Design and Developing a Linear Tables by Applying Piezoelectric Inchworm Moves

Alireza Zarreh¹, Mohamad Saied Sepasi², Maziar Sadeghi³

Department of Manufacturing, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

alireza_zarreh@yahoo.ca

Abstract:

This paper designed and developed a nano-positioning stage with linear movement as an essential part of the development of a micro-lathe. This stage uses an inchworm movement that drives with three high resolution piezoelectric that provides an unlimited movement range with high resolution in the nano range. This paper firstly discusses the table movement's mechanism and design. Then, with unitizing finite element analysis and mathematical modeling, the outputs such as resolution, velocity, and power are analyzed according to input parameters such as voltage and frequency. Results show that the accuracy and rigidity of this table in comparison with other nano-positioning tables prototype is higher.

¹ M.Sc. of Mechanical Engineering, Manufacturing

² Assistant Professor of Mechanical Engineering

³ M.Sc. of Mechanical Engineering, Manufacturing

طراحی و توسعه میز خطی با استفاده از حرکت حلزونی پیزوالکتریکها

علی رضا ذره^۱، محمد سعید سپاسی^۲، مازیاز صادقی^۳

دانشگاه تهران، پردیس دانشکده های فنی، دانشکده مکانیک، گروه ساخت و تولید

alireza_zarreh@yahoo.ca

چکیده

میز با تفکیک پذیری در حد نانومتر به منظور استفاده در میکروتراش طراحی شده است. این میز با استفاده از اصل حرکت حلزونی و سه محرک پیزوالکتریک حرکتی با تفکیک پذیری بالا در حد چند نانومتر و دامنه حرکت نامحدود بصورت همزمان را ایجاد کرده است. ضمن اینکه صلبیت این لغزنده نسبت به نمونه های مشابه بالاتر می باشد. در این مقاله ابتدا به شکل لغزنده و چگونگی حرکت آن پرداخته شده است و سپس با استفاده از تحلیل اجزاء محدود و مدل ریاضی به بررسی خروجی های آن مثل تفکیک پذیری، سرعت و نیرو پرداخته خواهد شد.

۱-مقدمه

اخیراً با پیشرفت تکنولوژی، درخواست برای قطعات با دقت بالا که دارای قابلیت تولید زیاد و اطمینان از کیفیت مناسب باشند در صنایعی همچون صنایع لیزر، اپتیک، نیمه هادی ها، هوا فضا و غیره افزایش پیدا کرده است. از طرف دیگر رسیدن به این دقت با استفاده از ماشین کاری سنتی و شیوه های تولید مرسوم بسیار سخت است [۱-۳] که باعث نیاز به تکنولوژی های دقیق تر شده است.

همچنین شیوه های تولید قطعات دقیق با شیوه هایی همچون لپینگ و پولیتینگ به صورت کاملاً مشهودی نرخ تولید پایینی دارند. ضمن اینکه این گونه روش ها قادر به ماشین کاری هر نوع ماده ای نمی باشند. به عنوان مثال رسیدن به دقت مورد نظر با استفاده از سنگ زنی در موادی همچون آلومینیم، مس، نیکل و غیر فلزاتی همچون سیلیکون، انواع پلاستیک ها و غیره که شکل پذیرند بسیار سخت می باشد. به این منظور روش هایی همچون ماشین کاری با ابزارهای الماس تک کریستال بر روی تراش بسیار دقیق گسترش پیدا کرده است [۴].

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ساخت و تولید

^۲ استادیار مهندسی مکانیک

^۳ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ساخت و تولید

به صورت همزمان با افزایش درخواست برای قطعات با دقت بالا، درخواست برای تولید قطعات کوچک با اشکال پیچیده و با اندازه‌های میلیمتر تا میکرون با دقت بالا و در نتیجه سیستم‌های ساخت و تولید کوچک افزایش یافته است. لازمه ساخت، مونتاژ و انتقال این گونه قطعات، وجود وسیله موقعیت‌دهی با دقت زیرمیکرون می‌باشند [۵]. روش‌های مختلفی برای رسیدن به دقت زیرمیکرون در موقعیت‌دهی استفاده شده است. از جمله این روش‌ها استفاده از محرک‌های پیزوالکتریک می‌باشد که به علت تفکیک‌پذیری بالا، پاسخ سریع، نیروی تولیدی بالا و سادگی برای کوچک‌سازی در سطح وسیعی برای موقعیت‌دهی در اندازه میکرون به کار گرفته شده است.

