



ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



کنترل موقعیت یک عملگر الکترواستاتیک سیستم میکروالکترومکانیکی در حضور عدم قطعیت‌ها

زینب پاداشتیان^{*}، علی کیماسی خلجی^آ

^آ ایران، تهران، خیابان مفتاح جنوبی، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، کدپستی: 37551-31979، دانشجوی
کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

^ب ایران، تهران، خیابان مفتاح جنوبی، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، کدپستی: 37551-31979، دانشیار
مهندسی مکانیک

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zeynabpadashtian@gmail.com

چکیده

سیستم‌های میکروالکترومکانیک^۱، فناوری سیستم‌های بسیار کوچک در ابعاد میکرومتر می‌باشد. سیستم‌های میکروالکترومکانیکی موضوع تحقیقات زیادی در 50 سال گذشته بوده‌اند و موجب توسعه دستگاه‌های مختلفی در بسیاری از زمینه‌ها مانند زیست‌پزشکی، خودروسازی و رباتیک شده‌اند. مدت‌هاست تشخیص داده شده‌است که یک انشعاب گره زینتی^۲ به نام محدوده کششی^۳ باعث ناپایداری و محدودیت‌های عملیاتی در عملگر الکترواستاتیک می‌شود. عملگر الکترواستاتیکی در واقع کلیدی است که به سیستم‌های میکروالکترومکانیک اجازه حرکت فیزیکی می‌دهد. یک نوع معروف عملگر در این سیستم‌ها، عملگر صفحه موازی می‌باشد. در این تحقیق قصد داریم با استفاده از کنترل مود لغزشی به بهبود عملکرد سیستم کمک کرده و قابلیت اطمینان مدل را بهبود ببخشیم. چند پارامتر نامعلوم در این سیستم وجود دارد که در این خصوص از تخمین عدم قطعیت‌ها استفاده شده، شبیه‌سازی با دوسری اعداد مقایسه می‌شود که مقادیر هردوسری به مقادیر مطلوب همگرا شدند. نمودارهای شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترلر پیشنهادی به خوبی کار می‌کند.

کلمات کلیدی: سیستم‌های میکروالکترومکانیک؛ کنترل مود لغزشی؛ عدم قطعیت.

¹ Microelectromechanical system (MEMS)

² Saddle-node

³ Pull-in effect

۱- مقدمه

سیستم‌های میکروالکترومکانیکی موضوع تحقیقات زیادی در ۵۰ سال گذشته بوده‌اند و موجب توسعه دستگاه‌های مختلفی در بسیاری از زمینه‌ها مانند زیست‌پزشکی، خودروسازی و رباتیک شده‌اند. فناوری میکروالکترومکانیک مزایای متعددی دارد، از جمله اینکه فناوری گسترده‌ای است که می‌تواند تأثیر مهمی بر انواع تولیدات تجاری و نظامی بگذارد. هم‌اکنون این فناوری در زمینه‌های مختلف، از نمایش فشار خون گرفته تا سیستم‌های تعلیق خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین این فناوری فاصله بین سیستم‌های مکانیکی پیچیده و مدارهای الکترونیکی را پر می‌کند. این فناوری امکان ساخت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در ابعاد کوچک و هزینه پایین را فراهم کرده‌است. عملگر الکترواستاتیک اخیراً در بسیاری از کاربردها مانند میکروگیرپرها، ریزرله‌ها، حسگرهای فشار، میکروپمپ‌ها، میکرو سوپاپ‌ها، ژایروسنسورها، میکروموتورها، سوئیچ‌های نوری، تضعیف‌کننده‌های نوری و میکروآینه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱-۴].

