



کنترل امپدانس تطبیقی مقاوم بازوی ربات اسکارا با رویکرد تزریق سلولی رباتیکی

زینب قاسمی زهان^{1*}، علی اکبرزاده کلات²، محمد مهدی فاتح³

1- مربی، مهندسی رباتیک، موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری، مشهد

2- استادیار، مهندسی کنترل، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

3- استاد، مهندسی رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

*مشهد، صندوق پستی 9177113113، zeinab.ghassemi@eqbal.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 تیر 1395

پذیرش: 22 آبان 1395

ارائه در سایت: 08 دی 1395

کلید واژگان:

کنترل امپدانس

تخمین پارامتر

دینامیک ربات اسکارا

کنترل ولتاژ

تزریق سلولی رباتیکی

چکیده

در سیستم تزریق سلولی که شاخه‌ای نوین در علم پزشکی است، سلول زنده را بر روی صفحه دوار سلولی چیده و با ابزار تزریق توسط سوزن ظریفی، ماده شیمیایی را به سلول تزریق می‌کنند. کنترل‌کننده به تنظیم ارتفاع، موقعیت و جهت صفحه دوار، می‌پردازد و ابزار تزریق بدون نیاز به سیستم کنترلی، یک مسیر معین را ردگیری می‌کند. جایجایی صفحه دوار به دلیل حساسیت بالای سلول، سبب آسیب یا مرگ تعدادی از سلول‌ها می‌گردد. پیشنهاد این مقاله به منظور افزایش میزان موفقیت و کاهش آسیب به سلول، ثابت کردن صفحه سلولی و جایگزینی ربات اسکارا با ابزار تزریق می‌باشد. در این حالت صفحه سلولی هیچ حرکتی ندارد و بازوی ربات، کنترل می‌شود. ربات اسکارا، توانایی همزمان ردگیری موقعیت مطلوب و اعمال نیروی متغیر با زمان، مناسب و بدون نویز را داراست. با مدل غیرخطی پیشنهادی محیط، پارامترهای مدل سلول تزریق را تخمین زده و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا، بهینه می‌گردد. تاکنون تمامی روش‌های سیستم تزریق سلولی، بر مبنای کنترل گشتاور بوده که سیستم کنترلی به دینامیک ربات و سلول وابسته بود. در این مقاله به اعمال کنترل امپدانس در حوزه ولتاژ پرداخته شده. این روش که به کنترل محرکه‌های ربات می‌پردازد، ساده‌تر است و به مدل دینامیکی پیچیده ربات و سلول تحت تزریق بستگی ندارد. طراحی کنترل‌کننده تطبیقی مقاوم در حضور اغتشاش خارجی و نامعینی‌های مدل محرکه ربات است، تا بر این چالش غلبه کند. تحلیل پایداری نشان می‌دهد که؛ سیستم ربات پایدار است. نتایج شبیه‌سازی‌ها، بیانگر کارایی مطلوب طرح رباتیکی شدن سیستم تزریق سلولی پیشنهادی می‌باشد.

Robust Adaptive Impedance Control in Scara Robot Manipulator for Robotic Cell Injection

Zeinab Ghassemi Zahan^{1*}, Ali AkbarZadeh Kalat², Mohammad Mahdi Fateh²

1- Department of Robotic Engineering, Eqbal Institute of Higher Education, Mashhad, Iran.

2- Department of Control Engineering, Shahrood Industrial University, Shahrood, Iran

*P.O.B. 9177113113, Mashhad, Iran, zeinab.ghassemi@eqbal.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 03 July 2016

Accepted 13 November 2016

Available Online 28 December 2016

Keywords:

Force-Impedance Control

Parameter Estimation

SCARA Robot Dynamic

Voltage Strategy

Robotic Cell injection

ABSTRACT

Cell injection system in medicine is used to inject the materials into the cells. The injection system consists of injector and rotating plate. The controller sets height, position and orientation of the rotating plate. The proposal of this article is to replace SCARA robot injection tool including ability in desired position tracking and is applied to time-varying force. In recent articles the control system is applied to the rotating plate of cells and this method can cause damage. The proposed method is fixed plate and to increase the success rate, the robot is been controlled. The parameters of environmental models are estimated by nonlinear proposed models and by using the recursive method, the minimum of square errors will be optimal. The voltage strategy can control robot actuators. This method is simpler and free from the manipulator dynamics. In all recent studies, the impedance control is based on the torque control method and the proposed method of this article is to apply the impedance control using voltage control. The robust adaptive impedance controller is designed in the presence of uncertainties. The simulation's results demonstrate desired performance of the proposed method.

1- مقدمه

به علم پزشکی می‌دهد تا انجام هر عملی را با دقت و سرعت بالا از این سیستم‌ها انتظار داشته باشند [1].

در بسیاری از کاربردهای پزشکی، بازوی ربات با محیط در تماس است. در این حالت، ربات به ردگیری مسیر مطلوب و اعمال نیروی مناسب در نقطه تماس می‌پردازد. طراحان سیستم‌های کنترلی، به‌منظور کنترل موقعیت و نیرو روش‌های مختلفی را به‌کار می‌گیرند. روش اول مبتنی بر ارتباط بین موقعیت و نیروی اعمالی بر محیط در حالت ماندگار مانند کنترل ضریب

امروزه در کشورهای بزرگ صنعتی استفاده از ربات در علم پزشکی مرسوم شده است. عمده‌ترین دلایل استفاده از این سیستم‌ها را می‌توان افزایش میزان دقت، کاهش هزینه‌ها، افزایش کیفیت تولید و کاهش مصرف انرژی نام برد. بهبود کیفیت کار نیروی انسانی، ایمنی و سلامت آن‌ها نیز عامل جایگزینی ربات‌ها با انسان‌ها شد. همچنین انعطاف‌پذیری بازوهای رباتیک با توجه به کنترل‌پذیری و برنامه‌پذیری آن‌ها نکته مثبتی است که این امکان را

Please cite this article using:

Z. Ghassemi Zahan, A. AkbarZadeh Kalat, M. M. Fateh, Robust Adaptive Impedance Control in Scara Robot Manipulator for Robotic Cell Injection, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 637-647, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

روش جدیدی به نام کنترل ولتاژ³ مطرح شده است. این روش به علت آزادی از دینامیک ربات و ساختار ساده تر معادلات آن، نسبت به روش کنترل گشتاور برتری دارد. در روش کنترل ولتاژ به جای استفاده از دینامیک پیچیده و چندمتغیره ربات، از مدل موتور به منظور طراحی کنترل کننده استفاده می شود [3]. کنترل امپدانس بر پایه ولتاژ به دینامیک ربات و سلول تحت تزریق وابسته نمی باشد. در این روش دینامیک محرکه های ربات در قانون کنترل لحاظ می گردد. بنابراین در قانون کنترلی به حل چالش نامعینی های موجود در مدل محرکه ربات پرداخته می شود.

یک چالش اساسی در بحث کنترل ربات، وجود نامعینی هاست. نامعینی می تواند هم در مدل به معنای در دسترس نبودن اطلاعات و مشخصات دقیق از سیستم ربات یا دینامیک مدل نشده و هم در اندازه گیری ها ناشی از سیستم سنسورها یا انتقال داده های به دست آمده از آن ها به سیستم کنترلی باشد. در این حالت کنترل مقاوم تلاشی برای رفع این مشکل است. این روش کنترلی در حضور نامعینی ها به گونه ای طراحی می شود تا رفتار و عملکرد سیستم در تمام حالات ممکن قابل قبول باشد. در این مقاله سعی شده است تا با ارائه طرح پیشنهادی کنترل امپدانس تطبیقی مقاوم، بر نامعینی های مدل محرکه ربات غلبه شود.

تزریق سلولی⁴ روشی نوین در علم پزشکی است که برای تجهیزات خودکار⁵ به کار گرفته می شود تا ماده مورد نظر را به سلول زنده مورد آزمایش، تزریق کند. این روش برای کاربردهایی همانند لقاح در سطح آزمایشگاهی، تزریق سلول های ترمیمی، ژن درمانی، ترمیم سلول های بافتی آسیب دیده، داروسازی و غیره مورد استفاده است. تزریق سلولی مرسوم به صورت دستی انجام می شد که با سختی های بسیاری همراه بود [17].

با گذشت زمان و پیشرفت تکنولوژی، سیستم تزریق سلولی نیز به سمت نیمه خودکاری شدن پیش رفت. سیستم مورد استفاده در اکثر آزمایشگاه ها، در ابتدای کار برای تنظیم نوک تزریق کننده در محوطه قابل قبول، به یک متصدی⁶ نیازمند هستند. بنابراین علم تزریق سلولی به سمت تمام خودکاری شدن سوق پیدا کرد [18].

سیستم تزریق سلولی از صفحه دوار سلولی که برای چیدمان سلول ها بر روی آن است و یک ابزار تزریق به منظور وارد کردن ماده شیمیایی به سلول، تشکیل می شود. در سیستمی که امروزه مورد استفاده است؛ سلول های زنده را بر روی صفحه دوار چیده و به تنظیم ارتفاع و موقعیت صفحه سلولی می پردازند. سپس ابزار تزریق یک مسیر صاف مورد نظر را ردگیری کرده و به سلول، ماده شیمیایی را تزریق نموده و سپس به نقطه شروع، باز می گردد [19].

در این مقاله به پیشنهاد رباتیکی شدن سیستم تزریق سلولی می پردازیم. در صورت تحقق این هدف، کاربرد سیستم تزریق در علم پزشکی در زمینه های مختلف درمانی گسترش یافته و دقت و میزان موفقیت این روش افزایش می یابد. در سیستم تزریق رباتیکی پیشنهادی، سیستم با صفحه ثابت سلولی جایگزین صفحه دوار می شود. ثابت شدن صفحه سبب کاهش میزان مرگ و آسیب به سلول می گردد. بنابراین بازوی ربات اسکارا را به عنوان ابزار تزریق، کنترل می کنیم و نیروی مطلوب ربات، یک نیروی متغیر با زمان، مناسب، بدون نویز و در محدوده تحمل سلول تحت تزریق است. در این حالت، ربات اسکارای مورد بررسی، توانایی همزمان ردگیری موقعیت مطلوب

سختی می باشد [2]. روش دوم مبتنی بر ارتباط بین سرعت و نیروی اعمالی مانند کنترل امپدانس است [3]. روش سوم به طراحی کنترل کننده ترکیبی موقعیت و نیرو به صورت موازی می پردازد. در این حالت پس خورد موقعیت و نیرو به کار گرفته می شود [4]. در روش چهارم نیز، فقط از پس خورد نیرو استفاده می شود [5].

