

به نام خدایی که اعداد را بازیچه‌ی ریاضی قرار داد

هر پیشرفت بزرگی در علم، حاصل جسارت برای تخیلی جدید بوده است!

"جان دیویی"

# هوشمند سازی ربات بازوی انعطاف پذیر با استفاده از کنترل حلقه بسته

هوشمند سازی ربات بازوی انعطاف پذیر با استفاده از کنترل حلقه بسته

تهیه کننده

حسین اسماعیلی

استاد

حوری السادات جلیلی

دانشگاه

غیرانتفاعی ایوانکی

بهار ۱۴۰۱

## فهرست مطالب

چکیده.....	۳
مقدمه.....	۳
کنترل هوشمند بازو.....	۴
طراحی سیستم کنترل ربات بازوی انعطاف پذیر.....	۱۱
روش کنترل شکل دهی ورودی ZVD بازوی انعطاف پذیر با استفاده از کنترل حلقه بسته.....	۱۱
روش کنترل شکل دهی ورودی حلقه بسته.....	۱۴
نتایج شبیه سازی و نتیجه گیری.....	۱۷

## چکیده

در این تحقیق، یک ربات تک-لینک انعطاف پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. پس از استخراج مدل دینامیکی با استفاده از معادلات اوایلر-لاگرانژ، با تحلیل مدل دینامیکی، یک روش کنترل بر پایه شکل دهی سیگنال ورودی به منظور کنترل ارتعاشات اتخاذ خواهد شد. روش کنترل شکل دهی سیگنال ورودی یک روش کنترلی حلقه باز است و به دلیل ضعفهای روش کنترل حلقه باز، یک روش کنترلی شکل دهی سیگنال ورودی حلقه بسته ارائه خواهد شد. با این رویکرد، سیستم کنترل حلقه بسته به یک سیستم تاخیر ورودی تبدیل ارائه میگردد. به منظور کنترل این سیستم یک کنترل بهره فیدبک حالت مقاوم بر پایه LMI ارائه می گردد. در نهایت با شبیه سازی سیستم کنترلی حلقه بسته، عملکرد روش کنترل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

## مقدمه

بیشتر ربات های باز و مکانیکی موجود در صنعت به گونه ای طراحی و تولید می شوند که سختی مکانیکی بازو حداکثر باشد. بدینوسیله لینک ها صلب و بدون انعطاف پذیری خواهند بود لذا خمش و لرزش های مکانیکی لینک ها و مجری نهایی (ابزار) حداقل شده و یک دقت مناسب در موقعیت یابی و جهت یابی ابزار ایجاد می گردد. به منظور تامین این میزان سختی مکانیکی باید جرم بسیار سنگینی از مواد (در بیشتر موارد فلزات) به منظور تولید لینک های بازو و مفاصل مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین با این رویکرد، هزینه ساخت ربات بالا خواهد رفت و علاوه بر این، ربات سنگین و بزرگ خواهد شد. سنگینی ربات علاوه بر اینکه باعث می شود هزینه ساخت بالا رود، باعث می شود ربات از نظر سرعت عملکردی و میزان مصرف انرژی بی کفایت باشد. وجود محدودیت های ربات های سنگین و سنتی باعث شده است در برخی طراحی ها میزان سختی لینک های ربات ها کوچک تر در نظر گرفته شود ولی این تصمیم باعث میشود لینک ها انعطاف پذیر شود.

وجود خاصیت انعطاف پذیری در لینک های ربات باعث ایجاد خمش و لرزش های مکانیکی (ارتعاشات) خواهد شد و میزان دقت در موقعیت یابی و وضعیت یابی کاهش خواهد یافت. ربات های باز و انعطاف پذیر در مقایسه با ربات های سنگین سنتی، چالاک تر، سریع تر و دارای مانورپذیری بیشتری هستند، همچنین هزینه ساخت و مصرف توان در این ربات ها به دلیل کوچک بودن ربات و استفاده از

محرک های کوچکتر، کمتر است. اما در کنار این مزیت ها، ربات های انعطاف پذیر دارای عیب بزرگی هستند. عیب بزرگ ربات های انعطاف پذیر، مشکل ارتعاشات مکانیکی است و این عامل به دلیل وجود خاصیت انعطاف پذیری و کوچک بودن میزان سختی لینک ها بوجود آمده است. لینک بازو در یک ربات انعطاف پذیر، باریک و سبک است و بوسیله آن محموله ای که در نوک لینک قرار دارد باید هدایت شود. بدلیل استفاده از لینک باریک و سبک در این ربات، لینک بازو دارای خاصیت انعطاف پذیری خواهد بود. بنابراین با ایجاد گشتاور توسط موتور و چرخش بازو، بازو استعداد آن را دارد که در همین حین خمش پیدا شده و ربات در حین تلاش به منظور جابجایی محموله با ارتعاشات لینک مواجه خواهد شد و اهداف عملکردی ربات با چالش روبرو خواهد شد. به منظور بکارگیری این ربات، باید مشکل ارتعاشات را بر طرف کرد لذا در طراحی سیستم کنترل این نوع ربات باید خاصیت انعطاف پذیری لینک را در نظر گرفت و یک مدل دینامیکی دقیق با فرض وجود خاصیت انعطاف پذیری استخراج کرده و در روند طراحی سیستم کنترل بکار برد. در بخش های بعدی استخراج مدل ربات های انعطاف پذیر مورد بحث قرار خواهد گرفت.

