based on Ziegler-Nichols method. At the end, the performance of the mechanism is evaluated.

Keywords: Bouc-Wen Model, Compliant Mechanism, Feedforward Control, Hysteresis, PI Controller, Piezoelectric Actuator, PSO Algorithm.

۱- مقدمه

بلا و عدم وابستگی به دما از مزیت‌های پیزوالکتریک‌ها هستند [۱، ۲]. مقالات زیادی به طراحی مکانیزم‌های مختلف برای حرکت صفحه‌های صفحه داخلی^۴ پرداخته‌اند. بطور کلی مکانیزم‌های منعطف برحسب استقلال یا عدم استقلال دو راستای حرکتی به دو دسته‌ی سری و موازی تقسیم‌بندی می‌شوند. مکانیزم‌های سری در مقایسه با مکانیزم موازی معایبی چون خطای زیاد و عملکرد دینامیکی متفاوت در دو راستا دارند، در صورتی‌که مکانیزم‌های موازی قابلیت جابجایی بیشتر، دقت بالاتر، فرکانس مود اول بالاتر، مقاومت جابجایی و حجم کمتری دارند [۱]. لی و ژو (۲۰۱۲، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱)، به معرفی یک مکانیزم موازی پرداختند. جابجایی پیزوالکتریک به کمک یک

مکانیزم‌های منعطف^۱ به‌صورت گسترده‌ای در محیط‌های صنعتی و علمی همانند میکروسکوپ نیروی اتمی یا AFM استفاده می‌شود. مزیت مکانیزم‌های منعطف در این است که به دلیل عدم استفاده از مفصل در آن‌ها، معمولاً فاقد لقی، اصطکاک و پس‌زنی^۲ بوده و قابلیت تکرارپذیری و همچنین مقاومت خستگی بالایی دارند. در مکانیزم‌های منعطف معمولاً از پیزوالکتریک‌ها به عنوان عملگر استفاده می‌شود. رزولوشن نانومتری، نیروی مقاوم^۳ زیاد، سفتی زیاد، سرعت پاسخگویی

¹ Compliant Mechanisms

² Backlash

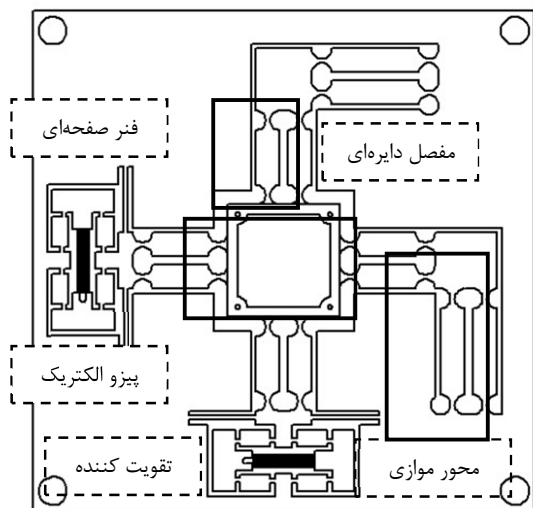
³ Blocking Force

⁴ Stage

تقویت‌کننده جابجایی، تقویت می‌شود و به کمک میله‌ها به صفحه داخلی منتقل می‌شود. طراحی بر اساس مدل جسم صلب و ماتریس سفتی مکانیزم صورت گرفته است و به ضریب تقویت ۵/۸۵ با تداخل ۱/۵ بین دو محور دست یافته‌اند [۳-۶]. لی و همکاران (۲۰۱۳، ۲۰۱۲) با روش ماتریس به طراحی یک مکانیزم موازی با تقویت‌کننده پلی^۱ پرداختند و سفتی، دقت و حرکت مکانیزم را بررسی کردند. این مکانیزم دارای ضریب تقویت ۴/۲ و تداخل ۲٪ می‌باشد [۷]. ۸. تانگ و همکاران (۲۰۱۲) به طراحی بهینه یک مکانیزم موازی با تقویت‌کننده اهرمی^۲ با مفاصل موازی پرداختند و توانستند به ضریب تقویت ۵ دست یابند [۹].