هدف از کنترل امپدانس تعیین دقیق موقعیت و نیرو نمی باشد، بلکه کنترل امپدانس به تنظیم رابطه بین کنترل موقعیت و کنترل نیرو به صورت همزمان می پردازد [6]. این روش قادر به تنظیم امپدانس ربات در تماس با محیط است. قانون کنترل امپدانس به طراحی دینامیکی می پردازد که بازوی ربات در تماس با سلول تحت تزریق از خود نشان می دهد. در این صورت ربات در هنگام تماس با سلول تحت تزریق همانند سیستم جرم-فنر-دمپر عمل می کند. در کنترل امپدانس بایستی انواع راهبردهای مختلف کنترلی، به صورت منسجم به کار گرفته شود [7]. مدل امپدانس به تعیین رفتار دینامیکی ربات در ارتباط با محیط می پردازد [3].

تاکنون به منظور شبیه سازی کنترل امپدانس، از کنترل کننده های مختلفی استفاده شده است. استفاده از کنترل کننده تطبیقی در برخی سیستم های کنترلی نتایج مطلوبی را به دنبال داشت [8]. طراحان سیستم های کنترلی به منظور تغییر رفتار دینامیکی مطلوب در هنگامی که رفتار سیستم در تماس با محیط متغیر است، از کنترل کننده فازی استفاده نمودند [9].

بازوی ربات اسکارا در صنعت پزشکی امروزه دنیا، کاربرد فراوانی دارد. کنترل امپدانس بر روی این بازوی ربات با دو درجه آزادی به خوبی جوابگوست و کنترل نیرو و موقعیت با خطای نزدیک به صفر محقق گردید [10]. استفاده از کنترل امپدانس در طراحی ربات های کمک رسان به بیماران تحت درمان محقق شده است. طراحان این سیستم، کلیه روابط را در فضای مفصلی بررسی نموده اند و در روش پیشنهادی مطرح شده، کنترل نیرو بر روی ربات امدادی به خوبی محقق گردید [11].

طراحان سیستم های کنترلی، پارامترهای کنترل امپدانس را معمولاً به صورت تجربی و شهودی و متناسب با شرایط سیستم به گونه ای تنظیم می کنند تا این پارامترها به مقدار مطلوب برسند. ضرایب امپدانس را می توان به روش های مختلفی همانند مکانیزم های سوئیچ زنی¹ [12] تنظیم کرد. ضرایب امپدانس مکانیکی را می توان با یک سیستم فازی شبه تناسبی-انتگرالی-مشتقی تنظیم نمود [13] و در این مقاله به منظور تعیین ضریب امپدانس از خطای نیرو و اندازه نیرو استفاده شده است. استفاده از روش های مختلف کنترلی همانند سیستم فازی-تطبیقی در تعیین ضرایب امپدانس ربات، سبب افزایش کارایی کنترل کننده می گردد [14].

بررسی جدیدترین مطالعات که در زمینه تزریق سلولی صورت گرفته است، نشان می دهد که این روش بر پایه کنترل گشتاور² است [15، 16]. در روش کنترل گشتاور، کنترل کننده با مشکلاتی همانند عدم قطعیت و غیرخطی بودن ناشی از دینامیک ربات و پیچیدگی روابط بازوی ربات مواجه می گردد. همچنین محرکه های ربات باید نیروی لازم برای ایجاد حرکت بازوی ربات را فراهم سازند. اما در کاربردهای عملی با مشکلاتی همانند محدودیت های محرکه و محدودیت های سنسوری آن روبرو می شود. در روش کنترل گشتاور، سیستم کنترلی به دینامیک سلول تحت تزریق وابسته می شود که خود مشکل بزرگی است. اخیراً در حوزه کنترل بازوهای ربات

³ Voltage Control⁴ Cell Injection⁵ Automatic⁶ Operator¹ Switching² Torque Control

ماتریسی به صورت زیر باشد [3].

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} \dot{q} + \phi = u \quad (9)$$

که در رابطه بالا $u \in \mathbb{R}^n$ بردار ولتاژ موتورها، $I_a \in \mathbb{R}^n$ بردار جریان موتورها، $\phi \in \mathbb{R}^n$ بردار اغتشاشات خارجی، R ، L و K_b که به ترتیب بیانگر ماتریس‌های قطری $n \times n$ به عنوان ضرایب مقاومت آرمیچر، اثر تزویج و جریان بازگشتی می‌باشند. بردار گشتاور موتورها τ_m به عنوان ورودی معادله دینامیکی (7) توسط جریان موتورها به کمک رابطه زیر به دست می‌آید [3].

$$\tau_m = K_m I_a \quad (10)$$

که در رابطه بالا K_m ماتریس قطری ثابت گشتاور است. مدل فضای حالت موتورهای الکتریکی ربات را با استفاده از معادله (1) و رابطه (10) می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$\dot{z} = f(z) + bw - b\varphi \quad (11)$$

در این رابطه $w^T = [F_e \quad u]$ به عنوان ورودی سیستم لحاظ می‌گردد و $\varphi^T = [0 \quad \phi]$ و $z^T = [q \quad \dot{q} \quad I_a]$ متغیرهای حالت هستند. همچنین b و $f(z)$ به صورت زیر می‌باشند.

$$b = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -J_m r^{-1} + rD(z_1))^{-1} r J^T(z_1) & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{bmatrix}$$

$$f(z) = \begin{bmatrix} \dot{z}_2 \\ f_2 \\ -L^{-1}(K_b r^{-1} \dot{z}_2 + R z_3) \end{bmatrix}$$

$$f_2 = (J_m r^{-1} + rD(z_1))^{-1} (-B_m r^{-1} + rC(z_1, z_2)) z_2 - r g(z_1) + K_m z_3 \quad (12)$$

معادله فضای حالت (12) یک سیستم چندمتغیره غیرخطی با اثر متقابل است. یکی از چالش‌های اساسی در زمینه کنترل و مدل‌سازی ربات، پیچیدگی این مدل است. رابطه (2) یک انتقال از فضای مفصلی به فضای کار می‌باشد. اما گاهی باید بردار موقعیت مفاصل ربات از طریق نقطه انتهایی ربات محاسبه گردد. با استفاده از ماتریس ژاکوبین رابطه زیر را داریم:

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \dot{x} \quad (13)$$

بنابراین ولتاژ موتورهای الکتریکی که همان ورودی سیستم هستند، توسط معادله الکتریکی موتورهای جریان مستقیم با جاروبک مغناطیسی به صورت زیر تأمین می‌گردد. رابطه نهایی کنترلی زیر، از روابط (9) و (13) به دست می‌آید.

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} J^{-1}(q) \dot{x} + \phi = u \quad (14)$$

3- مدل‌سازی محیط به صورت سلول تحت تزریق

در روش تزریق سلولی به دلیل حساسیت بالای سلول‌ها، نیروی تزریقی بیش از حد، سبب آسیب به غشاء سلولی می‌گردد و گاهی دیواره سلولی پاره شده و سلول، حیات خود را از دست می‌دهد [21]. بنابراین سالم و زنده ماندن سلول در طی فرایند تزریق حائز اهمیت می‌باشد. این عکس العمل از نقطه نظر رباتیکی به این صورت است که نوک تزریق‌کننده یک تماس سخت فیزیکی با محیط برقرار می‌سازد. سپس نیروی اعمالی موردنظر را در لحظه برخورد، به نقطه تماس اعمال می‌کند [22]. حساس بودن سلول و اهمیت نیروی اعمالی در نقطه تماس از سوی تزریق‌کننده به سلول، سبب شده است تا در سال‌های اخیر مدل‌سازی رفتار سلول تحت تزریق، یک مسئله مهم در تحقیقات علمی و آزمایشگاهی گردد [23].

در طراحی کنترل باید نوک تزریق‌کننده بر روی سلول قرار داده شود و کنترل نیرو و موقعیت هر کدام متناسب با طراحی کنترل‌کننده به درستی انجام شود [24]. در اکثر سیستم‌های کنترل تزریق سلولی که تاکنون طراحی شده‌اند، تنها کنترل موقعیت انجام می‌شود و کنترل نیروی تزریق‌کننده را

و اعمال نیروی مناسب را به خوبی محقق می‌سازد. کنترل‌کننده امپدانس در فضای کار، توسط کنترل ولتاژ محرکه‌های بازوی ربات طراحی می‌شود و در تمامی مطالعات اخیر سیستم‌های تزریق سلولی، کنترل امپدانس بر مبنای روش کنترل گشتاور بوده و در این مقاله، کنترل امپدانس با راهبرد کنترل ولتاژ طراحی شده است.

در بخش دوم به بررسی مدل ربات و روابط دینامیکی ربات اسکارا می‌پردازیم. بخش سوم شامل اطلاعات بیشتری پیرامون سیستم تزریق سلولی و اجزای تشکیل‌دهنده این سیستم که ابزار تزریق و صفحه دوار است، می‌باشد. در بخش چهارم با کنترل امپدانس تطبیقی مقاوم با راهبرد ولتاژ، تعیین مدل امپدانس محیط و امپدانس ربات که بر اساس روش تونن است، آشنا می‌شویم. در بخش پنجم به تحلیل پایداری سیستم ربات می‌پردازیم. بخش ششم نیز شامل نتایج خروجی مدل پیشنهادی است، که کارایی طرح پیشنهادی را به خوبی بیان می‌کند. در بخش انتهایی هفتم نیز نتیجه‌گیری از مباحث مطرح شده در این مقاله است.

2- معادلات دینامیکی ربات

بازوی ربات از n رابط که n مفصل به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل می‌شود. هر رابط با یک موتور dc مغناطیس دائم راهاندازی می‌شود. معادلات دینامیکی ربات [20] با فرض عدم وجود انعطاف‌پذیری در مفاصل به صورت معادله (1) است [3].

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + J^T(q)F_e = \tau_r \quad (1)$$

که در رابطه بالا $q \in \mathbb{R}^n$ بردار موقعیت مفاصل ربات، $D(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس اینرسی ربات، $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاورهای کوریولیس، $g(q) \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاورهای گرانشی، $F_e \in \mathbb{R}^m$ ماتریس نیروی وارده در نقطه تماس و $\tau_r \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاور ربات نامیده می‌شود. همچنین $J(q) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ماتریس ژاکوبین ربات نامیده می‌شود. این ماتریس یک انتقال از فضای مفصلی به فضای کار است. رابطه ماتریس ژاکوبین به صورت زیر است [3].