## هوشمند سازی ربات بازوی انعطاف پذیر با استفاده از کنترل حلقه بسته کنترل هوشمند بازو

به منظور بکارگیری کارآمد ربات های انعطاف پذیر باید ارتعاشات مکانیکی در لینک های ربات های بازو انعطاف پذیر به صورت مناسبی کنترل و میرا شوند لذا کنترل اکتیو و کنترل پسیو ارتعاشات در این نوع ربات ها اهمیت زیادی دارد. روش کنترل پسیو در مقایسه با روشهای کنترل اکتیو نیازمند تجهیزات و سخت افزار خاصی نیست در حالی که در عمل با استفاده از روش کنترل اکتیو باید یک حلقه کنترل به همراه تجهیزات متعددی استفاده گردد. روش های کنترل متعددی بر پایه روش کنترل پسیو و اکتیو به منظور کنترل ربات یک درجه آزادی تک لینک ارائه شده است. به منظور کنترل ربات بازو انعطاف پذیر چهار نوع هدف کنترلی تعریف شده است، مساله تنظیم موقعیت مجری نهایی، مساله موقعیت یابی مجری نهایی در مدت زمان مطلوب، مساله ردیابی مفصلی با حداقل رسانی ارتعاشات و مساله ردیابی مسیر مجری نهایی. بدین منظور روش های کنترلی متعددی از جمله: روش کنترل PD تناسبی مشتقی، روش کنترل چند حلقه Lead-Lag-PID کنترلی، روش کنترل فیدبک خطی ساز، کنترل تطبیقی، روش های کنترلی بر پایه شبکه عصبی، روش کنترل آشفستگی تکین، روش کنترل مد لغزشی، روش کنترل

دینامیک معکوس پایدار در حوزه زمان و فرکانس، روش های کنترل بهینه، روش های کنترل مقاوم، روش شکل دهی سیگنال ورودی.

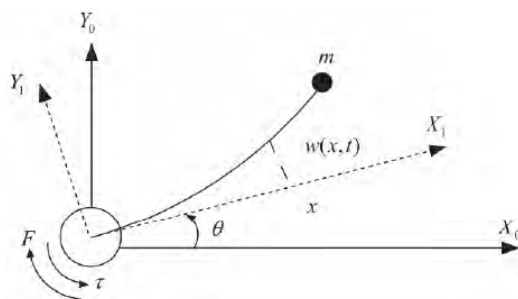
روش شکل دهی ورودی، یکی از روشهای تولید فرمان (شکل دهی فرمان) است که به طور موثر و مناسب می توان در بسیاری از کاربردها مورد استفاده قرار داد. روش شکل دهی ورودی را می توان در کاربردهای بلادرنگ نیز عملیاتی کرد و به یک سطح قوام مناسب دست یافت. روش شکل دهی ورودی به منظور کاهش یا حذف ارتعاشات ناشی از تاثیرات ورودی تحریک طراحی می گردد. به طور کلی اگر ورودی یک سیستم انعطاف پذیر توسط یک فرمان مرجع تحریک گردد نتیجه آن در خروجی، ارتعاشات بر جای مانده کوچکی خواهد بود. چنانچه فرکانس های طبیعی و ضریب میرایی سیستم ارتعاشی مشخص باشند، آنگاه هر فرمان مرجع را می توان چنان تغییر داد به طوری که ارتعاشات بر جای مانده در پاسخ سیستم کمتر و یا کاملاً حذف گردد. تحقیقات اولیه که منجر به توسعه روش کنترل شکل دهی ورودی شد، نخستین بار توسط آقای اسمیت در سال ۱۹۵۷ ارائه شده است. علاوه بر این آقای جان کالورت یک فیلتر ارتعاشی بر پایه تاخیر زمانی ارائه دادند. بعد از این، برای اولین بار یک روش کنترل شکل دهی ورودی تحت عنوان شکل دهنده  $ZVD^*$  ارائه گردید. در تحقیقاتی دیگری طراحی شکل دهی ورودی برای سیستم های چند مد ارتعاشی مورد توجه قرار گرفت. علاوه بر این چندین تحقیق به منظور طراحی شکل دهی ورودی برای سیستم های غیر خطی ارائه گردیده است. در تحقیقاتی دیگر کاربرد روش شکل دهی ورودی به منظور کنترل سیستم هایی با پارامتر متغیر مورد توجه قرار گرفته است. بدلیل سادگی پیاده سازی ساختار روش شکل دهی ورودی، در بسیاری از کاربردها این روش به طور موفقیت آمیزی بکار گرفته شده است.

بدلیل سادگی و تاثیر موثر روش های کنترل تاخیری از جمله روش کنترل شکل دهی ورودی، در این مقاله از روش کنترل شکل دهی سیگنال ورودی کنترل استفاده می شود. روش کنترل شکل دهی ورودی دارای ضعف های متعددی است و بسیاری از این ضعفها بدلیل حلقه باز بودن استراتژی کنترلی آن است، لذا تحقیقات متعددی با استفاده از فیدبک و ایجاد حلقه های کنترلی تلاش کرده اند ضعف های روش فوق را کاهش دهند. در اینجا تلاش می شود یک روش کنترل شکل دهی ورودی کنترل حلقه بسته مناسب با استفاده از فیدبک حالت به منظور کنترل ربات یک درجه آزادی تک لینک ارائه گردد. بمنظور دستیابی به یک حلقه کنترلی پایدار روش تحلیل پایداری LMI استفاده خواهد شد.