پژوهش‌های بیان شده به طراحی مکانیزم‌های مختلف پرداخته‌اند اما ضریب تقویت مکانیزم‌های طراحی شده مقدار مطلوبی نداشت، در نتیجه به طراحی یک مکانیزم منعطف پرداخته شد. مکانیزم موازی مورد بحث به صورت بهینه طراحی شده تا حداکثر ضریب تقویت حاصل شود. در ابتدا مدل مکانیزم و بخش‌های مختلف آن انتخاب شد. این مکانیزم از تقویت‌کننده منعطف-افزونی^۳، مفاصل دایروی، محور موازی و فنر صفحه‌ای تشکیل می‌شود که فنرهای صفحه‌ای تاثیر زیادی بر کاهش جابجایی در راستای نامطلوب و افزایش فرکانس مود اول مکانیزم دارند. سپس بهینه‌سازی هندسی در دو گام انجام می‌شود. گام اول، شامل دسته‌بندی تمام پارامترهای هندسی و آنالیز حساسیت است به این منظور که پارامترهایی که تاثیر بیشتری در ضریب تقویت جابجایی و فرکانس مود اول دارند، شناسایی شوند. در گام دوم، این پارامترها به عنوان پارامترهای کنترل‌کننده هدف در بهینه‌سازی نهایی شرکت داده می‌شوند [۱۰]. این مکانیزم در شکل ۱ نشان داده شده است، پیژوالکتریک عمودی، پیژوالکتریک ۱ و پیژوالکتریک افقی، پیژوالکتریک ۲ نامیده می‌شود.

برای افزایش دقت، سرعت پاسخگویی و پهنای باند و کاهش اثر تداخل مکانیزم‌های منعطف، حتی با ضریب تقویت بالا، باید از کنترل‌کننده استفاده شود. تداخل به معنای آن است که با اعمال ورودی در راستای X ، خروجی در دو راستای X (مطلوب)، Y (ناخواسته) می‌باشد. لی و ژو (۲۰۰۹) به کنترل مکانیزم با معکوس مدل هیستریزس بوک-ون^۴ و بررسی اثر ولتاژ پسخور با PID و SMCPE پرداختند [۳]. ژیاو تن و همکاران (۲۰۰۵) از معکوس مدل هیستریزس پریساج^۵ با AC^6 به کنترل مکانیزم پرداخت [۱۱]. کیم و همکاران (۲۰۱۲) یک مدل پیش‌بینی‌کننده SMC^۷ با معکوس مدل هیستریزس برای کاهش خطای هیستریزس طراحی کردند [۱۲]. شی جیا و همکاران (۲۰۱۷) به کنترل مکانیزم بدون جبران‌ساز پرداخت و با طراحی ARC^۸ مکانیزم را کنترل کرد [۱۳]. در این مقاله، با توجه به میزان کم تداخل، برای کاهش خطا از جبران‌ساز هیستریزس مدل بوک-ون و PID استفاده شد.



شکل ۱- نمای کلی مکانیزم [۱۰]

ویژگی‌های مکانیزم موازی در جدول ۱ را نشان داده شده است. همچنین مود اول و دوم مکانیزم به ترتیب ۲۵۷/۱۶ و ۳۱۶/۸۸ هرتز و داخل صفحه‌ای حرکتی می‌باشند.

جدول ۱- ویژگی‌های مکانیزم

تداخل بین دو راستاهای X و Y	ضریب تقویت مکانیزم با اعمال ولتاژ به پیژوالکتریک ۲	تداخل بین دو راستاهای X و Y	ضریب تقویت مکانیزم با اعمال ولتاژ به پیژوالکتریک ۱
0.12	-7.175	0.163	-7.1677

در بخش اول مقاله به معرفی پیژوالکتریک، مدل هیستریزس پیژوالکتریک، روش داده‌برداری، در بخش دوم به شناسایی پارامترهای مدل هیستریزس و در نهایت به شرح کنترل مکانیزم به کمک جبران‌ساز با معکوس مدل بوک-ون پرداخته می‌شود.