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (2)$$

که در رابطه بالا $x \in \mathbb{R}^m$ موقعیت نقطه انتهایی ربات است. با مشتق‌گیری از طرفین رابطه (2) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\ddot{x} = \dot{J}(q)\dot{q} + J(q)\ddot{q} \quad (3)$$

بنابراین $\ddot{q}$ از طریق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\ddot{q} = J(q)^{-1}(\ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q}) \quad (4)$$

ماتریس $J(q)^{-1}$ در حالتی که غیرتکین بوده و $n = m$ باشد، وجود دارد [3]. با جایگذاری رابطه (4) در رابطه (1) داریم:

$$D(q)J(q)^{-1}\ddot{x} + h(q, \dot{q}) + J^T(q)F_e = \tau_r \quad (5)$$

با جایگذاری رابطه (3) در رابطه (5) و برقراری تساوی بین رابطه (1) و رابطه (5)، مقدار $h(q, \dot{q})$ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$h(q, \dot{q}) = -D(q)J(q)^{-1}\dot{J}(q)\dot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) \quad (6)$$

موتورهای الکتریکی، گشتاور مفاصل را بر طبق رابطه زیر ایجاد می‌کنند [3]:

$$J_m r^{-1} \ddot{q} + B_m r^{-1} \dot{q} + r \tau_r = \tau_m \quad (7)$$

که در رابطه بالا $\tau_m \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاور موتورها، B_m ، r و J_m ماتریس‌های قطری $n \times n$ هستند، که به ترتیب ضرایب اینرسی، میرایی و کاهشی چرخ‌دنده موتورها می‌باشند. بردار سرعت مفاصل $\dot{q}$ و سرعت موتورها $\dot{\theta}_m \in \mathbb{R}^n$ به کمک چرخ‌دنده‌ها با رابطه زیر، به یکدیگر مرتبط می‌شوند [3].

$$\dot{q} = r \dot{\theta}_m \quad (8)$$

برای تأمین ولتاژ موتورها به عنوان ورودی سیستم، بایستی معادله الکتریکی موتورهای جریان مستقیم با جاروبک مغناطیسی در نمایش

مدل سازی محیط در هنگام برخورد تزریق کننده با دیواره سلول یک مسئله بسیار مهم است که مورد توجه دانشمندان قرار دارد [28]. این مدل سازی بایستی به صورت درست و نزدیک به واقعیت بیان گردد. در اکثر تحقیقاتی که تاکنون در این زمینه صورت گرفته مدل سلول را به صورت فنر، بیان می کنند. در این حالت مدل سلول به صورت زیر قابل بیان است [29]:

$$F_e = K_e(x - x_e) \quad (15)$$

در رابطه بالا K_e ضریب سختی محیط، x_e موقعیت دیواره سلول در زمان قبل از برخورد با نوک تزریق کننده و x موقعیت نوک ابزار تزریق در طول فرایند تزریق سلولی است که در طول فرایند تزریق، مقدارش تغییر می کند. شناخت درست از رفتار سلول در طی فرایند تزریق، مسئله ای بسیار مهم است. سختی دیواره سلول در هر مرحله از زندگی اش متفاوت است. اما در اکثر مدل هایی که تاکنون سلول را به صورت فنر در نظر می گیرند، سختی سلول را یک عدد ثابت فرض می کنند [22]. در این حالت یک راه حل پیشنهادی ساده، تنظیم ضریب سختی با مقدار صفر در لحظه برخورد با محیط است [30]. بنابراین طراح سیستم کنترل کننده می تواند در لحظه برخورد با سلول، نیروی دقیقی را توسط ربات به سلول اعمال نماید [31].

نتایج آزمایشات کنونی بیانگر این است که وقتی نیرو به طور غیرخطی افزایش یابد، دیواره سلولی هم تغییر شکل زیادی می یابد. هنگامی که نوک ابزار تزریق کننده داخل سلول می شود، دیواره سلولی پاره شده و نیروی زیادی به طور ناگهانی به سلول اعمال می گردد. برای آنکه در این حالت به سلول آسیبی نرسد، یک سیگنال برای توقف نیرو به کنترل کننده ارسال می شود. مدل دقیق تر و نزدیک تر به واقعیت سلول، به کمک معادله چندجمله ای درجه دو قابل بیان می باشد. در این حالت مدل پیشنهادی محیط به صورت زیر است [21].

$$F_e = Ax^2 + Bx \quad (16)$$

در رابطه بالا F_e نیروی تماس، x موقعیت نوک ابزار تزریق در طول فرایند تزریق سلولی و A و B به ترتیب ضرایب عبارت درجه دو و عبارت خطی هستند. تابع هزینه J که باید مقدار آن را کمینه کرد، به صورت زیر تعیین می گردد [21] و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات² خطا [32] به روز می شود.

$$J = \int_0^t e^{-\lambda(t-r)} [y(r) - w(r)\hat{a}(t)]^2 dr \quad (17)$$

در این حالت $\hat{a} = [\hat{A} \ \hat{B}]^T$ و $y = F_e$ ، $w = [x^2 \ x]$ و $\hat{A}$ و $\hat{B}$ مقادیر تخمین زده از A و B می باشند. در این محاسبات، λ یک مقدار ثابت به نام فاکتور فراموشی³ است. قوانین به روزرسانی به صورت روابط زیر قابل محاسبه می باشد [21].

$$\hat{a}(t) = -p(t)w^T e(t) \quad (18)$$

که در رابطه بالا داریم:

$$e(t) = \hat{a}^T(t)w^T - y(t) \quad (19)$$

قانون به روزرسانی بهره نیز به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{d}{dt}[p] = -\lambda p - pw^T wp \quad (20)$$

$$p(0) = \begin{bmatrix} \kappa & 0 \\ 0 & \kappa \end{bmatrix} \quad (21)$$

در رابطه بالا مقادیر اولیه باتوجه به شرایط سیستم تعیین می گردد [21].

لحاظ نمی کنند [21]. نیروی اعمالی از تزریق کننده به سلول بایستی متغیر با زمان باشد، درحالی که در تحقیقات این نیرو را مقدار ثابتی فرض می کنند [15]. در طی فرایند تزریق، کنترل کننده موظف است تا نیروی مناسب و بدون نویز را به سلول اعمال کند [25].

سیستم تزریقی مورد استفاده در آزمایشگاه های پزشکی که از یک صفحه تزریق و یک نوک تزریق کننده تشکیل می شود، در "شکل 1" قابل مشاهده است [26]. ابزار تزریق یک دستگاه شبه رباتیکی است، که کار خاصی را به صورت مداوم انجام می دهد. این وسیله دارای نوک بسیار ظریفی است، که به سلول وارد می شود و ماده را به آرامی به سلول تزریق می کند. پس از اتمام عملیات تزریق، نوک تزریق کننده به آرامی از سلول خارج می شود و به مکان اولیه خود، برمی گردد. صفحه تزریق سلولی، جزو دیگر تشکیل دهنده این سیستم های تزریق است. این صفحه توسط موتور پله ای حرکت می کند. در این حالت بایستی سلول ها را روی صفحه دوار چید. روی صفحه شیارهای ریزی موجود است که بایستی سلول ها را در مکان شیار صفحه، جایگذاری نمود. سلول ها هنگامی که بر روی صفحه قرار گرفتند، از هر جهتی می توان به آن ها ماده شیمیایی را تزریق نمود. تاکنون کنترل کننده هایی که مطرح شده اند، به تغییر موقعیت و جهت این صفحه دوار می پردازند [19] که تغییر مکان و جهت صفحه یک عامل اساسی در آسیب یا مرگ سلول هاست.

فرایند تزریق سلولی در سه مرحله صورت می گیرد. در مرحله اول این فرایند، ابزار تزریق از موقعیت اولیه خود به سمت دیواره سلول حرکت می کند. در این قسمت تزریق کننده با دیواره سلولی برخورد می نماید. در مرحله دوم تزریق کننده بایستی از دیواره سلول به سمت مرکز سلول هدایت شود. در این حالت سرعت تزریق کننده بیشترین مقدار خود است، که این مرحله باعث پاره شدن جداره سلولی می شود تا ابزار تزریق بتواند ماده شیمیایی را به سلول وارد نماید. بنابراین باید افزایش سرعت به گونه ای باشد سلول آسیب نبیند یا از ترکیدن سلول و هر اتفاقی که منجر به مرگ سلول شود، جلوگیری شود. در مرحله بعد ماده شیمیایی به آرامی به سلول تزریق می شود و ابزار تزریق به آرامی مسیر بازگشت خود را طی می کند و از سلول خارج می شود [19].

در تزریق سلولی قبل از برخورد نوک تزریق کننده با سلول و پس از تمام شدن فرایند تزریق، فقط کنترل موقعیت انجام می شود و هیچ نیرویی از سوی تزریق کننده به محیط یا برعکس، اعمال نمی گردد. در هنگام تماس نوک تزریق کننده به سلول، کنترل موقعیت و کنترل نیرو به صورت همزمان انجام می شود. در این حالت کنترل کننده موظف است تا نیروی مناسب و بدون نویز به سلول اعمال شود تا سلول پس از تزریق زنده و سالم باقی بماند [27].

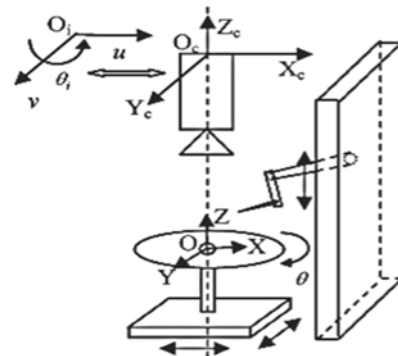


Fig. 1 Configuration of Cell Injection System

شکل 1 پیکربندی سیستم تزریق سلولی

¹ Cost Function

² Recursive Least Square

³ Forgetting Factor

4- کنترل امپدانس تطبیقی مقاوم با راهبرد ولتاژ

ترکیب روش‌های کنترلی مختلف با یکدیگر سبب افزایش کارایی و دقت سیستم کنترل می‌گردد. کنترل امپدانس توسط ارتباطی بین کنترل موقعیت و نیروی اعمالی از سوی بازوی ربات در راستاهای مختلف محقق می‌گردد [3]. کنترل امپدانس که توسط هوگان¹ [33] معرفی شد، بر مبنای کنترل گشتاور است. عیب‌های روش کنترل گشتاور این است که؛ فرمان کنترل گشتاور را نمی‌توان به صورت مستقیم، به ورودی‌های محرکه‌ها به منظور تحریک بازوی ربات اعمال نمود. ضعف دیگر این روش این است که؛ در روش کنترل گشتاور از معادلات دینامیکی ربات استفاده می‌شود، که چند ورودی-چند ورودی، غیرخطی و پیچیده هستند [34]. روش کنترل ولتاژ برای حل مشکلات و ضعف‌های روش گشتاور مطرح شد. این روش کنترلی به علت آزادی از دینامیک ربات و سلول تزریقی و ساختار ساده نسبت به روش کنترل گشتاور برتری دارد. در این روش جدید به جای استفاده از دینامیک پیچیده و چندمتغیره ربات، از مدل موتور برای طراحی کنترل‌کننده استفاده می‌شود [35].