در این بخش، یک مدل تحلیلی از ربات بازو انعطاف پذیر تک لینکی بصورت مدل فضای حالت، بوسیله مجموعه ای از تعدادی متناهی مدهای طبیعی ارائه می گردد. این مدل در بخش های بعد به منظور شبیه سازی، تحلیل فرکانسی و همچنین طراحی سیستم کنترل استفاده خواهد شد. به طور کلی دو نوع مدل در تحلیل و طراحی کنترل ربات های لینک انعطاف پذیر مورد استفاده می گیرد: مدل محیط پیوسته لینک بر اساس توصیف معادلات دیفرانسیل مشتقات جزئی (PDE) و مدل عناصر فشرده بر اساس توصیف معادلات دیفراسیل معمولی (ODE) با درجات آزادی محدود. در اینجا انتگرال ها و توابع محیط پیوسته قبل از استفاده از قانده همیلتن و یا اوپلر لاگرانژ بوسیله تجزیه توابع گسسته سازی می شوند، لذا در طی این روند به جای معادلات PDE، معادلات ODE استخراج خواهد شد. به منظور مدلسازی ربات بازو انعطاف پذیر فرض می شود لینک بازو توسط یک موتور الکتریکی در محل مفصل لولایی قابل چرخش است و لینک در محل اتصال قطعه دوم مفصل لولایی دارای جوش و ثابت است. بدلیل وجود خاصیت انعطاف پذیری، فرض می شود لینک می تواند خمش پیدا کند ولی سختی آن طوری است که لینک نمی تواند پیچش و تغییرات طولی داشته باشد و همچنین فرض می شود انتهای لینک آزاد است و یک محموله به وزن  $m$  در انتهای لینک قرار دارد. در اینجا فرض می شود لینک بازو و محموله به ترتیب دارای ممان اینرسی  $I_b$  و  $I_p$  هستند و ممان اینرسی مجموعه روتور، شفت و تویی مفصل لولایی برابر  $I_r$  است. همچنین طول لینک برابر  $l$ ، چگالی طولی جرم لینک برابر  $\rho$  و وزن محموله در انتهای لینک برابر  $m_p$  در نظر گرفته می شود و فرض می شود همگی این پارامترها ثابت هستند.

به منظور توصیف رفتارهای دینامیکی حرکتی ربات بازو انعطاف پذیر لازم است چارچوب های مختصاتی مناسبی تعریف گردد. در شکل (۱) چارچوب های تعریفی ربات انعطاف پذیر به صورت صفحه ای نشان داده شده است. همچنین متغیرهای لازم به منظور توصیف رفتارهای حرکتی نیز مشاهده می گردند. چارچوب  $\{0\}$ ، چارچوب مرجع و ثابت است. چارچوب  $\{1\}$  چارچوب بدنه بازو و در مفصل بازو ثابت است ولی در چارچوب  $\{0\}$  و حول محور  $Z_0$  توسط متغیر درجه آزادی  $\theta$  چرخش دارد. درجه آزادی  $\theta$  توسط گشتاور کنترلی  $\mathcal{T}$  بوسیله یک موتور الکتریکی تحریک می شود. به دلیل خاصیت انعطاف پذیری بازو، لینک بازو در چارچوب بدنه خود یعنی در چارچوب  $\{1\}$  میتواند خم شود یا دارای حرکت های ارتعاشی باشد. به منظور توصیف حرکت های ارتعاشی لینک، متغیر ارتعاشات عرضی به صورت  $w(x,t)$

تعریف شده است به طوری که ارتعاشات عرضی وابسته به موقعیت  $x$  و زمان  $t$  می باشد. کلیه حرکت های موجود در این سیستم شامل حرکت چرخشی لینک و حرکت های ارتعاش عرضی هستند و به ترتیب به صورت  $\theta(t)$  و  $w(x,t)$  نمایش داده میشوند. موقعیت نقطه  $x$  بر روی لینک در چارچوب به صورت زیر است:



شکل (۱) نمایش درجات آزادی و چارچوب های تعریفی

برای یک ربات بازو تک لینک انعطاف پذیر

(۱)

$$\vec{p}(x,t) = \begin{bmatrix} x \cos \theta(t) - w(x,t) \sin \theta(t) \\ x \sin \theta(t) + w(x,t) \cos \theta(t) \end{bmatrix}$$

به منظور ساده نویسی در نوشتن توابع سینوسی از عبارات  $C_\theta = \cos \theta$  و  $S_\theta = \sin \theta$  استفاده خواهد شد. سرعت نقطه  $x$  را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

(۲)

$$\dot{\vec{p}}(x,t) = \begin{bmatrix} -(x\dot{\theta} + w_t)S_\theta - w\dot{\theta}C_\theta \\ (x\dot{\theta} + w_t)C_\theta - w\dot{\theta}S_\theta \end{bmatrix}$$

با استفاده از بردار سرعت، انرژی جنبشی سیستم را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