در سال ۱۹۹۶ میکروتراشی با قابلیت حرکت در دو جهت توسط آزمایشگاه مهندسی مکانیک ژاپن برای ماشین‌کاری قطعات بسیار کوچک به عنوان عضوی از میکرو کارخانه‌ای طراحی و ساخته شد [۶]. اولین روش برای بدست آوردن جابجایی در حد میکرومتر، استفاده از میز خطی میکرو با استفاده از میکرو محرک‌های سرو و مکانیزم تغذیه با پیچ بود. این راه حل دقتی در حدود $10\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$ را نشان می‌داد. روش دیگر استفاده از یک سری محرک‌های پیزوالکتریک برای ایجاد حرکت بود. استفاده از این روش تفکیک‌پذیری را تا حد چند نانومتر بهبود بخشید. اما استفاده مستقیم از تغییر شکل المان‌های پیزوالکتریک معایبی را در برداشت که مهمترین آنها جابجایی کم میز که حداکثر به چند ده میکرومتر می‌رسید بود. رفتارهای غیرخطی هیستریزس پیزوالکتریک‌ها از دیگر معایب این محرک بودند. برای غلبه بر این مشکلات روش‌هایی از جمله افزایش جابجایی به وسیله مفصل و مکانیزم اهرم با مکانیزم هیدرواستاتیک، ترکیب موقعیت‌دهی ظریف و خشن، مکانیزم حلزونی و درایور غیر فعال با استفاده از تغییر شکل سریع المان پیزو بود که با موفقیت اجرا شد [۷].

ساخت موقعیت‌دهنده‌ای با استفاده از اصل حرکت حلزونی و سه المان پیزوالکتریک فعال در داخل آن از مهمترین این روش‌ها است که دو عد از پیزوها برای گیربندی و یکی به عنوان محرک پیشروی به کار گرفته شد و تکرار گیربندی و پیشروی حرکت مورد نظر را ایجاد می‌کرد. این حرکت تکراری ضمن اینکه در هر مرحله قادر بود حرکت کوچک و تفکیک‌پذیری بالایی در حد میکرون و زیرمیکرون ایجاد کند می‌توانست دامنه حرکت نامحدودی را به وجود آورد. همچنین اگر نرخ تکرار مراحل به اندازه کافی زیاد بود سرعت‌های مورد نظر در حرکت نیز به وجود می‌آمد. با استفاده از این روش یک میکرو ماشین تخلیه الکتریکی با مکانیزم حلزونی پیشروی در حد میکرو ارائه شد که قادر به ایجاد تفکیک‌پذیری درجه $2\text{ }\mu\text{m}$ بود [۸]. در سال ۱۹۹۹ میکروتراش تجدید نظر شده‌ای ساخته شد که بر خلاف مکانیزم حلزونی سنتی، تنها از دو محرک نیرو، یکی برای گیربندی و یکی به عنوان محرک پیشروی استفاده شد. در حالت سکون در سیکل حرکت، قسمت اصلی بین راهنمایی که در دو طرف قرار داشتند به وسیله اصطکاک نگه داشته می‌شد و در فاز پیشروی، محرک پیشروی اصطکاک را با توجه به قسمت گیربندی می‌شکست و لغزنده به سمت جلو حرکت می‌کرد [۹].

در این مقاله موقعیت‌دهنده‌ای از نوع حلزونی به منظور استفاده در لغزنده‌های میکروتراش ارائه شده است. این موقعیت‌دهنده شامل سه محرک پیزوالکتریک است که حرکتی با تفکیک‌پذیری بالا در عین صلبیت مناسب در برابر ارتعاشات را ایجاد می‌کند. پیزوالکتریک‌ها نیز به منظور ایجاد نیرو و جابجایی بیشتر از نوع لایه‌ای انتخاب شده است. همچنین جنس پیزوالکتریک‌های گیربندی و پیشروی به علت تفاوت در خصوصیات مورد انتظار از آنها و بالا بردن بازده از دو جنس متفاوت انتخاب شده است.