اگرچه اهداف کنترلی به دلیل وجود نامعینی در مدل یا اندازه‌گیری در سیستم کنترل به خوبی محقق نمی‌گردد، اما کنترل مقاوم تلاشی برای حل این مشکل است [36]. همچنین یکی از چالش‌های اساسی کنترل مقاوم، حفظ پایداری² در حضور نامعینی‌هاست [37]. کنترل مقاوم بازوی ربات با راهبرد ولتاژ [38] و بهینه‌سازی توسط الگوریتم پرندگان³ [39] تا به حال تحت بررسی بوده و پایداری سیستم‌ها نیز ارزیابی شده است.

در این بخش به طراحی کنترل‌کننده تطبیقی مقاوم ربات اسکارا با راهبرد کنترل ولتاژ، به منظور سیستم تزریق سلولی پرداخته شد. این کنترل‌کننده در حضور اغتشاش خارجی و نامعینی‌ها [30] می‌باشد. تحلیل پایداری روش کنترلی پیشنهادی، نشان می‌دهد که سیستم پایدار است. نتایج شبیه‌سازی نیز، کارایی روش پیشنهادی را تأیید می‌کند. این طرح امپدانس بر مبنای مدل تونن⁴ [39] در روش مدار طراحی شده است.

رفتار دینامیکی مطلوب سیستم ربات نسبت به محیط به صورت امپدانس مطلوب در حوزه لاپلاس، به صورت زیر قابل بیان است [3].

$$F_{Ri}(s) - Z_{Ri}(s)v_i(s) = F_{ei}(s) \quad (22)$$

که در رابطه بالا $F_{Ri}(s)$ نیروی مطلوب و $Z_{Ri}(s)$ امپدانس مطلوب نام دارد. همچنین $v_i(s)$ که $v_i(s)$ نامین عنصر آن است، به صورت زیر می‌شود.

$$v(s) = sx(s) \quad (23)$$

مدار تونن مدل امپدانس رابطه (22) در "شکل 2"، قابل مشاهده است.

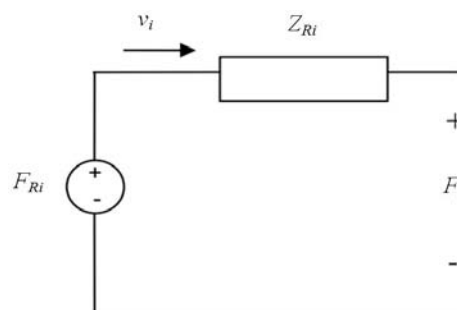


Fig. 2 The Desired Impedance

شکل 2 مدار امپدانس مطلوب

در مدار تونن "شکل 2"، منبع $F_{Ri}(s)$ منبع تونن و $Z_{Ri}(s)$ امپدانس تونن است. امپدانس مطلوب توسط رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$Z_{Ri}(s) = M_{Ri}s + B_{Ri} + \frac{K_{Ri}}{s} \quad (24)$$

در رابطه بالا M_{Ri} ، B_{Ri} و K_{Ri} به ترتیب ضریب اینرسی، اصطکاک و سختی مطلوب نام دارند. امپدانس مطلوب را به کمک روابط (22)، (23) و (24) به صورت زیر می‌توان بیان نمود:

$$F_{Ri}(s) - F_{ei}(s) = (M_{Ri}s^2 + B_{Ri}s + K_{Ri})x_i(s) \quad (25)$$

نیروی مطلوب $F_{Ri}(s)$ در کنترل امپدانس نقش مهمی دارد. پس رابطه زیر را تعریف می‌کنیم [3].

$$F_{Ri}(s) = Z_{Ri}(s)v_{di}(s) \quad (26)$$

در رابطه بالا $v_{di}(s)$ سرعت مطلوب نامیده می‌شود. به کمک روابط (22) و (24) در حوزه لاپلاس رابطه زیر برقرار است:

$$F_{Ri}(s) = (M_{Ri}s^2 + B_{Ri}s + K_{Ri})x_{di}(s) \quad (27)$$

انتقال رابطه بالا از حوزه لاپلاس به حوزه زمان به صورت زیر خواهد بود.

$$F_{Ri} = M_{Ri}\ddot{x}_{di} + B_{Ri}\dot{x}_{di} + K_{Ri}x_{di} \quad (28)$$

با استفاده از معادلات اسکالر برای $i = 1, \dots, n$ معادله ماتریسی به صورت زیر خواهد بود. بنابراین رابطه امپدانس طراحی شده برای نقطه انتهایی ربات، در حوزه زمان به صورت زیر قابل بیان می‌باشد.

$$F_R = M_R\ddot{x}_d + B_R\dot{x}_d + K_Rx_d \quad (29)$$

در رابطه بالا M_R ، B_R و K_R به ترتیب ضریب اینرسی، اصطکاک و سختی مطلوب نام دارند. مدل امپدانس مطلوب ربات درحالتی که $M_{Ri} = 0$ [3] منظور گردد، به کمک رابطه (25) به صورت زیر خواهد بود.

$$F_{Ri}(s) - F_{ei}(s) = (B_{Ri}s + K_{Ri})x_i(s) \quad (30)$$

رابطه بالا را در حوزه زمان پیوسته به صورت زیر می‌توان بیان نمود.

$$\dot{x}_i = -B_{Ri}^{-1}K_{Ri}x_i - B_{Ri}^{-1}F_{ei} + B_{Ri}^{-1}F_{Ri} \quad (31)$$

با استفاده از معادلات اسکالر برای $i = 1, \dots, n$ معادله ماتریسی رابطه بالا در زیر آورده شده است.

$$\dot{x} = -B_R^{-1}K_Rx - B_R^{-1}F_e + B_R^{-1}F_R \quad (32)$$

با جایگذاری رابطه (29) برای $M_R = 0$ در رابطه (32) رابطه نهایی به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{x} = \dot{x}_d + B_R^{-1}K_R(x_d - x) - B_R^{-1}F_e \quad (33)$$

قانون کنترل‌کننده امپدانس که بر مبنای قانون امپدانس مطرح شده در رابطه (29) بیان شده است، با جایگذاری رابطه (33) در رابطه (14) به صورت زیر می‌باشد. بر طبق این رابطه به کنترل امپدانس در بازوی ربات با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ موتورها پرداخته می‌شود.

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} J^{-1}(q) \left(\ddot{x}_d + B_R^{-1}K_R(x_d - x) - B_R^{-1}F_e \right) + \phi = u \quad (34)$$

قانون کنترل (34) به دلیل شناخته نبودن اغتشاش‌های خارجی ϕ و مشخص نبودن مقادیر دقیق آن، باشد. برای جبران نامعینی‌ها، قانون کنترل مقاوم زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$\hat{R}I_a + \hat{K}_b \hat{r}^{-1} \hat{J}^{-1}(q) (\dot{x}_d + B_R^{-1}K_R(x_d - x) - B_R^{-1}F_e + u_c) = u \quad (35)$$

که در آن $\hat{R}$ ، $\hat{K}_b$ ، $\hat{r}$ و $\hat{J}$ تخمینی از مقادیر R ، K_b ، r و J هستند. برای جبران نامعینی‌ها، مقدار u_c منظور شده است. معادله سیستم حلقه بسته با جایگذاری قانون کنترل (35) در سیستم (9) به صورت زیر خواهد بود:

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} \dot{q} + \phi = \hat{R}I_a + \hat{K}_b \hat{r}^{-1} \hat{J}^{-1}(q) (\dot{x}_d + B_R^{-1}K_R(x_d - x) - B_R^{-1}F_e + u_c) \quad (36)$$

رابطه بالا را پس از ساده‌سازی می‌توان به صورت زیر نوشت:

¹ Hogan

² Stability

³ PSO

⁴ Thevenin Model

نتایج زیر حاصل می‌گردد.

$$\alpha(t) = \int_0^t \lambda_\alpha \dot{q}^T E dt + \alpha(0) \quad (53)$$

$$\beta(t) = \int_0^t \lambda_\beta d^T E dt + \beta(0) \quad (54)$$

$$\gamma(t) = \int_0^t \lambda_\gamma I_a^T E dt + \gamma(0) \quad (55)$$

5- تحلیل پایداری

در این قسمت اثبات می‌شود که متغیرهای حالت محدود هستند. ابتدا فرض‌های زیر برای تحلیل پایداری [41] منظور می‌گردد.

فرض اول: مسیر مطلوب x_d در فضای کار، نرم طراحی شده است. به‌طوری‌که تمام مشتق‌های لازم مسیر مطلوب، موجود و همگی آن‌ها محدود باشند. یک شرط لازم به منظور طراحی کنترل مقاوم این است که اغتشاش خارجی، محدود باشد.

فرض دوم: اغتشاش خارجی ϕ در معادله (9) محدود است.

$$\|\phi(t)\| \leq \phi_{\max} \quad (56)$$

برای آن که نقطه تکین در فضای کار پیشنهادی نباشد، لازم است تا بعضی از قیدها در مقادیر مفاصل رعایت شود.

فرض سوم: نقاط تکین وجود ندارد، به معنای دیگر $\det J(q) \neq 0$.

به منظور محافظت موتورها از ولتاژ اضافه و سالم ماندن سلول تحت تزریق از عدم اعمال نیروی تزریقی زیاد، هر موتور الکتریکی به محدودکننده ولتاژ مجهز می‌گردد.

فرض چهارم: ولتاژ $|u_i| \leq u_{\max}$ که ولتاژ موتور نام می‌باشد و $u_{\max}$ حداکثر ولتاژ است.

در رابطه (29) با اعمال $M_{Ri} = 0$ [3] می‌توان نوشت:

$$B_R \dot{x}_d + K_R x_d = W \quad (57)$$

که در رابطه بالا W به صورت زیر توصیف می‌گردد.

$$W = B_R E + F_e + B_R \dot{x} + K_R x \quad (58)$$

در معادله (57) با توجه به فرض اول و این نکته که ماتریس‌های B_R و K_R قطری مثبت هستند، بنابراین رابطه (57) یک معادله مرتبه اول خطی با ورودی محدود است. در رابطه (58)، مقدار E بر طبق نتیجه 1 محدود است و نیروی اعمالی توسط سلول در نقطه تماس F_e ، نیز محدود است. پس این نتیجه حاصل می‌گردد که سیستم خطی (58)، به دلیل محدود بودن ورودی، برطبق قضیه راث-هرویتس محدود است.