۲- پیژوالکتریک

بزرگترین مشکل استفاده از پیژوالکتریک، رفتار غیرخطی آن که وابسته به هیستریزس^۹، خزش^{۱۰} و اثر ارتعاشات می‌باشد. اثر خزش در استفاده‌ی طولانی مدت و اثر ارتعاشات در فرکانس‌ها بالا است؛ بنابراین برای تحلیل کوتاه مدت و فرکانس پایین، تنها عامل ایجاد خطا هیستریزس می‌باشد. هیستریزس رفتار غیرخطی بین ولتاژ و جابجایی خروجی از پیژوالکتریک است که موجب خطایی به بزرگی ۱۵ - ۱۰ درصد اندازه مطلوب، در سیستم حلقه باز می‌شود. از همین رو برای رسیدن به دقت بالا در مکانیزم، لازم است هیستریزس پیژوالکتریک

⁹ Hysteresis

¹⁰ Creep

¹ Bridge Amplifier

² Lever displacement Amplifier

³ Flextensional Amplifier

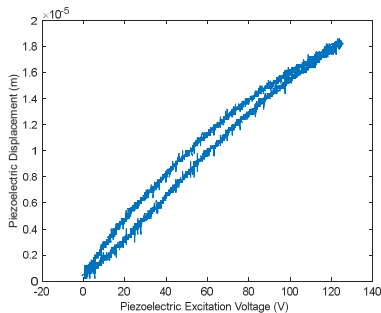
⁴ Bouc-Wen

⁵ Preisach

⁶ Adaptive Control

⁷ Sliding Mode Control

⁸ Adaptive Robust Control



شکل ۲- نمودار جابجایی پیزوالکتریک بر حسب ولتاژ تحریک

۳- شناسایی پارامترهای مدل

دست‌یابی به پارامترهای معادله هیستریزس با روش‌های عادی، موثر نبوده و برای حل این معادلات باید از روش‌هایی مثل الگوریتم ژنتیک^۴ و بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۵ استفاده شود که PSO بازدهی محاسباتی بهتری دارد [۱۶]. این روش‌ها برای پیدا کردن پارامترهای مناسب با هدف کاهش اختلاف بین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی به کار می‌رود. در این حالت، تابع هدف به صورت زیر قابل بیان است:

$$F(x) = \sum_{m=1}^N [\hat{x}_0(m) - x_0(m)]^2 \quad (3)$$

که در آن N تعداد کل نمونه‌ها، $\hat{x}_0(m)$ نتایج تجربی و $x_0(m)$ خروجی مدل هیستریزس در نمونه m ام می‌باشد. تابع هدف معمولاً یک رابطه چند بعدی و به شدت غیرخطی است [۱۷].

۴- طراحی کنترل کننده

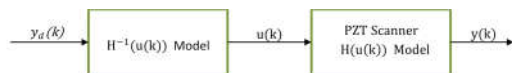
با توجه به هیستریزس پیزوالکتریک، لازم است تا خطای حاصل از آن جبران شود. برای جبران هیستریزس معمولاً از کنترل رو به جلو^۶ به کمک معکوس مدل دینامیکی با هیستریزس استفاده می‌شود. برای افزایش دقت می‌توان از کنترل پس‌خور نیز استفاده کرد [۱۴].

۴-۱- جبران ساز هیستریزس

معکوس مدل، سیگنال خواسته شده را به سیگنال ولتاژ جبرانی تبدیل کرده و باعث می‌شود سیگنال خروجی سیستم همانند سیگنال خواسته شده باشد:

$$y_d(k) = H[u(k)] = H[H^{-1}[y_d(k)]] \quad (4)$$

که در آن $y_d(k)$ جابجایی خواسته شده، $u(k)$ سیگنال ولتاژ ورودی به پیزوالکتریک و $y(k)$ جابجایی خروجی است [۱۸]. در شکل ۳ طرحواره این روش نشان داده شده است.



شکل ۳- طرحواره کنترل حلقه باز مکانیزم

جبران شود [۱۴].