عملگر، با سادگی ساختار و انعطاف پذیری عملکرد تعریف می‌شود، با این حال اگر از یک کنترل کننده برای کنترل موقعیت عملگر الکترواستاتیک استفاده شود، پایداری تنها به یک سوم فاصله‌ی شکاف محدود می‌شود که به آن محدوده کششی گفته می‌شود. ازین رو سیستم با انشعاب گره-زینی دارای ناپایداری است [5]. روش‌های کنترل حلقه بسته‌ی مختلف برای گسترش دامنه سفر عملگرهای الکترواستاتیک پیشنهاد شده‌است. طراحی کنترلر بر مبنای خطی‌سازی در برخی از مراجع، مانند [6] به کار گرفته شده است، اما با توجه به غیرخطی بودن این عملگر، کنترل خطی پاسخ‌های مناسبی در کل فضای کاری سیستم ایجاد نمی‌کند و به همین علت به کنترل‌های غیرخطی روی آورده شده‌است. از تکنیک‌های کنترل غیرخطی می‌توان کنترل مود لغزشی استاتیکی و دینامیکی^۱ [7]، کنترل پس گام^۲ [8، 9] و روش‌های کنترل غیرخطی مبتنی بر غیرفعالی^۳ [10] را نام برد که برای سیستم‌های میکروالکترومکانیک ارائه شده‌اند. نتایج بسیاری در حوزه کنترل عملگر الکترواستاتیک وجود دارد. به طور کلی مدل‌سازی دقیق‌تر، باعث یک مدل ریاضی پیچیده‌تر می‌شود که اجرای سیستم‌های کنترل را پیچیده‌تر و سخت‌تر می‌کند، اگرچه بدون شک به افزایش عملکرد سیستم کنترلی کمک می‌کند [۱۱].

در این مقاله، از کنترل مود لغزشی مناسب برای کنترل محدوده کششی استفاده می‌کنیم. در ادامه ساختار مقاله به صورتی است که در بخش دوم، معادلات سیستم ارائه می‌شود. بخش سوم به ارائه طراحی کنترل مود لغزشی می‌پردازیم. در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی عملکرد کنترل موردنظر را ارائه می‌دهیم و در پایان نتیجه‌گیری کلی را ارائه می‌دهیم.

۲- معادلات دینامیکی سیستم میکروالکترومکانیک

در بسیاری از سیستم‌های میکروالکترومکانیک از روش عملگر صفحه موازی استفاده شده است. در این روش دو صفحه ثابت در بالا و پایین و یک صفحه متحرک میان آنها مطابق شکل (۱) وجود دارد. در شکل (۱)، k سختی فنر، b ضریب میرایی، m جرم صفحه متحرک، g شکاف، I جریان، R مقاومت، V_{in} ولتاژ ورودی می‌باشد. ظرفیت خازن صفحه موازی برابر است با $\varepsilon A/g$ و نیروی الکترواستاتیک روی صفحه نیز برابر است با $Q^2/2\varepsilon A$ ، که ε ضریب گذردهی مواد بین شکاف، Q شارژ و A سطح صفحه می‌باشد. همانطور که در شکل مقابل نشان داده شده است، سیستم دارای دو بخش الکتریکی و مکانیکی می‌باشد. برای ایجاد معادلات حاکم برای این عملگر، معادلات KVL را برای دو بخش الکتریکی و مکانیکی می‌نویسیم. برای بخش الکتریکی [12]:

$$\dot{Q} = I = \frac{V}{R} = \frac{1}{R} \left(V_{in} - \frac{Qg}{\varepsilon A} \right) \quad (1)$$

و برای بخش مکانیکی با استفاده از نیروی الکترواستاتیک داریم:

¹ Static and dynamic sliding mode control

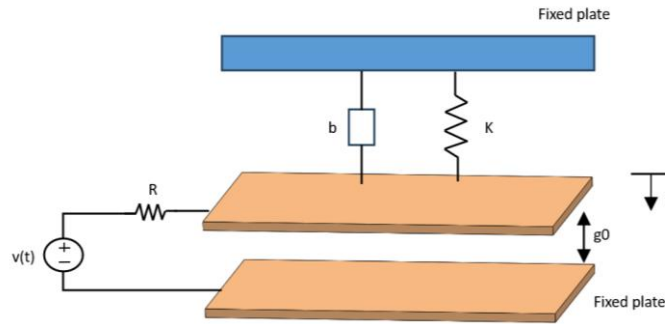
² backstepping control

³ passivity-based control

$$\frac{Q^2}{2\varepsilon A} + b\dot{g} + m\ddot{g} + k(g - g_0) = 0 \quad (2)$$

برای تبدیل به فرم فضای حالت سه متغیر حالت را تعیین می‌کنیم:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \\ g \\ \dot{g} \end{bmatrix} \quad (3)$$



شکل ۱. مدل عملگر الکترواستاتیک

معادلات دینامیکی سیستم برابر است با [۱۲]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= u - \frac{x_1 x_2}{\varepsilon A R} \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_3 &= -\frac{1}{m} \left(\frac{x_1^2}{2\varepsilon A} + k(x_2 - g_0) + b x_3 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

تغییر متغیر $W=T(x)$ را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} w_1 &= x_2 - x_d \\ w_2 &= x_3 \\ w_3 &= \dot{x}_3 = f + \beta u \end{aligned} \quad (5)$$

شکل ۲. شماتیک عملگر الکترواستاتیک

$$f = -\frac{1}{m} \left[-\frac{x_1^2 x_2}{\varepsilon^2 A^2 R} + k x_3 + b \left(-\frac{1}{m} \left(\frac{x_1^2}{2\varepsilon A} + k(x_2 - g_0) + b x_3 \right) \right) \right] \quad (6)$$

$$\beta = -\frac{x_1}{m\varepsilon A} \quad (7)$$

رابطه f کاملاً شناخته شده نیست، آنرا با f تخمین می‌زنیم. خطای تخمین روی f ، یعنی تفاوت بین f و \hat{f} در محدوده

تابع شناخته شده قرار دارد:

$$|f - \hat{f}| \leq F \quad (8)$$

پارامترهای نامشخص

$$\begin{aligned} 0.5 \leq k \leq 1.5 \\ 0.25 \leq b \leq 0.75 \end{aligned} \quad (9)$$

اگر تخمین را معدل بگیریم در این صورت داریم:

$$\hat{f} = -\frac{1}{m} \left[\frac{x_1^2 x_2}{\varepsilon^2 A^2 R} - x_3 + 0.5 \left(-\frac{1}{m} \left(\frac{x_1^2}{2\varepsilon A} + (x_2 - g_0) + x_3 \right) \right) \right] \quad (10)$$

۳- طراحی کنترلر

۳-۱- کنترلر مود لغزشی

معادله سطح لغزش برای تعقیب x_d سیستم به صورت زیر می‌باشد:

$$S = w_3 + A_1 w_2 + A_2 w_1 \quad (11)$$

که A_1 و A_2 اعداد اسکالر مثبت می‌باشند. با مشتق‌گیری از این رابطه داریم:

$$\dot{s} = f + gu + A_1 w_3 + A_2 w_2 \quad (12)$$

بهترین تقریب ورودی کنترلی یعنی \hat{u} از یک قانون کنترلی پیوسته که باعث می‌شود $\dot{s} = 0$ گردد، با صفر قرار دادن \dot{s} بدست

می‌آید و f هم می‌شود \hat{f} .

$$\hat{u} = \frac{1}{\beta} (-\hat{f} - A_1 w_3 - A_2 w_2) \quad (13)$$

برای آنکه شرط لغزش علی‌رغم عدم قطعیت در دینامیک f تحقق یابد، به \hat{u} حاصله یک ترم غیر پیوسته در روی سطح لغزش

اضافه می‌کنیم.

$$u = \hat{u} - \alpha \operatorname{sgn}(s) \quad (14)$$

زمانی که به سیستم میکروالکترومکانیکی وارد می‌شوند، همگرایی w_1, w_2, w_3 به صفر در $t \rightarrow \infty$ را خواهیم داشت. با

انتخاب α مناسب می‌توان تضمین کرد که شرط لغزش تحقق یابد.