نتیجه 2: متغیرهای α و $\dot{x}$ محدودند. ربات اسکارای مورد استفاده در این تحقیق، به علت محدود بودن فضای کار تزریق سلولی و نوع مفاصل ربات، دارای ماتریس $J(q)$ شامل توابع سینوسی و محدود است. محدود بودن نقطه انتهایی ربات، به محدود بودن متغیرهای مفاصل بازو منجر می‌گردد.

نتیجه 3: ماتریس ژاکوبین $J(q)$ محدود است. به کمک فرض 3 و نتیجه 3 می‌توان اظهار کرد:

نتیجه 4: ماتریس معکوس $J(q)$ ، به معنای دیگر ماتریس $J(q)^{-1}$ محدود است.

در رابطه (13) با استفاده از نتیجه 2 و نتیجه 4، می‌توان به نتیجه زیر دست یافت.

نتیجه 5: متغیر حالت $\dot{q}$ محدود است.

از طرفین رابطه (13) انتگرال‌گیری کرده و رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$q = \int_{x_0}^x J(q)^{-1} d\delta \quad (59)$$

$$-F_e + B_R(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_R(x_d - x) = -B_R \dot{x} - B_R u_c + B_R \hat{J}(q) \hat{r} \hat{K}_b^{-1} ((R - \hat{R}) I_a + L \dot{I}_a + K_b r^{-1} \dot{q} + \phi) \quad (37)$$

هم چنین رابطه بالا را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$B_R^{-1} (-F_e + B_R(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_R(x_d - x)) = \eta - u_c \quad (38)$$

که در این رابطه η مجموع نامعینی‌هاست، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta = \hat{J}(q) \hat{r} \hat{K}_b^{-1} ((R - \hat{R}) I_a + L \dot{I}_a + K_b r^{-1} \dot{q} + \phi) - J(q) \dot{q} \quad (39)$$

مجموع نامعینی‌ها که η نام دارد، محدود است.

$$\|\eta\| \leq \rho \quad (40)$$

حد بالای نامعینی‌ها را، به صورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\rho = \alpha_u \|\dot{q}\| + \beta_u + \gamma_u \|I_a\| \quad (41)$$

در رابطه بالا α_u ، β_u و γ_u حد بالای مقادیر زیر می‌باشند.

$$\begin{aligned} \|\hat{J}(q) \hat{r} \hat{K}_b^{-1} K_b r^{-1} - J(q)\| &\leq \alpha_u \\ \|\hat{J}(q) \hat{r} \hat{K}_b^{-1}\| \cdot \|L \dot{I}_a + \phi\| &\leq \beta_u \\ \|\hat{J}(q) \hat{r} \hat{K}_b^{-1} (R - \hat{R})\| &\leq \gamma_u \end{aligned} \quad (42)$$

نکته لازم برای قبولی معادله (42) این است که $\hat{J}(q)$ و $J(q)$ محدود هستند. همچنین $\hat{R}$ ، K ، $\hat{R}$ و R ماتریس‌های ثابت هستند. با استفاده از معادلات (38) تا (41) قانون کنترل را به صورت زیر پیشنهاد می‌کنیم.

$$u_c = \alpha(t) \dot{q} + \beta(t) d + \gamma(t) I_a \quad (43)$$

که در رابطه بالا $\alpha(t)$ ، $\beta(t)$ و $\gamma(t)$ پارامترهای طراحی کنترل‌کننده و $d \in \mathbb{R}^n$ بردار واحد است. حال برای آنکه کنترل امپدانس رابطه (29) فراهم گردد، بایستی ترم مقاوم u_c گونه‌ای طراحی شود که u_c به سمت η میل کند ($u_c \rightarrow \eta$). به منظور تحقق این هدف یک تابع اسکالر مثبت معین لیاپانوف $V(t)$ [40] به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

$$V(t) = 0.5 E^T E \quad (44)$$

که در رابطه بالا E به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$E = \eta - u_c \quad (45)$$

برای آن که u_c به سمت η میل کند ($u_c \rightarrow \eta$)، پارامترهای طراحی کنترل‌کننده باید به گونه‌ای به‌روز گردند تا $V(t) \rightarrow 0$. با جایگذاری رابطه (38) در رابطه (45)، نتیجه زیر حاصل می‌شود:

$$E = B_R^{-1} (-F_e + B_R(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_R(x_d - x)) \quad (46)$$

به کمک روابط (43)، (44) و (45) این نتیجه حاصل می‌گردد که $V(t)$ تابعی از پارامترهای طراحی کنترل $\alpha(t)$ ، $\beta(t)$ و $\gamma(t)$ و نامعینی η است. به کمک الگوریتم گرادیان نزولی برای رسیدن به $\dot{V}(t) < 0$ ، به منظور تحقق کاهش V و رسیدن به هدف $E \rightarrow 0$ ، نتایج زیر حاصل می‌گردد.

$$\dot{\alpha} = -\lambda_\alpha \frac{\partial V}{\partial \alpha} \quad (47)$$

$$\dot{\beta} = -\lambda_\beta \frac{\partial V}{\partial \beta} \quad (48)$$

$$\dot{\gamma} = -\lambda_\gamma \frac{\partial V}{\partial \gamma} \quad (49)$$

که در رابطه بالا λ_α ، λ_β و λ_γ ضرایبی مثبت هستند. استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی این نتیجه را می‌دهد که V کاهش پیدا می‌کند. بنابراین $\|E(0)\| \leq \|E\|$. حال به این نتیجه می‌توان رسید که:

نتیجه 1: E محدود است. با استفاده از روابط (43)، (44) و (45) می‌توان به نتایج زیر رسید.

$$\frac{\partial V}{\partial \alpha} = -\dot{q}^T E \quad (50)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \beta} = -d^T E \quad (51)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \gamma} = -I_a^T E \quad (52)$$

با جایگذاری رابطه (50) در (47)، رابطه (51) در (48) و رابطه (52) در (49)

جدول 1 پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات اسکارا

Table 1 The DH parameters of the SCARA robot

$\alpha_i(\text{rad})$	$a_i(\text{m})$	$d_i(\text{m})$	$\theta_i(\text{rad})$	Link
0	$a_1 = 0.621$	0	θ_1	1
Π	$a_2 = 1.064$	0	θ_2	2
0	0	d_3	0	3
0	0	$d_4 = 0.05$	θ_4	4

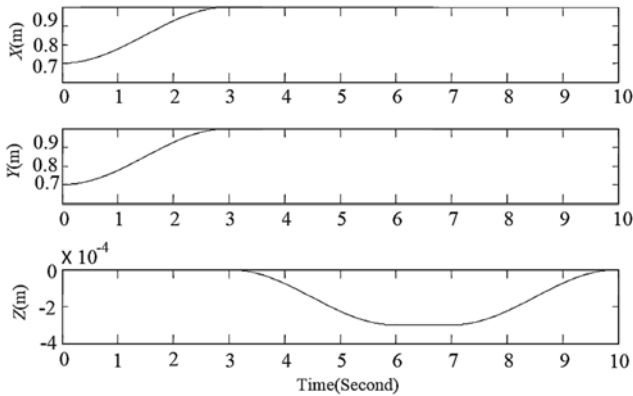


Fig. 4 The position desired trajectory in x, y, z axis

شکل 4 مسیر مطلوب موقعیت به ترتیب در راستای سه محور x و y و z

مسیر نرم و حداقل تا درجه دو مشتق پذیر را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$x_{d1} = \begin{cases} 0.85 - 0.15 \cos\left(\frac{\pi t}{3}\right) & 0 \leq t < 3 \\ 1 & 3 \leq t < 10 \end{cases}$$

$$x_{d2} = x_{d1}$$

$$x_{d3} = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 3 \\ 0.001(-0.15) \left(1 + \cos\left(\frac{\pi t}{3}\right)\right) & 3 \leq t < 6 \\ 0.001(-0.3) & 6 \leq t < 7 \\ 0.001(-0.15) \left(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{3}\right)\right) & 7 \leq t < 10 \end{cases} \quad (61)$$

ابتدا مسیر ردگیری مطلوب را به گونه ای برای ربات در نظر می گیریم که در قبل از زمان 4 ثانیه از موقعیت ابتدایی بر روی سلول قرار گرفته و از زمان 4 ثانیه فرایند تزریق سلولی آغاز شود. در محور x و y کنترل موقعیت و در محور z کنترل نیرو اعمال می گردد. به دلیل کوچک بودن قطر سلول که حدود 600 میکرومتر است [16]، جابجایی درمحور z متناسب سایز سلول تعیین می شود. در این شرایط مختصات نقطه برخورد ربات با محیط در زمان 4 ثانیه به صورت $x_e = [1 \quad 1 \quad -7.49 \times 10^{-5}]^T \text{m}$ قابل بیان است.

در این حالت ابتدا بازوی ربات را در یک نقطه اولیه به مختصات $x_0 = [0.7 \quad 0.7 \quad 0]^T \text{m}$ قرار می دهیم. این نقطه براساس موقعیت صفحه سلولی تعیین می گردد. مدل امپدانس ربات اسکارا طبق رابطه (29) با توجه به کاربرد ربات در سیستم تزریق سلولی $M_{Ri} = 0$ است. ضرایب $B_{Ri} = 31 \text{ Ns/m}$ و $K_{Ri} = 10000 \text{ N/m}$ برای $i = 1, 2, 3$ لحاظ می شود.

مدل سازی محیط به کمک رابطه (16) به صورت معادله چندجمله ای درجه دو دارای دقت مناسبی است، اما اگر مدل غیرخطی آن تغییر یابد، نتایج حاصل از آن به مدل واقعی نزدیک تر است [16]. با بررسی مدل محیط [21] که در نتایج آزمایشگاهی به رفتار واقعی سلول تحت تزریق نزدیک است، در این مقاله مدل پیشنهادی محیط را به کمک معادله غیرخطی زیر مطرح می کنیم.

$$F_e = Ax_3^2 + Bx_3 + C \sin(x_3) \quad (62)$$

در این حالت تابع هزینه همان رابطه (17) است و $w = [x^2 \quad x \quad \sin(x)]$ و $\hat{a} = [\hat{A} \quad \hat{B} \quad \hat{C}]^T$ و $\hat{y} = F_e$ و $\hat{C}$ و $\hat{B}$ و $\hat{A}$ مقادیر تخمینی C و B و A هستند.