۲-۱- مدل دینامیکی

در این تحقیق از مدل بوک-ون، با توجه به تعداد کم پارامترها، سادگی مدل‌سازی و کاربرد در محدوده فرکانسی بالا، برای توصیف ریاضی رفتار هیستریزس ماده و مدل‌سازی دینامیکی سیستم استفاده می‌شود. این مدل از دیفرانسیل غیر خطی درجه اول تشکیل شده که ورودی و خروجی را به هم مرتبط می‌کند. بدین ترتیب مدل دینامیکی مکانیزم با هیستریزس غیر خطی بوک-ون به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = k(du - h) + p \quad (1)$$

که در آن m جرم، b ضریب میرایی، k سفتی، x جابجایی محور X مکانیزم \dot{x} و \ddot{x} مشتق اول و دوم x نسبت به زمان می‌باشند. همچنین کمیت d ضریب پیزوالکتریک، u ولتاژ ورودی و h هیستریزس را نمایندگی می‌کنند. پارامتر p بیانگر آشفتنی سیستم به‌خاطر عدم قطعیت پارامترها^۱ و دینامیک مدل نشده^۲ و سایر دلایل ناشناخته می‌باشد [۱۴]. به منظور بیان رفتار هیستریزس، با انتخاب پارامترهای مناسب از مدل زیر استفاده می‌گردد [۱۵].

$$\dot{h} = \alpha du - \beta |\dot{u}| |h|^{n-1} - \gamma \dot{u} |h|^n \quad (2)$$

d ، ضریب پیزوالکتریک، u ولتاژ ورودی و h هیستریزس را به صورت جابجایی نشان می‌دهد. بر اساس این رابطه، مقدار و شکل هیستریزس (h) با توجه به پارامترهای α ، β ، γ ، n مشخص می‌شود که n با توجه به تغییر رفتار از الاستیک به پلاستیک تعیین شده و ملاکی از پاسخ ملایم^۳ آن است که برای مکانیزم‌ها و رفتار الاستیک، $n=1$ می‌باشد.

۲-۲- داده‌برداری از پیزوالکتریک

با توجه به محدوده فرکانسی مورد مطالعه، فرکانس داده‌برداری از پیزوالکتریک برابر با 12.5 kHz انتخاب شده است که به معنای داده‌برداری در گام‌های زمانی ۸۰ میکروثانیه است. دامنه‌ی ولتاژ نیز با مشاهده‌ی ولتاژ داده شده به پیزوالکتریک توسط اسیلوسکوپ کنترل شده و فرکانس آن روی 2 Hz تنظیم گردیده است.

نمودار جابجایی پیزوالکتریک بر حسب ولتاژ تحریک آن در شکل ۲ نشان داده شده است. در این آزمایش هیستریزس پیزوالکتریک در حالت بدون بار داده‌برداری شد.

⁴ Genetic Algorithm

⁵ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁶ Feedforward

¹ Parameter Uncertainties

² Unmodeled Dynamics

³ Smoothness

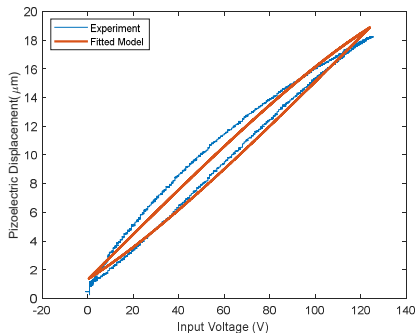
جدول ۳- نتایج بهینه‌سازی

de	α	β	γ	RMS	$e_{RMS}(\%)$
1.62e-7	0.92	0.102	0.0014	5.7e-7	3

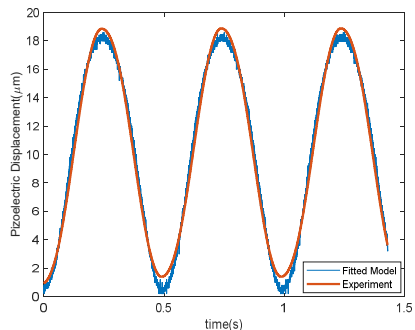
پارامترهای RMS و e_{RMS} به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N [\hat{x}_0(m) - x_0(m)]^2} \quad (7)$$

$$e_{RMS} = \frac{rms}{\max(x_0) - \min(x_0)} \quad (8)$$



شکل ۶- هیستریزیس مدل شده (ولتاژ-جابجایی)



شکل ۷- هیستریزیس مدل شده (زمان-جابجایی)

۲-۵- نتایج کنترل

خطای ایجاد شده در حالت بدون جبران‌ساز زیاد می‌باشد، برای مثال خطای جابجایی در اثر تحریک پیزوالکتریک ۱ و خروجی مطلوب X ، $RMS = 4.2831 \mu m$ می‌باشد.