(۳)

$$E_k = \frac{1}{2} I_r \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \int_0^l \rho (x^2 \dot{\theta}^2 + w_t^2 + 2w_t x \dot{\theta} + w^2 \dot{\theta}^2) dx$$

همچنین انرژی پتانسیل نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است

(۴)

$$E_p = \frac{1}{2} EI \int_0^l w_{xx}^2(x, t) dx$$

این انرژی بدلیل انرژی خمیدگی الاستیکی است. در این رابطه، انرژی پتانسیل گرانش زمین وجود ندارد چون حرکت بازو درون صفحه ای است و محور دوران بازو در راستای محور z و بردار گرانش زمین است. می‌توان با استفاده از یک تابع لاگرانژین و استفاده از فرمول اویلر - لاگرانژ دینامیک سیستم را بدست آورد. تابع لاگرانژین و فرمول اویلر - لاگرانژ به صورت زیر هستند:

(۵)

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = W_\tau$$

به طوریکه در این رابطه  $\mathcal{L} = E_k - E_p$  تابع لاگرانژ سیستم است. به منظور استفاده از فرمول فوق باید بردار درجات آزادی تعمیم یافته را برای بیان q تعریف کرد. در ابتدا جابجایی ارتعاشات عرضی به صورت زیر تجزیه می‌شوند:

هوشمند سازی ربات بازوی انعطاف پذیر با استفاده از کنترل حلقه بسته

(۶)

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) \eta_i(t) = \phi^T \eta$$

به طوری که بردار  $\eta$  بردار مربوط به درجات آزادی تعمیم یافته و به صورت زیر تعریف می‌شود:

(۷)

$$\eta = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \dots \quad \eta_n]^T \in R^n$$

$$\phi = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_n]^T \in R^n$$

لذا بردار کل درجات آزادی سیستم را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

(۸)

$$q = [\theta \quad \eta^T]^T \in R^{n+1}$$

$$= [\theta \quad \eta_1 \quad \eta_2 \quad \dots \quad \eta_n]^T$$



با استفاده از گسسته سازی طبق رابطه (۶) در محاسبه توابع انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی و با بکارگیری فرمول اویلر لاگرانژ، می‌توان دینامیک این سیستم را به صورت معادلات ODE مرتبه دوم و به فرم ماتریسی به شکل زیر بدست آورد:

(۹)

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + K(q)q = W\tau$$

بطوری که ماتریسهای  $M$  و  $K$  به ترتیب ماتریسهای اینرسی و سختی سیستم هستند و بصورت زیر می‌باشند. مدل دینامیکی بالا یک مدل غیرخطی است چون ماتریس‌های مدل فوق وابسته به  $q, \dot{q}$  می‌باشند.

(۱۰)

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{11}(\eta) & m_{12} \\ m_{12}^T & m_{22} \end{bmatrix} \in R^{(n+1) \times (n+1)}$$

$$K(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0_{1 \times n} \\ 0_{n \times 1} & k_{22}(\theta) \end{bmatrix} \in R^{(n+1) \times (n+1)}$$

$$C(q, \dot{q}) = [c_1(\eta, \dot{\eta}, \theta) \quad 0_{1 \times n}]^T \in R^{(n+1) \times 1}$$

$$W = [1 \quad 0_{1 \times n}]^T \in R^{(n+1) \times 1}$$

و در آن زیرماتریس‌ها به صورت زیر بدست آمده‌اند و با توجه به اینکه  $\omega_i$  فرکانس طبیعی مربوط به شکل مد  $\phi_i(x)$  است.

(۱۱)

$$m_{11} = I_r + I_b + \rho \ell \eta^T \eta$$

$$m_{22} = \text{diag}[\rho \ell \quad \rho \ell \quad \dots \quad \rho \ell] \in R^{n \times n}$$

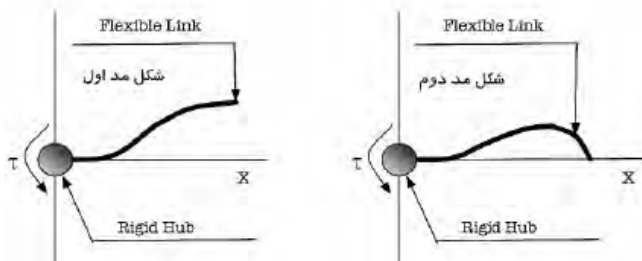
$$m_{12} = [\mu_1 \quad \mu_2 \quad \dots \quad \mu_n] \in R^{1 \times n}$$

$$k_{22} = \text{diag}[\rho \ell (\omega_1^2 - \theta^2)]_{i=1}^n \in R^{n \times n}$$

$$\mu_i = \rho \int_0^\ell x \phi_i(x) dx$$

$$c_1 = 2\rho \ell \theta \eta^T \dot{\eta}$$

مدل (۹) یک مدل غیرخطی است لذا به منظور ساده شدن مدل، فرض می‌شود سرعت تغییرات درجه آزادی کوچک است و  $\dot{\theta} \approx \theta$  در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۲) نمودار توابع شکل مدهای اول و دوم

میتوان با تعریف بردار متغیرهای حالت به صورت  $X = [q \ \dot{q}]^T \in R^{2(n+1)}$  مدل (۱۰) را به صورت زیر و به فرم فضای حالت باز نویسی کرد:

(۱۲)

هوشمند سازی ربات بازوی انعطاف پذیر با استفاده از کنترل حلقه بسته

$$\dot{X} = AX + Bu$$

$$y = CX$$

به طوری که ماتریس‌های فرم فضای حالت بصورت زیر هستند:

(۱۳)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & -M^{-1}K \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ W \end{bmatrix}$$

$$C = [1_{1 \times (n+1)} \quad 0_{1 \times (n+1)}]$$

به منظور محاسبه درایه‌های ماتریس‌های فوق باید توابع پایه شکل مد  $\phi_i(x)$  به اختیار تعریف گردند. البته این توابع باید دارای برخی خصوصیات باشند در اینجا از توابع شکل مد زیر استفاده خواهد شد:

(۱۴)

$$\phi(x) = [\phi_1(x) \quad \phi_2(x)]^T \in R^2$$

$$\phi_1(x) = 3\left(\frac{x}{\ell}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{\ell}\right)^3$$

$$\phi_2(x) = \left(\frac{x}{\ell}\right)^2 - \left(\frac{x}{\ell}\right)^3$$

نمودار توابع شکل مدهای فوق در شکل (۲) نشان داده شده است.

## طراحی سیستم کنترل ربات بازوی انعطاف‌پذیر

کنترل سیستم‌های انعطاف‌پذیر اهمیت ویژه‌ای دارند چون یکی از چالش‌های اصلی، کنترل ارتعاشات در سیستم‌های انعطاف‌پذیر است. به منظور محدود کردن میزان ارتعاشات در سیستم‌های مکانیکی انعطاف‌پذیر می‌توان سه روش عمده را مد نظر قرار داد: ۱. ایجاد حرکت‌های آهسته و کند یا ۲. استفاده از فرامین حرکتی هوشمند و یا ۳. استفاده از کنترل فیدبک با ساختار کنترلی خاص، به طوری که اطمینان حاصل شود دینامیک‌های ارتعاشی در سیستم انعطاف‌پذیر تحریک نگردند. در بسیاری از کاربردها حرکت‌های سریع مدنظر است لذا رویکرد اول مناسب نیست. در روش دوم تلاش می‌گردد عواملی تحریک‌کننده دینامیک‌های ارتعاشی حذف گردد لذا می‌توان از فیلترهای خاص بدین منظور استفاده کرد. بر اساس رویکرد سوم، روش‌های کنترلی با ساختارهای حلقه بسته متنوعی ارائه شده است. هدف اصلی در این تحقیق استفاده و ترکیب رویکرد دوم و سوم است. رویکرد دوم دارای ضعف‌های متعددی است و بسیاری از این ضعف‌ها بدلیل حلقه باز بودن آن است، لذا می‌توان با استفاده از فیدبک و ایجاد حلقه‌های کنترلی تلاش کرده ضعف‌های روش فوق را کاهش داد. در اینجا یک روش کنترل شکل‌دهی ورودی کنترل حلقه بسته مناسب به منظور کنترل ربات یک درجه آزادی تک-لینک ارائه می‌گردد.

## روش کنترل شکل‌دهی ورودی ZVD

در تکنیک شکل‌دهی ورودی، ترکیب خطی از مجموع سیگنال‌های تاخیری ورودی اصلی به منظور اعمال به سیستم ارتعاشی محاسبه می‌گردد. فرض کنید  $r(t)$  سیگنال ورودی اصلی و  $r_{sh}(t)$  سیگنال

شکل‌دهی شده است. به طور کلی بر اساس روش شکل‌دهی ورودی، با ترکیب خطی سیگنال‌های تاخیری ورودی اصلی، سیگنال شکل‌دهی شده به صورت زیر تولید می‌شود.

(۱۵)

$$r_{sh}(t) = \sum_{k=0}^N A_k r(t - t_{d_k})$$

به منظور نرمالیزه کردن و همچنین بدست آوردن یک حل منحصر بفرد شرایط زیر بر روی  $A_k$  در نظر گرفته می‌شود.

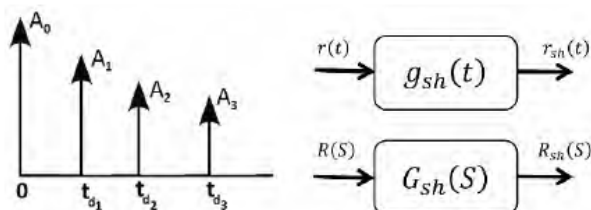
(۱۶)

$$\sum_{k=0}^N A_k = 1, A_k \geq 0, k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

به منظور تعیین مقدار مناسب پارامتر اندازه  $A_k$  و پارامتر تاخیر  $A_{d_k}$  باید شناخت دقیقی از فرکانس‌های طبیعی دینامیک های ارتعاشی وجود داشته باشد. می‌توان عملگر شکل‌دهی ورودی را به صورت تابع تبدیل  $G_{sh}(S)$  به صورت زیر بدست آورد:

(۱۷) **شماره سازی ربات بازوی انعطاف پذیر با استفاده از کنترل حلقه بسته**

$$\begin{aligned} R_{sh}(S) &= G_{sh}(S) R(S) \\ &= \sum_{k=0}^N A_k e^{t_{d_k} S} R(s) \end{aligned}$$