نتیجه 6: متغیر حالت q محدود است.

با استفاده از رابطه (4) و محدود بودن $\dot{q}$ و $J(q)^{-1}$ به ترتیب در نتایج 2، 5 و 4 و به دلیل مشتق پذیر بودن $J(q)$ نتیجه زیر حاصل می شود.

نتیجه 7: متغیر حالت $\ddot{q}$ محدود است.

در رابطه (1) با استفاده از محدود بودن q ، $\dot{q}$ ، $\ddot{q}$ و F_e می توان به نتیجه زیر دست یافت.

نتیجه 8: بردار گشتاور مفاصل ربات τ_r محدود است.

با استفاده از ویژگی های دینامیک ربات و محدود بودن متغیر q نتیجه می دهد، ماتریس $D(q)$ و $g(q)$ محدود است. همچنین محدود بودن $\dot{q}$ نیز منجر به محدود بودن $C(q, \dot{q})$ می شود.

در معادله (7) بردارهای $\ddot{q}$ و τ_r محدودند و ماتریس های J_m ، B_m و r ثابتند. بنابراین داریم:

نتیجه 9: بردار گشتاور موتور τ_m محدود است.

از معادله (10) می توان این رابطه را به صورت زیر نوشت:

$$I_a = K_m^{-1} \tau_m \quad (60)$$

در رابطه بالا K_m ماتریس ثابت و باتوجه به نتیجه 9، τ_m محدود است. حال نتیجه زیر بدست می آید.

نتیجه 10: بردار جریان موتور I_a محدود است.

تمام متغیرهای حالت q ، $\dot{q}$ و I_a محدودند، بنابراین سیستم ربات پایدار است.

6- نتایج شبیه سازی

در این قسمت به شبیه سازی قانون کنترل امپدانس ولتاژ (35) برای بازوی چهار رباطی ربات اسکارا که در "شکل 3" آورده شده است [3]، می پردازیم. در این سیستم تزریق سلولی، مفصل لولایی چهارم در زاویه مناسب برای تزریق توسط نوک تزریق کننده ثابت می شود. هر رابط به وسیله یک موتور DC مغناطیس دائم تحریک می شود. این شبیه سازی با طول گام 0.001 در مدت زمان 10 ثانیه انجام شده است.

پارامترهای متغیر و ثابت ربات در "شکل 3" مشخص شده اند. با توجه به دستگاه های مختصات تعیین شده، جدول 1 شامل پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات می باشد [3]. مدل دینامیکی ربات اسکارا و پارامترهای موتورها [3] اطلاعات لازم دیگر برای شبیه سازی هستند و مدل ربات توسط رابطه (5) به دست می آید.

با توجه به کاربرد ربات اسکارا در این مقاله، مسیر مطلوب موقعیت که $x_d = [x_{d1} \quad x_{d2} \quad x_{d3}]^T$ نام دارد، در "شکل 4" قابل مشاهده است. این

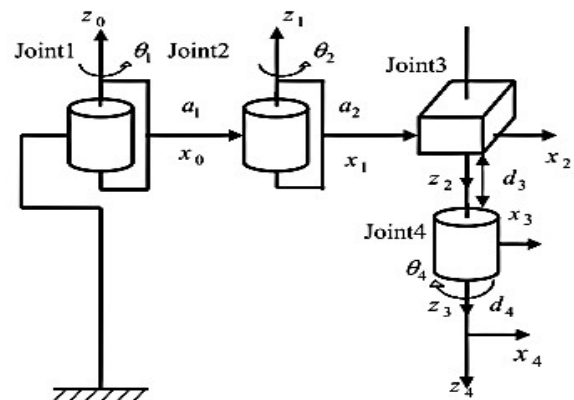


Fig. 3 Symbolic representation of the SCARA robot

شکل 3 دیاگرام مفصلی بازوی ربات اسکارا

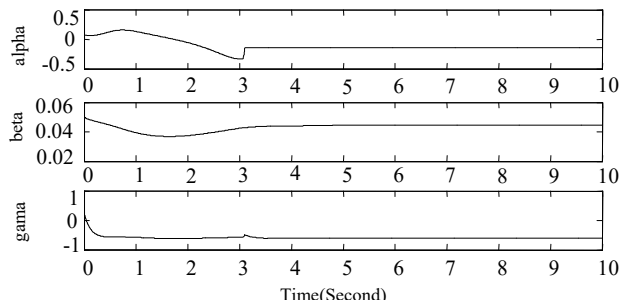


Fig. 7 The controller parameters tuning

شکل 7 تنظیم پارامترهای طراحی کنترل کننده

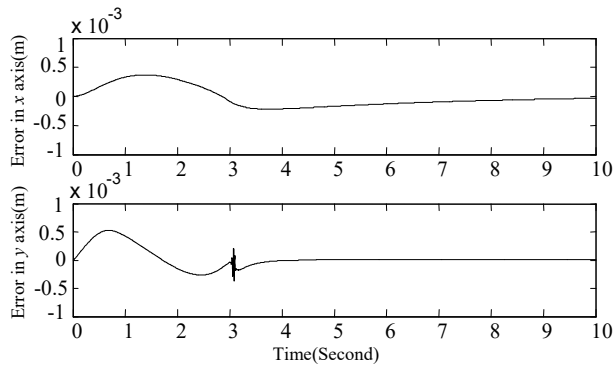


Fig. 8 Position tracking performance in x, y axis in the presence of uncertainties

شکل 8 خطای ردگیری موقعیت در محور x و y در حضور عدم قطعیت‌ها

می‌شود. مدت زمان تزریق، بین 4 تا 6 ثانیه است. این نیرو متناسب با زمان به طور آهسته افزایش می‌یابد، تا وارد سلول شود و سلول سالم و زنده باقی بماند. پس از آن ماده شیمیایی توسط ابزار تزریق در زمان 6 تا 7 ثانیه به سلول وارد می‌گردد. سپس ربات مسیر بازگشت به نقطه اولیه خود را طی می‌کند. نیروی وارده از سوی محیط به ربات در "شکل 9" آورده شده است.

در حالت کنترل امیدانس، نیروی F_R که ربات در نقطه تماس به محیط وارد می‌کند، به عنوان نیروی مطلوب شناخته می‌شود. هدف این است که؛ با توجه به مدل پیشنهادی امیدانس ربات و محیط، نیروی F_e تا حد امکان به نیروی مطلوب ربات نزدیک باشد. بر طبق مطالعاتی که در زمینه تزریق سلولی انجام شده، حداکثر خطای این طرح پیشنهادی کمتر از 7×10^{-7} نیوتون است، که مقدار مطلوبی می‌باشد. خطای نیروی اعمالی در محور z در "شکل 10" قابل مشاهده است.

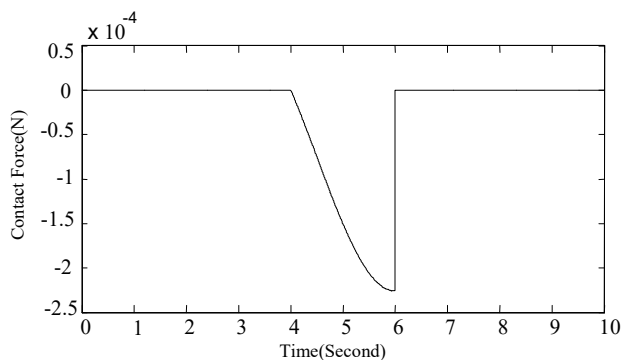


Fig. 9 Contact Force

شکل 9 نیروی اعمالی در نقطه برخورد

فاکتور فراموشی $\lambda = 0.9$ در نظر گرفته شد. قانون به روزرسانی پارامترها بر طبق رابطه (18)، (19) و (20) لحاظ می‌شود. به دلیل شروع فرایند تزریق از لحظه 4 به بعد، تخمین پارامترها هم از این لحظه به روز می‌شود. تخمین پارامترهای مدل محیط در "شکل 5" نمایش داده شده است. همان گونه که در شکل قابل مشاهده است، از لحظه 4 ثانیه به بعد در حدود نیم ثانیه این پارامترها تخمین زده می‌شوند.

به دلیل برخورد ربات با محیط، در نقطه تماس نوسان کمی ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه ابعاد سلول در حد میکرون است، استفاده از یک تابع سینوسی باعث کاهش خطای نیرو و نزدیک تر شدن مدل پیشنهادی به مدل واقعی می‌گردد. کارایی مدل محیط پیشنهادی در کاهش خطای نیروی وارده از سوی ربات به محیط، در "شکل 6" قابل مشاهده است. میزان خطای نیرو در قبل از زمان 4 ثانیه و بعد از زمان 6 ثانیه، در هر دو نمودار صفر است. در این قسمت طراحی، کنترل کننده با استفاده از روش مقاوم در حضور نامعینی‌های احتمالی موجود در رابطه (35) بیان شده است. پارامترهای نامعینی $\hat{K}_b$ ، $\hat{K}_v$ ، $\hat{K}_p$ هر یک به اندازه 90٪ مقدار واقعی خودشان فرض شده‌اند. همچنین نرخ همگرایی‌ها به ترتیب $\lambda_a = 100$ ، $\lambda_b = 100$ و $\lambda_v = 100$ منظور می‌گردند. پارامترهای طراحی کنترل کننده $\alpha(t)$ ، $\beta(t)$ و $\gamma(t)$ بر طبق روابط (53)، (54) و (55) مطابق با "شکل 7"، تنظیم می‌شوند.