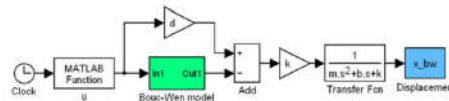
۱-۲-۵ نتایج کنترل حلقه باز

نتایج جبران‌ساز برای مکانیزم در جدول ۴ آورده شده است.

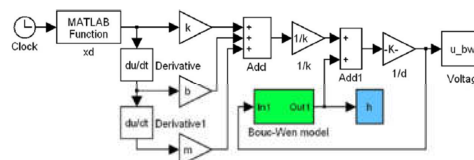
جدول ۴- نتایج جبران‌ساز برای مکانیزم

	ورودی اسکن سطح: RMS(µm)	ورودی پله: خطای مانا(µm)
راستای X	1.3907e-1	2.914e-4
راستای Y	1.2502e-3	2.300e-4

باتوجه به روابط ۱ و ۲، مدل دینامیکی مکانیزم در نرم‌افزار MATLAB-Simulink شبیه‌سازی می‌شود. مدل دینامیکی و معکوس مدل دینامیکی در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- مدل دینامیکی [۱۴]



شکل ۵- معکوس مدل دینامیکی [۱۴]

۲-۴- کنترل کننده PI

با توجه به جدول ۱ دو محور حرکتی تداخل کمی دارند؛ بنابراین انتظار می‌رود که حرکت دو محور از هم مستقل باشند، پس می‌توان تداخل را در نظر نگرفت و از دو کنترل‌کننده تک ورودی-تک خروجی برای استفاده کرد.

۵- نتایج

هدف این مکانیزم طی کردن مسیر برای اسکن سطح نمونه می‌باشد و هدف از طراحی جبران‌ساز، کاهش خطا می‌باشد. رابطه (۵) ورودی پله به پیزوالکتریک‌ها و رابطه (۶) به نوعی اسکن سطح می‌باشد. در راستای X به صورت سینوسی با فرکانس ۲۰ هرتز نوسان و در راستای Y به صورت خطی حرکت کرده و مسیری برای اسکن ایجاد می‌کند.

$$x_{desired} = y_{desired} = -80 \mu m \quad (5)$$

$$y_{desired} = \frac{100}{0.5} \times t [\mu m] \quad (6)$$

$$x_{desired} = \left(40 \sin\left(40\pi t - \frac{\pi}{2}\right) + 40\right) [\mu m]$$

۱-۵- نتایج مدل‌سازی

با داده‌برداری از پیزوالکتریک، حلقه هیستریزیس پیزوالکتریک به دست می‌آید. به کمک الگوریتم PSO پارامترهای مدل هیستریزیس به دست می‌آیند. در جدول ۲، پارامترهای الگوریتم نشان داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای الگوریتم PSO

روش جهش	روش w	روش c_1 & c_2	گام	ذرات
آشوب	آشوب	خطی	۳۰	۱۰۰

نتایج بهینه‌سازی در جدول ۳ و در شکل‌های ۶ و ۷ هیستریزیس مدل شده نشان داده شده است.

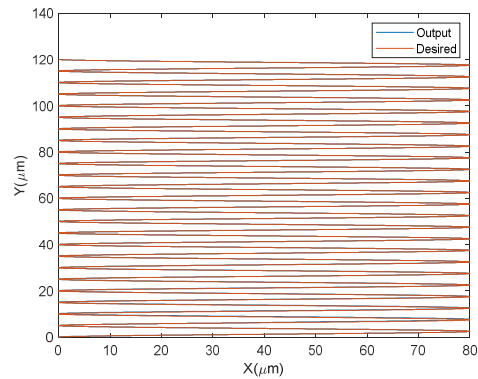
۵-۲-۲ حلقه بسته

پارامترهای کنترل کننده PI به کمک روش زیگلر-نیکولز^۱ تنظیم شدند. نتایج کنترل مدار بسته در جدول ۵ نشان داده شده است.