۲- خصوصیات ظاهری و شیوه حرکت حلزونی

به منظور ایجاد حرکت با استفاده از این لغزنده‌ها بسته به اینکه لغزنده بخواهد به کدام سمت حرکت کند ابتدا محرک گیربندی اول منبسط شده و باعث می‌شود که لغزنده در آن قسمت به دیواره راهنما بچسبد. در مرحله بعد محرک پیشروی مربوط به پیشروی انبساط

یافته و باعث انتقال به سمت جلو به اندازه کوچکی می شود. سپس محرک گیره بندی دیگر انبساط پیدا کرده و به دیواره می چسبد در نهایت محرک گیره بندی اول رها شده محرک پیشروی منقبض می شود که در مجموع این حرکت لغزنده به اندازه ΔX به جلو حرکت می کند. شکل ۲ چگونگی این حرکت را نشان می دهد. با تکرار این سیکل به صورت پیوسته می توانیم حرکت پیشروی و بدون محدودیتی را داشته باشیم. ضمن اینکه با تغییر فرکانس تکرار این پالس ها می توان سرعت حرکت لغزنده را تغییر داد. شکل ۳ پالس های وارده به سه محرک با توجه به زمان آن را در دو دوره زمانی نشان می دهد.

شکل ۲- مکانیزم حرکت حلزونی

شکل ۱- نمای ظاهری لغزنده

۳- تحلیل اجزاء محدود و شبیه سازی

پیزوالکتریک های استفاده شده در این مکانیزم از نوع لایه ای و از دو جنس BM ۴۰۰ و BM ۵۰۰ استفاده شده است که محرک های گیره بندی از نوع BM ۵۰۰ و محرک پیشروی از جنس BM ۴۰۰ می باشد. خصوصیات این نیروها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- خصوصیات پیزوالکتریکها

BM500	BM400	واحد	نماد	
7x7x15	7x7x15	mm		اندازه
1540	490	nF	C	ظرفیت خازنی
365e-12	300e-12	m/V	d_{33}	ثابت بار الکتریکی
7650	7600	Kg / m^3	ρ	چگالی
19e-12	15e-12	m^2 / N	s_{33}	ثابت نرمی
1750	1350	—	K_{33}^T	ثابت نسبی دی الکتریک

۳-۱- نتایج

شکل ۳- تنش بوجود آمده در لغزنده

۳-۲- تفکیک پذیری

$$X = 0.34V + 0.01$$

(۱)

نمودار ۳- نمودار جابجایی (mm) بر اساس اختلاف پتانسیل
 ورودی (V)

نمودار ۲- نمودار جابجایی (μm) بر اساس اختلاف پتانسیل
 ورودی (V)

۳-۳- سرعت لغزنده

نمودار ۴ تأثیر افزایش فرکانس بر سرعت را نشان می‌دهد. با افزایش فرکانس سرعت نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد. عامل دیگری که بر روی سرعت تأثیر می‌گذارد ولتاژ ورودی است (نمودار ۵) که با افزایش ولتاژ نیز سرعت افزایش می‌یابد در نتیجه می‌توان با استفاده از تغییر ولتاژ و فرکانس سرعت‌های مختلفی را به دست آورد. سرعت لغزنده را می‌توان از فرمول ۲ زیر به دست آورد. که v سرعت بر میکرومتر بر ثانیه، f فرکانس بر حسب هرتز، X جابجائی لغزنده بر حسب میکرومتر و V اختلاف پتانسیل دو سر پیزو بر حسب ولت می‌باشد.

$$v = X.f$$

$$\Rightarrow v = (0.34V + 0.01).f$$

(۲)

نمودار ۵- نمودار سرعت ($\mu\text{m/s}$) بر اساس اختلاف پتانسیل ورودی (V) در فرکانس‌های مختلف (Hz)