با توجه به کاربرد اسکارا در تزریق سلولی، با استفاده از کنترل کننده تطبیقی مقاوم در محور x و y کنترل موقعیت داریم. همان طور که در "شکل 8" مشاهده می‌شود، ردگیری موقعیت به خوبی محقق شده است و خطای موقعیت در این دو محور حداکثر 5×10^{-4} تا 3.8×10^{-4} می‌باشد. ربات اسکارا در تزریق سلولی، قبل از برخورد هیچ نیرویی به محیط اعمال نمی‌کند. پس از برخورد، نیروی F_e از سوی محیط به ربات وارد

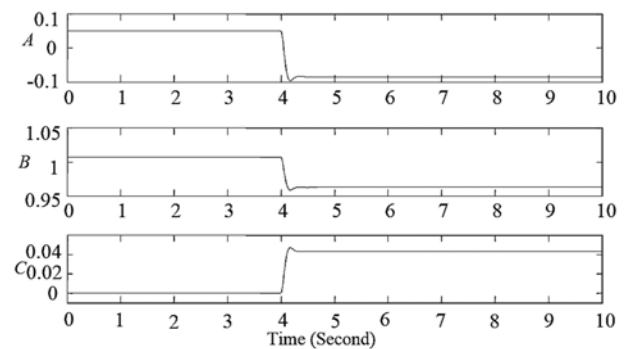


Fig. 5 The parameters estimation of A, B, C

شکل 5 تخمین پارامترهای A ، B و C

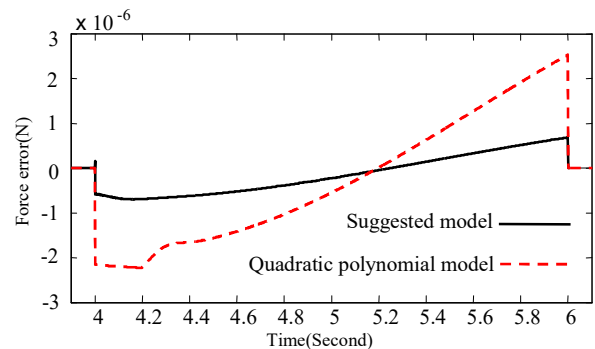


Fig. 6 Force error decrease in suggested environment model

شکل 6 کاهش خطای نیرو در مدل محیط پیشنهادی

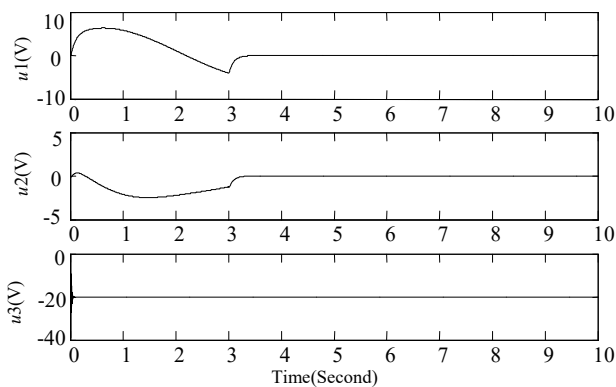


Fig. 12 Control efforts

شکل 12 ولتاژ موتورها

7- نتیجه گیری

امروزه اکثر ابزارهای تزریقی در صنعت پزشکی مورد آزمایش هستند، بسیار ساده‌اند و قابلیت کنترل ندارند. این تجهیزات پزشکی، از یک نوک تزریق‌کننده بدون سیستم کنترلی و یک صفحه سلولی که قابلیت تغییر موقعیت و زاویه را دارد، تشکیل شده است. کنترل‌کننده در این سیستم‌ها به تنظیم ارتفاع، جهت و موقعیت صفحه دوار سلولی می‌پردازد. به دلیل حساسیت و ظرافت بالای سلول، جابجایی صفحه سلولی یک عامل اساسی در آسیب و مرگ سلول‌هاست.

طرح پیشنهادی این مقاله استفاده از ربات پرکاربرد اسکارا، در صنعت تزریق سلولی می‌باشد. در این حالت صفحه سلولی، ثابت شده و حرکتی ندارد. از ربات اسکارا نیز به عنوان ابزار تزریق استفاده شده است. در این مدل امکان دستیابی به هر موقعیت مطلوب و اعمال نیروی متغیر با زمان متناسب با سلول و بدون نویز فراهم می‌گردد. بنابراین تزریق به سلول‌ها آسان‌تر، دقیق‌تر و با نرخ کمتر مرگ سلول‌ها انجام می‌شود. روش کنترل ارائه شده مستقل از دینامیک ربات و دینامیک سلول تحت تزریق است و نسبت به روش کنترل گشتاور ساده‌تر، با محاسبات کمتر، مقاوم‌تر و موثرتر می‌باشد.

در سیستم پیشنهادی این مقاله، به طراحی کنترل‌کننده با توانایی کنترل موقعیت و کنترل نیرو به طور همزمان در راستاهای مختلف پرداخته شده است. تاکنون طراحان سیستم‌های کنترلی تزریق سلولی، معمولاً از راهبرد کنترل گشتاور استفاده می‌کردند. عیب روش کنترل گشتاور این است که نمی‌توان به صورت مستقیم، فرمان کنترلی را به ورودی‌های محرکه‌ها برای تحریک بازوی ربات اعمال نمود. روش کنترل ولتاژ به علت آزادی از دینامیک ربات و دینامیک سلول تحت تزریق بر این مشکل غلبه می‌کند و برای هر سلول تحت تزریق و هر بازوی ربات با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌ها، جوابگوست. به همین علت، در این مقاله کنترل امیدانسن در حوزه کنترل ولتاژ مورد بررسی قرار گرفت.

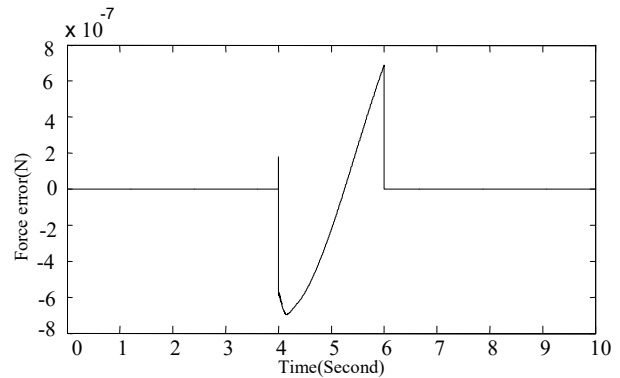


Fig. 10 Contact Force error in the presence of uncertainties

شکل 10 خطای نیروی اعمالی در نقطه تماس در حضور نامعینی‌ها

عملکرد کنترل‌کننده تطبیقی بر پایه ولتاژ در حالتی که از نامعینی‌ها چشم‌پوشی شود، نشان می‌دهد که خطای نیرو به دلیل عدم حضور نامعینی‌ها کاهش می‌یابد. در "شکل 11" کاهش خطای نیروی اعمالی از سوی ربات به سلول تحت تزریق در نقطه تماس به خوبی قابل مشاهده می‌باشد.

ولتاژ موتورها در مقدارهای اسمی رفتار بسیار مطلوبی دارند. موتور 3 دارای ولتاژ 20- ولت برای اعمال به نقطه برخورد است. در حالی که موتور 1 و 2 در زمان شروع فرآیند تزریق تقریباً ولتاژی ندارند، زیرا باری بر روی مفاصل آنها نیست. نمودار ولتاژ موتورها در "شکل 12" قابل مشاهده است. همچنین اطلاعات بیشتر پیرامون مشخصه‌های دینامیکی ربات اسکارا، در جدول 2 قابل مشاهده می‌باشد [42].

به منظور بررسی عملکرد کنترل امیدانسن در ردگیری موقعیت مطلوب با طراحی کنترل‌کننده تطبیقی مقاوم، در "شکل 13" به بررسی خطا در دو روش کنترل بر پایه ولتاژ و کنترل تطبیقی مقاوم بر پایه ولتاژ پرداخته شد. در هر دو حالت بررسی شده روش کنترلی در حضور نامعینی‌ها می‌باشد.

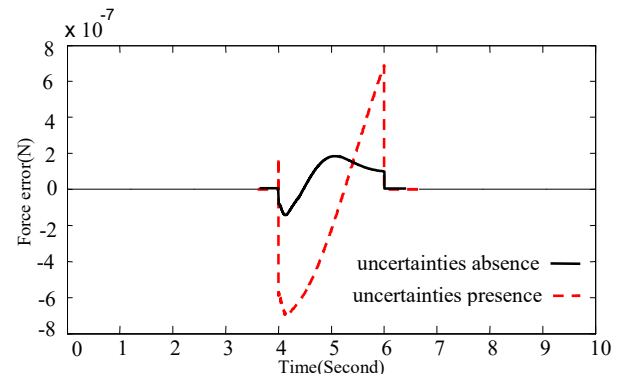


Fig. 11 Contact Force error with Robust Adaptive Control in the presence and absence of uncertainties

شکل 11 مقایسه خطای نیرو با کنترل تطبیقی مقاوم در حضور و عدم حضور نامعینی‌ها

جدول 2 پارامترهای دینامیکی بازوی ربات اسکارا

Table 2 Parameters of the SCARA robot

$I_{Jz}(\text{kg m}^2)$	$I_{Jx}(\text{kg m}^2)$	$I_{Jy}(\text{kg m}^2)$	$I_{Jz}(\text{kg m}^2)$	$I_{Jy}(\text{kg m}^2)$	$I_{Jx}(\text{kg m}^2)$	$m_i(\text{kg})$	$z_i(\text{m})$	$y_i(\text{m})$	$x_i(\text{m})$	i
0.0001	-0.002	0.026	7.60	7.31	1.62	25.23	-0.144	-0.0014	-0.308	1
-0.001	2.099	0.013	21.68	22.64	3.74	15.81	-0.195	0.0011	-0.673	2
0	-0.0004	0	0.040	1.63	1.63	6.61	-0.540	0	0	3
0	0	0	0.0004	0.0003	0.0003	0.106	-0.025	0	0	4

روش فازی در مقابله با سیستم‌های غیرخطی و همراه با نامعینی، همانند سیستم تزریق سلولی رباتیکی، از این روش استفاده شود. هم‌چنین با توجه به نیاز و پیشرفت کشور در زمینه تزریق سلولی، تاکنون کنترل امپدانس ربات در زمینه تزریق سلولی با استفاده از سیستم عصبی مورد بررسی قرار نگرفته است. پیشنهاد می‌شود از این روش استفاده شود و کارایی و پایداری آن مورد بررسی قرار گیرد.