۳-۱-۱ اثبات پایداری

برای مود رسیدن، ورودی کنترلی u به گونه‌ای طراحی می‌شود که S به سمت صفر میل نماید. برای این منظور تابع مثبت

معین، $V = \frac{1}{2} S^2$ بعنوان تابع کاندید لیاپانوف در نظر گرفته می‌شود. برای همگرایی S به سمت صفر، باید مشتق تابع کاندید

لیانوف همواره منفی باشد.

$$\dot{V} = s\dot{s} < 0 \quad (15)$$

از فرمول (13) داریم:

$$\begin{aligned} s\dot{s} &= [f + \beta u + A_1 w_3 + A_2 w_2] s = [f + \beta(\hat{u} - \alpha \operatorname{sgn}(s)) + A_1 w_3 + A_2 w_2] s \\ &= [f - \hat{f} - \beta\alpha \operatorname{sgn}(s)] s = [f - \hat{f}] s - \beta\alpha |s| \end{aligned} \quad (16)$$

α را به گونه‌ای انتخاب می‌کنیم که داشته باشیم:

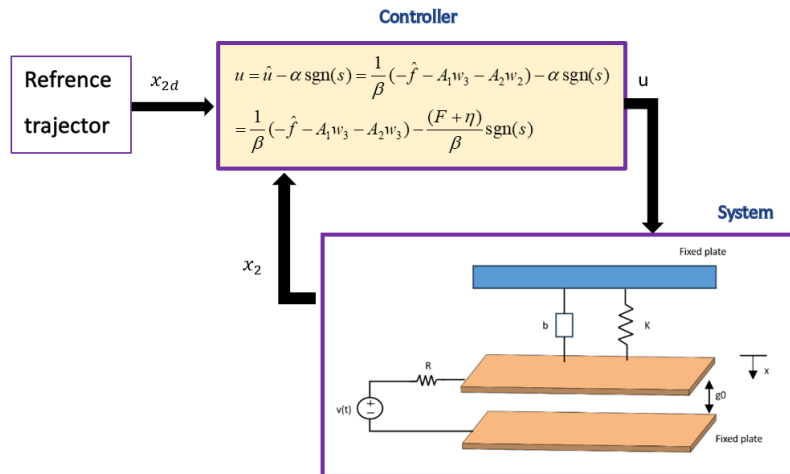
$$\begin{aligned} [f - \hat{f}] s - \beta\alpha |s| \leq -\eta |s| \Rightarrow |f - \hat{f}| |s| + \eta |s| \leq \beta\alpha |s| \\ \Rightarrow |f - \hat{f}| + \eta \leq \beta\alpha \Rightarrow \frac{(F + \eta)}{\beta} \leq \alpha \Rightarrow \frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \end{aligned} \quad (17)$$

از طرفی ملاحظه می‌شود که α با افزایش عدم قطعیت یعنی با بزرگ شدن F ، بزرگ می‌شود. کنترلر نهایتاً به شکل مقابل تعریف می‌شود.

$$u = \hat{u} - \alpha \operatorname{sgn}(s) = \frac{1}{\beta} (-\hat{f} - A_1 w_3 - A_2 w_2) - \alpha \operatorname{sgn}(s) \quad (18)$$

$$= \frac{1}{\beta} (-\hat{f} - A_1 w_3 - A_2 w_3) - \frac{(F + \eta)}{\beta} \operatorname{sgn}(s)$$

بنابراین نتیجه موردنظر حاصل می‌شود. بلوک دیاگرام کنترلر مورد نظر به شکل زیر می‌باشد.