۳-۴- نیروی لغزنده

همان‌طور که از فرمول ۲ و نمودارهای ۴ و ۵ مشخص است برای به دست آوردن سرعت ثابتی می‌توان از مقادیر متفاوتی از ولتاژ و فرکانس استفاده کرد. اما با توجه به اینکه با افزایش اختلاف پتانسیل دو سر پیزوالکتریک نیروی آن افزایش می‌یابد (نمودار ۶) پس برای به دست آوردن سرعت ثابت به منظور افزایش نیرو بهترین حالت این است که حداکثر ولتاژ را به آن اعمال کنیم و فرکانس را با توجه به سرعت مورد نظر تنظیم کنیم. نیروی پیزوالکتریک از فرمول ۳ نیز به دست می‌آید. که S_{33}^E کرنش، S_{33}^E نرمی پیزو، d_{33} ثابت کرنش پیزو و E میدان الکتریکی می‌باشد. اما به علت اینکه پیزو از نوع لایه‌ای می‌باشد مقداری از نیرو در بین لایه‌ها به هدر می‌رود که باعث می‌شود نیروی به دست آمده از نیروی مورد انتظار کمتر باشد. پیزوالکتریک‌های مورد استفاده در این لغزنده حدود ۵۰٪ نیرو را به هدر داده و ۵۰٪ را اعمال می‌کند پس نیروی واقعی نیرو حدود نصف نیروی به دست آمده از فرمول است.

$$S_{33} = -s_{33}^E \frac{F}{A} + d_{33} \cdot E$$

$$\square x = -s_{33}^E \frac{FL}{A} + d_{33} \cdot V$$

(۳)

نمودار ۶- نمودار نیرو (N) بر اساس اختلاف پتانسیل ورودی (V)

۴- نتیجه گیری

در مقاله مفهوم حرکت لغزنده ای با حرکت حلزونی ارائه شد. تحلیل ها نشان داد که حداکثر تفکیک پذیری برای این لغزنده برابر $6/75 \mu m$ است که در اختلاف پتانسیل $200 V$ اتفاق می افتد. حداقل تفکیک پذیری نیز وابسته به تفکیک پذیری منبع و وسایل اندازه گیری دارد. همچنین این لغزنده قابلیت حرکت با دقت نانومتر را دارد که تقریباً در ولتاژهای کمتر از $28 V$ اتفاق می افتد. سرعت این لغزنده نیز به دو عامل اصلی ولتاژ و فرکانس پالسها بستگی دارد که حداکثر سرعت بدست آمده توسط این لغزنده برابر $59/112 m/s$ می باشد. به علاوه با توجه به اهمیت نیروی تولیدی لغزنده و وابستگی آن به ولتاژ ورودی برای سرعت خاص حداکثر ولتاژ ممکن را اعمال شده و فرکانس بر اساس آن تنظیم می شود.

این لغزنده شرایط ارائه شده در میکرو تراش، میکرو فرز، میکرو ماشین تخلیه الکتریکی و دستگاه هایی که در آنها نیاز به دقت بالا می باشد را دارد که در صورت استفاده سه عدد از این لغزنده ها بصورت عمود بر هم می توان موقعیت دهی در حد نانو در سه بعد بدست آورد.

مراجع

- [1] Zarreh, A., 2008. Design and manufacturing evaluation of microlathe with nano positioning stage (Thesis, The University of Tehran).
- [2] M. Sadeghi, A. Zarreh, M.M. Mashadi, “Design and Efficiency Evaluation of Nano-Positioning System in Macro Scale with Circular Flexure Joints”, 1st International Manufacturing Engineering Conference, Najaf Abad, Iran, 2008
- [3] K. Ashida, N. Mishima, H. Maekawa, T. Tanikawa, K. Kaneko and M. Tanaka, “Development of desktop machining Microfactory”, Proc. J-USA Symposium on Flexible Automation, pp. 175-178 (2000)
- [4] Yuichi OKAZAKI, Nozomu MISHIMA and Kiwamu ASHIDA,” Microfactory and Micro Machine Tools”, 1st Korea-Japan Conference on Positioning Technology, Daejeon, Korea, 2002
- [5] Y. Okazaki and T. Kitahara, “NC micro-lathe to machine micro-parts”, Proc. 2000 ASPE Annual Meeting, pp. 575-578 (2000)
- [6] Jian Li, Ramin Sedaghati, Javad Dargahi, David Waechter, “Design and development of a new piezoelectric linear Inchworm actuator”, Mechatronics 15 (2005), pp 651–681
- [7] Bexell M, Johansson S. “Characteristics of piezoelectric miniature motor”. Sensors Actuators 1999;(75), 118–30.
- [8] Stibitz GR. Incremental Feed Mechanisms. Patent #3,138,749, 1964.