8- مراجع

- [1] M. Spong, M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, Second Edition, pp. 9-83, New York: Wiley, 2004.
- [2] J. Salisbury, Active Stiffness control of a manipulator in cartesian coordinator, 19th *IEEE Conference of decision and control*, Albuquerque, USA, December 10-12, 1980.
- [3] M. M. Fateh, R. Babaghasabha, Impedance control of robots using voltage control strategy, *Nonlinear Dynamic*, Vol. 74, No. 1, pp. 277-286, 2013.
- [4] M. Raibert, J. Crige, Hybrid position/Force control of manipulator, *ASME Journal of Dynamic system, measurement and control*, Vol. 103, No. 2, pp 407-410, 1981.
- [5] W. Khalil, E. Dombre, *Modeling, Identification and control of Robots*, first Edition, pp. 377-393, New York: Taylor & Francis books, 2004.
- [6] J. Seul, T. Hsia, R. Bonits, Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment, *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 474-483, 2004.
- [7] M. Shibata, T. Murakami, K. Ohnashi, A unified approach to position and force control by fuzzy logic, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 1, pp. 81-87, 2002.
- [8] L. Huang, S. Gee, T. Lee, An adaptive impedance control scheme for constrained robots, *Department Of Electric and communication Singapore poly technique and Department Of Engineering National UN*, Singapore, Asian Control Conference, Shanghai, 2000.
- [9] L. Huang, S. S. Ge, Fuzzy unidirectional force control of constrained robotic manipulators, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 134, No. 1, pp. 135-146, 2002.
- [10] D. Jeon, M. Tomizuka, Learning hybrid force and position control of robot manipulator, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 4, pp. 423-431, 1993.
- [11] A. Lopes, F. Almeida, A force-impedance controlled industrial robot using an active robotic auxiliary device, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 24, No. 3, pp. 299-309, 2008.
- [12] R. Z. Stanisic, A. V. Fernandez, Adjusting the parameters of the mechanical impedance for velocity, impact and force control, *Journal of Robotica*, Vol. 30, No. 4, pp. 583-597, 2012.
- [13] S. Kizir, Z. Bingul, Fuzzy impedance and force control of a steward platform, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, Vol. 22, No. 4, pp. 924-939, 2014.
- [14] D. Surdilovic, Z. Cojbasic, Robust robot compliant motion control using intelligent adaptive impedance approach, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Michigan, vol. 3, pp. 2128-2133, 1999.
- [15] W. Xu, C. Cai, Time-varying force tracking in impedance control: A case study for automatic cell manipulation, in *IEEE International Conference on Control and Automation*, China, pp. 1024-1029, 2013.
- [16] W. Hanmei, X. Wenkang, Adaptive impedance control in robotic cell injection system, in *the 17th IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems*, Canada, pp. 268-275, 2012.
- [17] J. C. Lacal, R. Perona, J. Feramisco, *Microinjection*, first Edition, pp. 12-79, Berlin: Birkhauser, 1999.
- [18] H. B. Huang, D. Sun, Visual-based impedance force control of three-dimensional cell injection system, *IEEE International Conference of Robotics and Automation*, Italy, pp. 4196-4201, 2007.
- [19] H. Huang, D. Sun, Robotic cell injection system with position and force control: toward automatic batch bio manipulation, *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 25, No. 3, pp. 727-737, 2009.
- [20] W. Spong, S. Hutchinson, *Robot Modeling and Control*, pp. 187-224, New York: John Wiley & Sons, 2006.

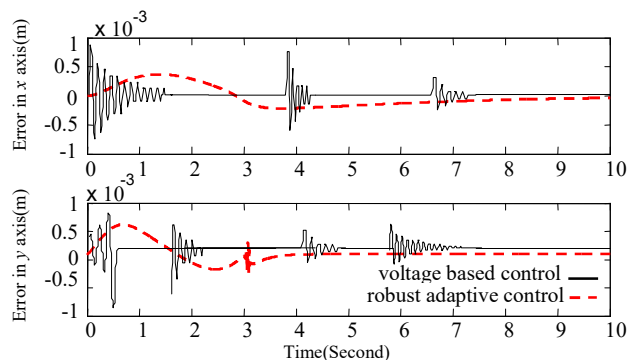


Fig. 13 Position tracking error in x , y axis for two control methods in the presence of uncertainties

شکل 13 خطای ردگیری موقعیت در محور x و y برای دو روش کنترلی در حضور نامعینی‌ها

در این طرح پیشنهادی، مدل امپدانس ربات بر اساس روش تون و مدل امپدانس محیط هم بر طبق آخرین تحقیقات به صورت یک مدل غیرخطی پیشنهادی که دقیق و نزدیک به واقعیت رفتار سلول تحت تزریق است، ارائه گردید. استفاده از مدل امپدانس تا لحظه قبل از برخورد ربات با محیط، کنترل موقعیت را به خوبی محقق می‌سازد. پس از برخورد ربات با محیط علاوه بر کنترل موقعیت در راستای اول و دوم، این کنترل‌کننده وظیفه کنترل نیرو در راستای سوم را نیز به عهده دارد.

وجود مسئله نامعینی، دینامیک مدل نشده و عامل اغتشاشات خارجی یکی از بحث‌های چالش‌انگیز در کنترل ربات‌هاست. طراحان سیستم‌های کنترلی ربات، همیشه به مقابله با اثرات این عوامل می‌پردازند. با توجه به این موارد، در این مقاله به ارائه یک روش کنترل تطبیقی مقاوم بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ پرداخته شد.

در طرح پیشنهادی این مقاله پارامترهای مدل محیط توسط مدل غیرخطی پیشنهادی، تخمین زده می‌شود و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا، بهینه می‌گردد. ضرایب امپدانس محیط با توجه به قانون تطبیقی پیشنهادی در هر لحظه به روز می‌شوند، تا بتوانند نتایج مطلوب‌تری را محاسبه کنند. تحلیل پایداری روش کنترلی پیشنهادی، نشان می‌دهد که سیستم ربات پایدار است. در این روش کنترلی، نیروی اعمالی از سوی ربات به سلول‌ها مقداری مطلوب و درست است، که سلول‌ها پس از تزریق، زنده و سالم باقی می‌مانند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز، عملکرد مناسب این روش پیشنهادی در مقابل نامعینی‌ها و کارایی مطلوب طرح رباتیکی شدن سیستم تزریق سلولی را نشان می‌دهد.

خطای موجود در روش کنترل بر مبنای ولتاژ در ردگیری موقعیت مطلوب در راستای محور x و y در قیاس با روش کنترل بر مبنای گشتاور از $2 \times 10^{-3} \text{ m}$ به $5 \times 10^{-4} \text{ m}$ کاهش می‌یابد. با این وجود نتایج نشان می‌دهد که نامعینی‌ها موجود در مدل می‌تواند کارایی روش کنترل ولتاژ را دچار چالش کند. حضور نامعینی‌ها سبب می‌گردد که خطای ردگیری نیروی مطلوب اعمالی از سوی ربات به سلول تحت تزریق حدود 10٪ افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که کنترل تطبیقی مقاوم پیشنهادی بر نامعینی‌ها به خوبی غلبه می‌کند. خطای موجود در روش کنترل تطبیقی مقاوم پیشنهادی بر مبنای ولتاژ در ردگیری نیروی مطلوب در مقایسه با روش رایج کنترل بر مبنای ولتاژ در حضور نامعینی‌ها از $8 \times 10^{-7} \text{ N}$ به کمتر از $2 \times 10^{-7} \text{ N}$ رسیده است. در ادامه روند پیشنهاد می‌شود به دلیل توانایی

- [32] L. Guo, I. Ljung, Performance analysis of the forgetting factor RLS algorithm, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 7, No. 6, pp. 525-537, 1993.
- [33] N. Hogan, *Impedance Control: An Approach to Manipulation*, Second Edition, pp. 10-54, New York: McGraw-Hill, 1985.
- [34] M. M. Fateh, On the voltage-based control of robot manipulators, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 6, No. 5, pp. 702-712, 2008.
- [35] M. M. Fateh, S. Khorashadizadeh, Optimal robust voltage control of electrically driven robot manipulators, *Nonlinear Dynamic*, Vol. 70, No. 2, pp. 1445-1458, 2012.
- [36] S. Kim, J. Ryu, Adaptive energy-bounding approach for robustly stable interaction control of impedance-controlled industrial robot with uncertain environments, *IEEE Transaction on Mechatronics*, Vol. 19, No. 4, pp. 1195-1205, 2014.
- [37] C. C. Cheah, S. Kawamura, Stability of hybrid position and force control for robotic manipulator with kinematics and dynamics uncertainties, *Journal of Automatica*, Vol. 39, No. 5, pp. 847-855, 2003.
- [38] M. M. Fateh, Robust control of flexible-joint robots using voltage control strategy, *Nonlinear Dynamic*, Vol. 67, No.2, pp. 1525-1537, 2012.
- [39] V. Mittle, A. Mittal, *Basic Electrical Engineering*, Second Edition, pp. 20-41, New Dehli: Taha McGraw-Hill, 2006.
- [40] M. Molapanah, A. Sedaghati, Stability analysis of a robust nonlinear controller for flexible joint robot, *International Journal of Engineering Sciences and Management*, Vol. 20, No. 2, pp. 30-39, 2014.
- [41] T. Wen, S. Murphy, Stability analysis of position and force control for robot arms, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 36, No. 3, pp. 365-370, 1991.
- [42] Z. Ghassemi Zahan, *Optimal force-impedance control of robot manipulator using voltage control strategy*, M.S.C. Thesis, Faculty of Electrical and Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, 2015 (in Persian فارسی).
- [21] Y. Xie, D. Sun, A force control based cell injection approach in a bio-robotics system, *IEEE international Conference on Robotics and Automation*, Japan, pp. 3443- 3448, 2009.
- [22] Y. Xie, D. Sun, An adaptive impedance force control approach for robotic cell microinjection, *IEEE international conference on Intelligent Robots and Systems*, France, pp. 907-912, 2008.
- [23] Y. Tan, D. Sun, Mechanical modeling of biological cells in microinjection, *IEEE Transaction on Nano Bioscience*, Vol. 7, No. 4, pp. 257-266, 2008.
- [24] H. Huang, D. Sun, Integrated vision and force control in suspended cell injection system: Towards automatic batch bio manipulation, *IEEE International Conference of Robotics and Automation*, Japan, pp. 3413-3419, 2008.
- [25] H. B. Huang, *Toward automatic batch bio manipulation: study on robotic suspended cell injection*, PhD. Thesis, City University of Hong Kong, Department of Manufacturing Engineering and Engineering Management, 2008.
- [26] G. Y. Li, N. Xi, Calibration of a micromanipulation system, *International Conference Intelligence Robots and System*, Canada, pp. 1742-1747, 2002.
- [27] W. Hanmei, X. Wenkang, Adaptive impedance control in robotic cell injection system, *IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems*, Italy, pp. 268-275, 2012.
- [28] Y. Xie, D. Sun, Mechanical modeling of biological cells in microinjection, *IEEE Transaction on Nano Bioscience*, Vol. 7, No. 4, pp. 257-266, 2008.
- [29] R. Lee, J. Kimm, *Cell injury: Mechanism, Responses and Therapeutics*, pp. 56-312, New York: Wiley-Blackwell Academy of Sciences, 2008.
- [30] S. Jung, T. C. Hsia, Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment, *IEEE Transaction on Control System Technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 474-483, 2004.
- [31] Y. Sun, K. T. Wan, Mechanical property characterization of mouse zona pellucid, *IEEE Transaction on Nano Bioscience*, Vol. 2, No. 4, pp. 279-286, 2003.