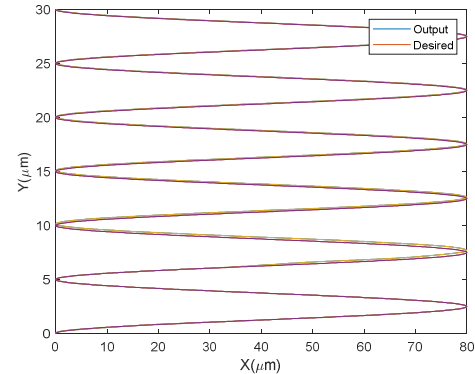
جدول ۵- نتایج کنترل کننده مکانیزم

درصد خطا $e_{RMS}(\%)$	ورودی اسکن سطح: RMS(μm)	ورودی پله: خطای مانا(μm)	راستای x
0.09	$7.6361e-2$	0	راستای x
0.009	$2.6536e-2$	0	راستای y

همانگونه که مشاهده می شود میزان خطا کمتر از ۰/۱ درصد است. اسکن سطح در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸- اسکن سطح



شکل ۹- اسکن سطح (زوم شده)

با به دست آوردن تابع تبدیل حلقه بسته و بررسی مقادیر ویژه، مقادیر تکین^۲ و نمودار بود مکانیزم مشخص شد که مقادیر ویژه سیستم منفی هستند که نشان دهنده پایداری سیستم در هر دو راستا با پهنای باند نزدیک به 3000 rad/sec است.

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

هدف این تحقیق طراحی کنترل کننده برای مکانیزم منطف مورد

استفاده در دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی بود. ابتدا خلاصه ای از ویژگی های مکانیزم منطف مورد بحث قرار گرفت و توضیحاتی در مورد پیژوالکتریک، مدل هیستریزس آن، روش های شناسایی مدل هیستریزس، روش جبران هیستریزس و نیز کنترل مکانیزم پرداخته شد. در نهایت، نتایج الگوریتم PSO و کنترل حلقه باز و حلقه بسته مکانیزم بیان شد. نتایج نشان داد که مدل بوک-ون، با خطای ۳ درصد هیستریزس سیستم را تخمین می زند و کنترل حلقه بسته باعث کاهش خطای اسکن از ۴ میکرومتر به ۰/۰۷ میکرومتر می شود. در ادامه، با محاسبه مقادیر ویژه ماتریس A، مشاهده شد که مکانیزم پایدار است و با توجه به نمودار بود آن، فرکانس پهنای باند سیستم حلقه بسته حدود 3000 rad/sec به دست آمد.

۷- پیوست: الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات در مقایسه با سایر روش های بهینه سازی هوشمند عملکرد بهتری دارد، به همین علت در این تحقیق از این الگوریتم استفاده می شود. در این روش، تعدادی ذرات در یک فضای چند بعدی با موقعیت و سرعت خاص وجود دارند. ذرات در هر گام، موقعیت خود را با توجه به سرعت ارزیابی، به روزرسانی و با سایر ذرات مقایسه می کنند و هر ذره بهترین موقعیت خود را به خاطر می سپارد و با بهترین موقعیت سایر ذرات مقایسه می کند و بهترین موقعیت گروه برای تنظیم سرعت در گام های بعدی استفاده می شود.

در این الگوریتم، موقعیت هر ذره بیانگر یک جواب ممکن در فضای D بعدی می باشد. موقعیت ذره i ($i = 1 \sim N$) بیانگر تعداد کل ذرات) به صورت $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD})$ ، بهترین موقعیت قبلی ذره به صورت $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id}, \dots, p_{iD})$ و سرعت هر ذره به صورت $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}, \dots, v_{iD})$ بیان می شود. سرعت و موقعیت ذره در هر گام^۳ به ترتیب با استفاده از روابط زیر تعیین می شود:

$$v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1r_1(p_{id} - x_{id}(t)) + c_2r_2(p_{gd} - x_{id}(t)) \quad (9)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (10)$$

که در آن v_{id} سرعت، p_{id} بهترین موقعیت ذره، p_{gd} بهترین موقعیت گروه برای بعد d و ذره i می باشد. همچنین w ضریب اینرسی^۴، t شماره گام و c_1, c_2 ضرایب یادگیری^۵ هستند. علاوه بر این، پارامترهای r_1, r_2 ضرایب شتاب دهی هستند که اعداد تصادفی بین $[0, 1]$ می باشند، همچنین باید توجه داشت که ذره از محدود مجاز جست و جو خارج نشود.