ب

الف

شکل (۳) الف- عملگر شکل‌دهی ورودی در حوزه زمان و لاپلاس

ب- توالی ضربه در پاسخ ضربه عملگر شکل‌دهی ورودی

بنابراین تابع تبدیل و پاسخ ضربه عملگر شکل‌دهی ورودی چنین خواهد بود:

(۱۸)

$$G_{sh}(S) = \sum_{k=0}^N A_k e^{t_{dk} S}$$

$$g_{sh}(t) = \sum_{k=0}^N A_k \delta(t - t_{dk})$$

در شکل (۳) عملگر شکل‌دهی ورودی و پاسخ ضربه آن ترسیم شده است. همانطور که دیده شد، تابع پاسخ ضربه عملگر شکل‌دهی ورودی شامل یک سری توالی ضربه است. اگر  $r(t)$  یک ورودی فرمان مطلوب مد نظر باشد، محاسبات مربوط به شکل‌دهی ورودی و اصلاح آن در حوزه زمان بوسیله انتگرال کانولوشن  $g_{sh}(t) * r(t)$  بصورت زیر انجام می‌گیرد.

(۱۹)

$$r_{sh}(t) = \int_0^{+\infty} g_{sh}(\tau) r(t - \tau) d\tau$$

یکی از روش‌های شکل‌دهی ورودی ZVD است. همانطور که مشاهده شد، پارامترهای کنترل شکل‌دهی ورودی،  $A_k, t_{dk}$  هستند. عملگر کنترل شکل‌دهی ورودی ZVD به صورت زیر است:

(۲۰)

$$g_{zv}(t) = A_0 \delta(t) + A_1 \delta(t - t_{d1}) + A_2 \delta(t - t_{d2})$$

فرض کنید این سیستم ارتعاشی دارای دینامیک ارتعاشی با فرکانس طبیعی نامیرا  $\omega_n$  و ضریب میرایی  $\xi$  است لذا فرکانس طبیعی میراشونده و میرایی دینامیک ارتعاشات به ترتیب برابر  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$  و  $\sigma = \xi \omega_n$  خواهد بود. با اعمال توالی ضربه عملگر شکل‌دهی، ارتعاشات بر جای مانده در پاسخ سیستم ارتعاشی را می‌توان به صورت بدست آورد.

(۲۱)

$$V(\xi, \omega_n) = e^{-\sigma t_N} \sqrt{C^2(\xi, \omega_n) + S^2(\xi, \omega_n)}$$

به طوری که

(۲۲)

$$C(\xi, \omega_n) = \sum_{k=0}^N A_k e^{\sigma t_{d_k}} \cos(\omega_d t_{d_k})$$

$$S(\xi, \omega_n) = \sum_{k=0}^N A_k e^{\sigma t_{d_k}} \sin(\omega_d t_{d_k})$$

در روش شکل‌دهی ZVD، قیود عملکردی زیر در نظر گرفته میشوند:

(۲۳)

$$V(\xi, \omega_n) = 0$$

$$\left. \frac{d}{d\omega} V(\xi, \omega) \right|_{\omega=\omega_n} = 0$$

با حل معادلات بالا و همچنین با در نظر گرفتن شرط (۱۴)، ماتریس پارامترهای شکل‌دهی ZVD که به صورت  $M_{zvd}$  تعریف می‌شود به صورت زیر بدست خواهد آمد:

(۲۴)

هوشمند سازی ربات بازوی انعطاف پذیر با استفاده از کنترل حلقه بسته

$$M_{ZVD} = \begin{bmatrix} 0 & t_{d1} & t_{d2} \\ A_0 & A_1 & A_2 \end{bmatrix}$$

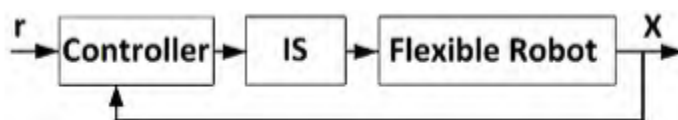
$$= \begin{bmatrix} 0 & T/2 & T \\ \frac{\gamma^2}{\gamma^2+2\gamma+1} & \frac{2\gamma}{\gamma^2+2\gamma+1} & \frac{1}{\gamma^2+2\gamma+1} \end{bmatrix}$$

در روابط بالا،  $T = 2\pi/\omega_d$  و  $\gamma = e^{\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}}$  هستند، به طوری که  $\xi$  و  $\omega_d$  به ترتیب ضریب میرایی و فرکانس نوسانی میراشونده هستند.

## روش کنترل شکل‌دهی ورودی حلقه بسته

کنترل فیدبکی یک استراتژی موفق است که بدلیل استفاده از پسخوردهای رفتاری سیستم و ایجاد حلقه‌های کنترلی توانسته به طور موثر و موفق در کاربردهای مختلف استفاده گردد و همواره مورد توجه محققین بوده است. در این قسمت یک سیستم کنترلی مطابق شکل (۴) مورد استفاده قرار می‌گیرد بطوری که عملگر شکل‌دهی ورودی درون این حلقه کنترلی قرار می‌گیرد. بر اساس این ساختار کنترلی،

قوام عملکرد عملگر شکل‌دهی ورودی بهبود خواهد یافت و علاوه بر این تاثیرات اغتشاشات نیز میتواند کاهش یابد.