شکل ۲. بلوک دیاگرام کنترلی سیستم

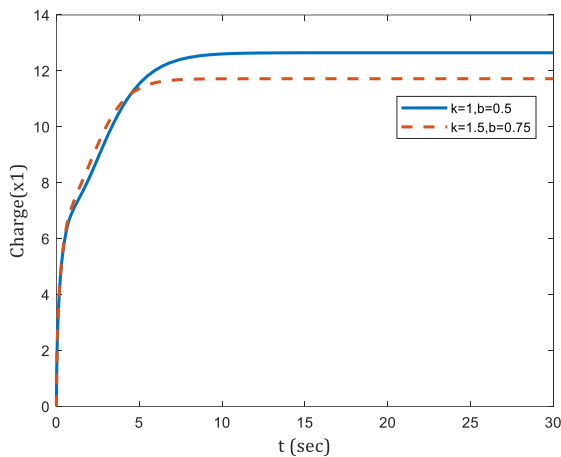
۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترلر بدست آمده می‌پردازیم. معادلات سیستم با استفاده از معادلات (۴) و (۵) و کنترلر نیز با معادله (۱۶) و (۲۰) تعریف شده‌اند. مقدار پارامترها در جدول (۱) آمده‌است.

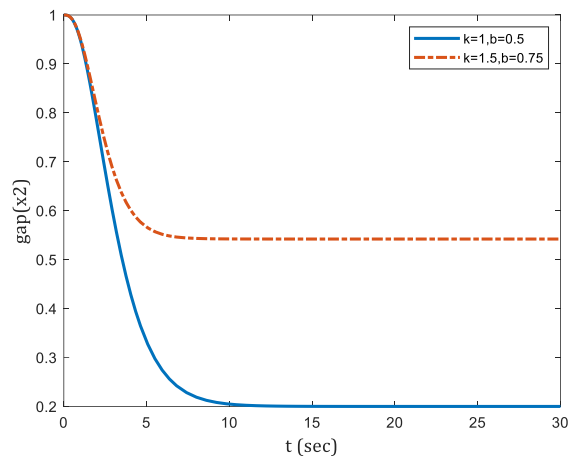
جدول ۱. پارامترها

M	۱	ε	۱
η	۱	A	۱
A_1	۱.۸	R	۰.۰۰۱
A_2	۰.۸	x_d	۰.۲
g_0	۱	m	۱

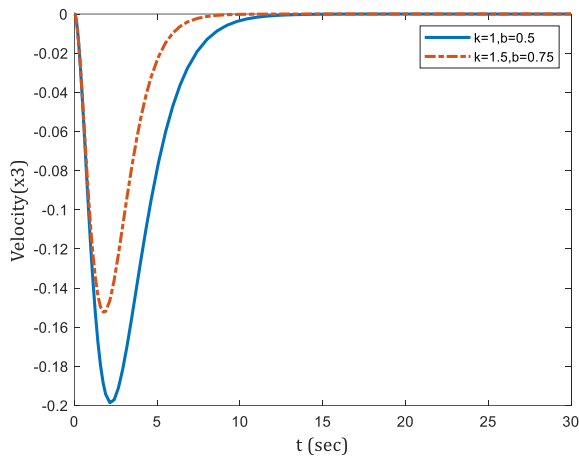
در شبیه‌سازی از دوسری مقادیر برای k و b استفاده شده، در سری اول از $k=1$ و $b=0.5$ و در سری دوم از $k=1.5$ و $b=0.75$ نیز استفاده شده‌است. نتایج شبیه‌سازی کنترلر در شکل‌های (۳)-(۶) نشان داده شده‌است.