مراحل الگوریتم PSO به شرح زیر می باشد:

۱. موقعیت دهی اولیه ذرات
۲. تعیین بهترین موقعیت شخصی و جمعی
۳. به روز رسانی موقعیت و سرعت برای همه ذرات
۴. بررسی شرایط و رقابت
۵. بررسی شرایط (دقت بهترین ذره^۶ و تعداد گام)

³ Iteration

⁴ Inertia Weight

⁵ Learning Factors

⁶ Tolerance

¹ Ziegler-Nichols Method

² Singular Values

[۲] مختاری کرچگانی م. و واردی کولایی س. م.، سنتز بهینه مکانیزم نرم صفحه‌ای با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۵۲، ش. ۱، ص ۳۴۵-۳۴۹، ۱۴۰۱.

[3] Li Y., and Xu Q., Design and analysis of a totally decoupled flexure-based XY parallel micromanipulator. *IEEE transactions on robotics*, Vol. 25, No.3, pp. 645-657, 2019.

[4] Xu Q., and Li Y., Novel design of a totally decoupled flexure-based XYZ parallel micropositioning stage. In *2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 866-871, 2010.

[5] Li Y., and Xu Q., A totally decoupled piezo-driven XYZ flexure parallel micropositioning stage for micro/nanomanipulation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 8, No.2, pp. 265-279, 2010.

[6] Li Y., and Xu Q., Design and robust repetitive control of a new parallel-kinematic XY piezostage for micro/nanomanipulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 17, No.6, pp. 1120-1132, 2011.

[7] Li Y., Huang J., and Tang H., A compliant parallel XY micromotion stage with complete kinematic decoupling. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 9, No.3, pp. 538-553, 2012.

[8] Li C. X., Gu G. Y., Yang M. J. Zhu L. M., Design, analysis and testing of a parallel-kinematic high-bandwidth XY nanopositioning stage. *Review of Scientific Instruments*, Vol. 84, No.12, pp. 125111, 2013.

[9] Tang, H., Li Y., and Huang J., Design and analysis of a dual-mode driven parallel XY micromanipulator for micro/nanomanipulations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 226, No.12, pp. 3043-3057, 2012.

[۱۰] نوروژی فراهانی ع.، رمرودی ن. و مهنما م.، تحلیل ارتعاشاتی مکانیزم منعطف موازی برای کاربرد در میکروسکوپ نیروی اتمی. دهمین کنفرانس آکوستیک و ارتعاشات، تهران، ایران، ۱۳۹۹.

[11] Tan X. and Baras J. S., Adaptive identification and control of hysteresis in smart materials. *IEEE Transactions on automatic control*, Vol. 50, No.6, pp 827-839, 2005.

[12] Kim B., Washington G. N., and Yoon H. S., Hysteresis-reduced dynamic displacement control of piezoceramic stack actuators using model predictive sliding mode control. *Smart materials and structures*, Vol. 21, No.5, pp. 055018, 2012.

[13] Shi J., Jiang Y., Li T. and Du Y., Learning-based optimal desired compensation adaptive robust control for a flexure-based micro-motion manipulator. *Applied Sciences*, Vol. 7, No.4, pp. 406, 2017.

[14] Li Y., and Xu Q., Adaptive sliding mode control with perturbation estimation and PID sliding surface for motion tracking of a piezo-driven micromanipulator. *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol. 18, No.4, pp. 798-810, 2009.

[15] Wu Z., and Xu Q., Survey on recent designs of compliant micro-/nano-positioning stages. In *Actuators*, Vol. 7, No.1, pp. 5, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018.

[16] Ye M. and Wang X., Parameter estimation of the Bouc-Wen hysteresis model using particle swarm optimization. *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No.6, pp. 2341, 2007.

[17] Zhu Z., To S., Li Y., Zhu W. L., and Bian L., External force estimation of a piezo-actuated compliant mechanism

i. در صورت محقق نشدن، از مرحله دو تکرار می‌شود.