شکل (۴) سیستم کنترل حلقه بسته شامل عملگر شکل‌دهی ورودی

مدل فضای حالت (۱۲) را در نظر بگیرید. با اضافه کردن عملگر شکل‌دهی ورودی ZVD، مدل فضای حالت بدین صورت خواهد شد:

(۲۵)

$$\dot{X} = AX + B_0 u(t) + \sum_{k=1}^2 B_k u(t - t_{d_k})$$

$$y = Cx$$

به طوریکه  $B_k = BA_k$  و ماتریس‌های  $A_k$  و زمان‌های تاخیر  $t_{d_k}$  مطابق رابطه (۲۴) محاسبه میشوند. یک کنترل فیدبک حالت خطی بصورت زیر برای سیستم تاخیری (۲۵) بصورت زیر پیشنهاد داده میشود:

(۲۶)

$$u(t) = KX(t)$$

بنابراین دینامیک سیستم حلقه بسته چنین خواهد بود:

(۲۷)

$$\dot{X} = \tilde{A}X + \sum_{k=1}^2 \tilde{B}_k X(t - t_{d_k})$$

بطوریکه برابر  $\tilde{A} = A + B_0 K$  و  $\tilde{B} = B_k K$  هستند. متغیر جدید  $(z) - E_1 x(t) + E_2 u(t)$  را در نظر بگیرید. در صورتیکه مقداری بهینه برای بهره فیدبک حالت تعیین گردد بطوریکه تابع هزینه زیر حداقل گردد در آن صورت سیستم کنترلی حلقه بسته پایدار خواهد بود.

(۲۸)

$$J(x, K) = \int_0^{\infty} z^T(t) z(t) dt$$

در ابتدا ماتریس‌های  $R_1, R$  بصورت  $R_1 = E_1^T E_1$  و  $R = \tilde{E}^T \tilde{E}$  تعریف میشوند بطوریکه  $\tilde{E} = E_1 + E_2 K$  می‌باشد. قضیه: در صورتیکه ماتریس معین مثبت  $P$  و مقادیر مثبت  $a_k \in \mathbb{R}$  برای  $k = 1, 2$ ، چنان وجود داشته باشند که داشته باشیم:

(۲۹)

$$\begin{aligned} \tilde{A}^T P + P \tilde{A} + \epsilon P + \sum \alpha_k^2 K^T R_2 K \\ + \sum \alpha_k^{-2} P B_k R_2^{-1} B_k^T P + R < 0 \end{aligned}$$

در آن صورت تابع زیر یک کاندید تابع لیاپانوف خواهد بود:

(۳۰)

$$\begin{aligned} V(X) = X^T P X \\ + \sum \alpha_k^2 \int_{t-t_{dk}}^t X^T(\tau) K^T R_2 K X(\tau) d\tau \end{aligned}$$

بنابراین سیستم کنترلی حلقه بسته با کنترل کننده فیدبک حالت (۲۶) پایدار مجانبی خواهد بود. تعریف ماتریس‌های زیر را در نظر بگیرید

(۳۱)

$$\bar{R}_1 = \sum \alpha_k^2 R \quad ; \quad \bar{R}_2 = \sum \alpha_k^{-2} B_k R_2^{-1} B_k^T$$

بنابراین میتوان نامساوی (۲۹) را چنین بازنویسی کرد:

(۳۲)

$$\tilde{A}^T P + P \tilde{A} + \epsilon P + K^T \bar{R}_1 K + P \bar{R}_2 P + \tilde{E}^T \tilde{E} < 0$$

با ضرب ماتریس  $P^{-1}$  در دو طرف نامساوی و استفاده از ماتریس‌های تعریفی زیر

(۳۳)



$$L = P^{-1} \quad ; \quad Y = KL$$

$$\hat{A} = AL + BY \quad ; \quad \hat{E} = E_1 L + E_2 Y$$

و استفاده از نامساوی ماتریس ترکیبی شور (Schur)، میتوان نامساوی (۳۲) را به فرم LMI به صورت زیر بازنویسی کرد:

(۳۴)

$$\begin{bmatrix} \hat{A} + \hat{A}^T + \epsilon L + \bar{R}_1 & Y^T & \bar{E}^T \\ \times & -\bar{R}_2^{-1} & 0 \\ \times & \times & -I \end{bmatrix} < 0$$

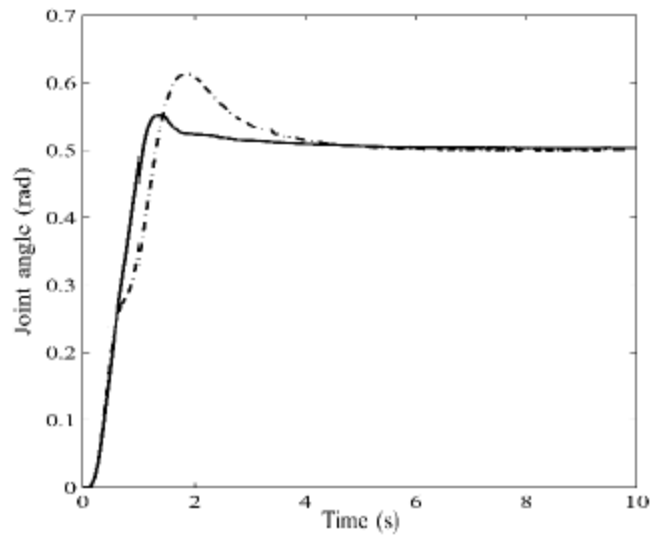
در صورتیکه به ازای مقادیر مثبت  $\epsilon, \alpha_k$ ، ماتریس‌های معین مثبت  $L, Y$  وجود داشته باشند که نامساوی ماتریسی (۳۴) برقرار باشد در آن صورت ماتریس  $P = L^{-1}$  و کنترل فیدبک حالت (۲۶) با ماتریس بهره  $K = YL^{-1}$  خواهد توانست پایداری سیستم کنترلی حلقه بسته را ضمانت کند.