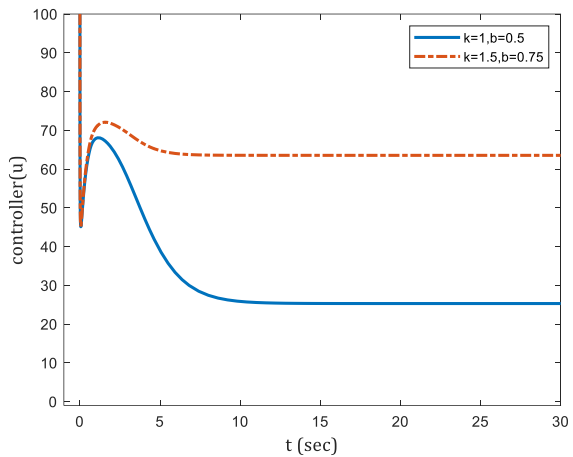
شکل ۴. نمودار شارژ بر حسب زمان



شکل ۳. نمودار شکاف بر حسب زمان



شکل ۶. نمودار سرعت بر حسب زمان



شکل ۵. نمودار کنترلر بر حسب زمان

همانگونه که از نمودارها مشخص است داده های سری اول مقادیر مناسب تری را نتیجه داده اند. هرچند نتایج سری دوم نسبت به زمان سریع تر بوده اما هدف از کنترلر موجود رسیدن به x مطلوب می باشد که 0.2 در نظر گرفته شده، قابل مشاهده است که در نمودار شکل (3) شکاف با مقادیر سری اول به مقدار مطلوب 0.2 رسیده و شکلها نیز نشان می دهند کنترلر مود لغزشی ارائه شده برای تنظیم سیستم میکروالکترومکانیکی به خوبی کار می کند.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش از کنترلر مود لغزشی برای کاهش اثر ارتعاش بر عملکرد سیستم میکروالکترومکانیکی استفاده کردیم. هدف از ایجاد کنترلر رسیدن شکاف به مقدار مطلوب بوده، در این خصوص از تخمین عدم قطعیتها استفاده شده، شبیه سازی با دوسری اعداد مقایسه شد که مقادیر با سری دوم نسبت به زمان سریع تر بوده، هرچند اعداد سری اول مقادیر مورد نظر را نتیجه دادند. نمودارهای شبیه سازی نشان می دهد که کنترلر به خوبی کار می کند.

مراجع

1. Agudelo, C.G., et al., *Nonlinear control of an electrostatic micromirror beyond pull-in with experimental validation*. Journal of Microelectromechanical Systems, 2009. **18**(4): p. 914-923.
2. Batra, R., M. Porfiri, and D. Spinello, *Review of modeling electrostatically actuated microelectromechanical systems*. Smart Materials and Structures, 2007. **16**(6): p. R23.
3. Bryzek, J., et al. *Control issues for MEMS*. in *42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No. 03CH37475)*. 2003. IEEE.
4. Shirazi, F.A., J.M. Velni, and K.M. Grigoriadis, *An LPV design approach for voltage control of an electrostatic MEMS actuator*. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010. **20**(1): p. 302-311.
5. Maithripala, D., J.M. Berg, and W. Dayawansa, *Control of an electrostatic microelectromechanical system using static and dynamic output feedback*. 2005.
6. Dong, L. and J. Edwards, *Active disturbance rejection control for an electro-statically actuated MEMS device*. International Journal of Intelligent Control and Systems, 2011. **16**(3): p. 160-169.
7. Fang, Y., et al., *Modelling, simulation and dynamic sliding mode control of a mems gyroscope*. Micromachines, 2021. **12**(2): p. 190.
8. Salah, M.H., et al. *Robust backstepping nonlinear control for parallel-plate micro electrostatic actuators*. in *Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Atlanta, GA, USA*. 2010.
9. Zhu, G., J. Lévine, and L. Praly. *Stabilization of an electrostatic MEMS including uncontrollable linearization*. in *2007 46th IEEE Conference on Decision and Control*. 2007. IEEE.
10. Wickramasinghe, I., et al., *Passivity-based stabilization of a 1-DOF electrostatic MEMS model with a parasitic capacitance*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008. **17**(1): p. 249-256.
11. Zhu, G., et al., *A robustness approach for handling modeling errors in parallel-plate electrostatic MEMS control*. Journal of microelectromechanical systems, 2008. **17**(6): p. 1302-1314.
12. Senturia, S.D., *Microsystem design*. 2005: Springer Science & Business Media.