۶. ارائه بهترین موقعیت جمعی به‌عنوان جواب نهایی [۲۰]

همگرایی الگوریتم PSO به ضرایب c_1 ، c_2 و w بستگی دارد. در این پروژه از الگوریتم‌های ثابت و خطی برای انتخاب c_1 ، c_2 و الگوریتم‌های کاهشی، خطی و آشوب برای انتخاب w استفاده شده‌است [۲۳-۲۱]. همچنین برای جلوگیری از گرفتار شدن در نقطه بهینه محلی، افزایش محیط تحت پوشش و افزایش سرعت الگوریتم از جهش^۱ استفاده شده است [۲۴، ۲۵]. در الگوریتم جهش، موقعیت ذره با الگوریتم‌های مختلف تغییر می‌کند و در صورت دستیابی به جواب بهتر، ذره به موقعیت جدید منتقل می‌شود.

۸- سپاسگزاری

در اینجا از آقای مهندس نوروژی که ما را در راستای انجام هرچه بهتر این پروژه یاری کردند، کمال قدردانی و تشکر را داریم.

۹- نمادها

c	ضریب میرایی (Ns/m)
c_1, c_2	ضرایب شتاب‌دهی در الگوریتم PSO (-)
d	ضریب موثر پیژوالکتریک (m/V)
h	مقدار هیستریزس (m)
k	سفتی (N/m)
m	جرم (kg)
p	آشتنگی سیستم (m)
P_i	بردار بهترین موقعیت جز i (-)
P_g	بردار بهترین موقعیت جمعیت (-)
r_1, r_2	متغیرهای تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک (-)
V	ولتاژ (V)
v_i	بردار سرعت جز i (-)
w	ضریب وزنی اینرسی در الگوریتم PSO (-)
x	جابجایی پیژوالکتریک (m)
x_i	بردار موقعیت جز i (-)
α	ضریب کنترل‌کننده شکل هیستریزس در مدل (-)
β	ضریب کنترل‌کننده شکل هیستریزس در مدل (1/V)
γ	ضریب کنترل‌کننده شکل هیستریزس در مدل (1/V)

۱۰- مراجع

[1] Lee H. J., Woo S., Park J., Jeong J. H., Kim M., Ryu J., Gweon D. G. and Choi Y. M., Compact compliant parallel XY nano-positioning stage with high dynamic performance, small crosstalk, and small yaw motion. *Microsystem Technologies*, Vol. 24, No.6, pp. 2653-2662, 2018.

¹ Mutation

based on a fractional order hysteresis model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 110, pp. 296-306., 2018.

- [18] Tang H., Li Y., and Zhao X., Hysteresis modeling and inverse feedforward control of an AFM piezoelectric scanner based on nano images. In *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 189-194, IEEE, 2011.
- [19] Leang K. K., and Devasia S., Feedback-linearized inverse feedforward for creep, hysteresis, and vibration compensation in AFM piezoactuators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 15, No.5, pp. 927-935, 2007.
- [20] Wang Z. Y., and Mao J. Q., On PSO based Bouc-Wen modeling for piezoelectric actuator. In *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, pp. 125-134, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [21] Clerc M., and Kennedy J., The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No.1, pp. 58-73, 2002.
- [22] Cui Z., Zeng J., and Yin Y., An improved PSO with time-varying accelerator coefficients. In *2008 Eighth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, Vol. 2, pp. 638-643, IEEE, 2008.
- [23] Bansal J. C., Singh P. K., Saraswat M., Verma A., Jadon S. S., and Abraham A., Inertia weight strategies in particle swarm optimization. In *2011 Third world congress on nature and biologically inspired computing*, pp. 633-640, IEEE, 2011.
- [24] Gao Y., An X. H., and Liu, J., A particle swarm optimization algorithm with logarithm decreasing inertia weight and chaos mutation. In *2008 international conference on computational intelligence and security*, Vol. 1, pp. 61-65, IEEE, 2008.
- [25] Li C., Liu Y., Zhou A., Kang L., and Wang H., A fast particle swarm optimization algorithm with cauchy mutation and natural selection strategy. In *International Symposium on Intelligence Computation and Applications*, pp. 334-343, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.