## نتایج شبیه سازی و نتیجه گیری

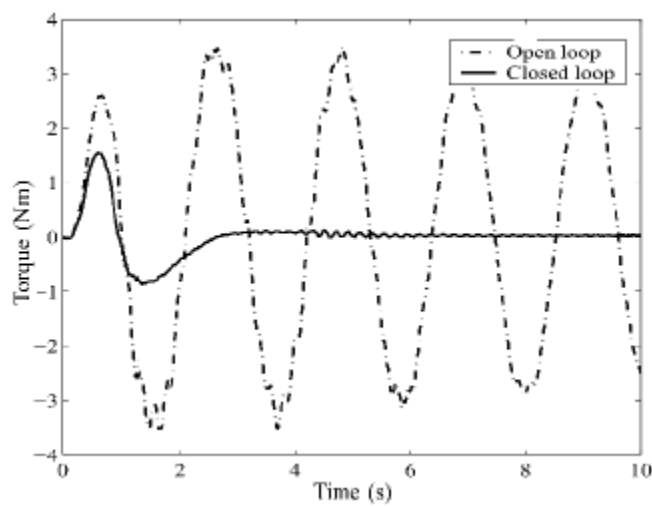
در اینجا به منظور ارزیابی مدل ربات بازو انعطاف پذیر و ارزیابی کنترل کننده پیشنهادی نتایج شبیه سازی ارائه می گردند.

به منظور شبیه سازی، مقادیر پارامترها را برابر  $EI = 2.4$ ، چگالی طولی جرم لینک را برابر  $\rho = 0.265 \frac{kg}{m}$  و جرم انتهای لینک را برابر  $m = 0.3kg$  و ممان اینرسی شفت-روتور مربوط به موتور را برابر  $0.8kg.m^2$  در نظر گرفته شده است. مقدار مرجع برای زاویه دورانی بازو برابر  $0.5 rad$  در نظر گرفته شده است. به منظور ارائه نتایج شبیه سازی، خروجی ها، زاویه دوران بازو در مفصل، زاویه دورانی حرکت انتهای بازو و همچنین گشتاورهای تولیدی توسط کنترل کننده هستند. همانطور که مشاهده می گردد

حرکت زاویه ای مفصل و همچنین حرکت زاویه ای انتهای لینک در مدت زمان حدود ۵ ثانیه توانسته اند با حرکتی هموار به مقدار مرجع برسند. علاوه بر این سیگنال گشتاور تولیدی نیز نسبتاً هموار است و می توان توسط موتورهای الکتریکی آن را تولید کرد.



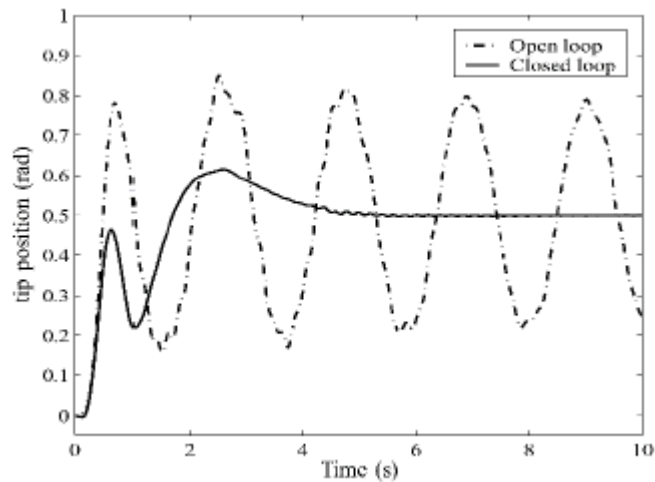
شکل (۵) حرکت زاویه مفصلی پس از اعمال کنترل کننده و مقایسه عملکرد کنترل کننده به ازای  $m=0.3\text{kg}$  و  $m=0\text{kg}$



شکل (۶) گشتاور در حالت حلقه باز و با حلقه کنترلی

نزل حلقه بسته

هوشمند سازی



شکل (۷) زاویه دورانی حرکت انتهای بازو در حالت حلقه باز و با حلقه کنترلی شامل شکل دهی ورودی

## هوشمند سازی ربات بازوی انعطاف پذیر با استفاده از کنترل حلقه بسته

نَرُود هوشمند در آبی

تا نبیند نَخُست پایش...

(سعدی)

پایان

ششم خردادماه صفر یک (۱۴۰۱) - حسین اسماعیلی

*Hossein Esmaeili*  
1401/03/06