بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه مهندسی رباتیک

کنترل نیرو- امپدانس بهینه در بازوی ربات با راهبرد کنترل ولتاژ

زینب قاسمی زهان

استاد راهنما :

دکتر علی اکبرزاده کلات

استاد مشاور:

دکتر محمدمهدی فاتح

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۳

تقدیم به

خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و به کسانی که عشقشان را در وجودم دمید.

به پدرم، اسوه صبر و همت

به مادرم، اسوه مهربانی و گذشت

و به همسرم، همراه روزهای سبز و زرد زندگی.

تشکر و قدردانی

نخستین سپاس به پیشگاه خالق یکتا

و با سپاس و قدردانی از خانواده عزیزم که همواره در راه کسب علم و دانش همراه من بودند و با تشکر فراوان از استاد ارجمند جناب آقای دکتر علی اکبرزاده کلات که در تمام طول این پژوهش با دقت و حوصله زیاد، ژرف‌نگری و شکیبایی راهنمایی‌ام فرمودند و در بسیاری از امور همواره من را از تجربه خود آگاه می‌نمودند و نیز با سپاس‌گزاری از استاد گرامی جناب آقای دکتر محمدمهدی فاتح که اطلاعات و راهنمایی‌های خود را از من دریغ نکردند و همچنین قدردانی می‌کنم از تمام کسانی که در این راستا یاری‌ام نمودند.

زینب قاسمی زهان

تعهد نامه

اینجانب: زینب قاسمی زهان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته: مهندسی رباتیک/کنترل ربات دانشکده: مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه: کنترل نیرو- امپدانس بهینه در بازوی ربات با راهبرد کنترل ولتاژ تحت راهنمائی: جناب آقای دکتر علی اکبرزاده کلات متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

❋ متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

در این پایان‌نامه به طراحی کنترل‌کننده نیرو- امپدانس بهینه در بازوی ربات اسکارا به منظور تزریق سلولی با راهبرد کنترل ولتاژ پرداخته شده است. در سیستم تزریق سلولی، تزریق‌کننده توسط سوزن ظریفی ماده را به سلول‌ها وارد می‌کند. طرح پیشنهادی این پایان‌نامه جایگزینی ربات اسکارا با ابزار تزریق می‌باشد، که توانایی ردگیری موقعیت مطلوب و اعمال نیروی متغیر با زمان را دارد. در تحقیقات اخیر، کنترل به صفحه دوّار سلولی اعمال گشته و سلول در معرض آسیب قرار می‌گیرد. در روش ارائه شده در این پایان‌نامه، به منظور افزایش میزان موفقیت، سیستم با صفحه ثابت بوده و ربات کنترل می‌شود. این رساله مدل امپدانس ربات را بر اساس روش تونن بیان می‌کند و پارامترهای مدل محیط توسط مدل غیرخطی پیشنهادی، تخمین زده می‌شود و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا بهینه می‌گردد. در تمامی مطالعات اخیر سیستم‌های تزریق سلولی، کنترل امپدانس بر مبنای روش کنترل گشتاور بوده و در این رساله، کنترل امپدانس در حوزه کنترل ولتاژ اعمال می‌گردد. با توجه به مدل غیرخطی و چند متغیره ربات، روش‌های کنترل مقاوم و تطبیقی برای غلبه بر نامعینی‌ها پیشنهاد می‌شوند و طراحی کنترل‌کننده‌های فازی، به دلیل آزاد بودن از مدل ربات کارآمد می‌باشند. در روش پیشنهادی، تحلیل پایداری سیستم کنترل ارائه می‌گردد. به منظور حل مسئله چگونگی انتخاب ضرایب مدل امپدانس برای اعمال نیروی بهینه به سلول مورد آزمایش، یک سیستم فازی به همراه سیستم تطبیقی طراحی شده است. این سیستم‌ها به طور لحظه‌ای به تنظیم پارامترهای امپدانس مدل ربات و مدل محیط می‌پردازند. نتایج شبیه‌سازی، کارایی مطلوب روش پیشنهادی را به خوبی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: کنترل امپدانس، راهبرد کنترل ولتاژ، ربات تزریق سلولی، سیستم فازی، تخمین پارامترها

مقالات مستخرج از پایان‌نامه

۱ -قاسمی زهان ز.، اکبرزاده کلات ع.، فاتح م.، (۱۳۹۳)، "کنترل نیرو- امپدانس بهینه بازوی ربات اسکارا با راهبرد کنترل ولتاژ به منظور تزریق سلولی"، کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران، گرگان.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل‌ها

عنوان | صفحه

فهرست جدول‌ها

فصل ۱: مقدمه

رسول اکرم (ص) فرموده‌اند: اطاعت از فرمان الهی و پرستش ذات اقدس او بر اثر علم است. خیر دنیا و آخرت در پرتو علم بدست می‌آید و شر دنیا و آخرت، از جهل و نادانی دامن‌گیر انسان می‌شود.
بحار الانوار، جلد ۱، صفحه ٦٤

۱-۱ آشنایی با سیستم تزریق سلولی

تزریق سلولی[1] رباتیکی روشی است که برای تجهیزات خودکار[2] به کار گرفته می‌شود تا ماده مورد نظر را به سلول زنده مورد آزمایش، تزریق کند. اکثر روش‌های موجود برای تزریق سلولی مبتنی بر کنترل موقعیت هستند و کنترل نیروی تزریق‌کننده[3] را لحاظ نمی‌کنند. نیروی تزریق اگر به درستی کنترل نشود، می‌تواند به سلول آسیب وارد کرده و یا منجر به مرگ سلول شود[۱]. تزریق سلولی یک روش کلیدی جدید در علم پزشکی می‌باشد، که برای کاربردهایی همانند لقاح در سطح آزمایشگاهی، تزریق DNA، ژن درمانی، ترمیم سلول‌های بافتی آسیب دیده، داروسازی و غیره مورد استفاده است. تزریق سلولی مرسوم به صورت دستی انجام می‌شد که با سختی‌های بسیاری همراه بود[۲].

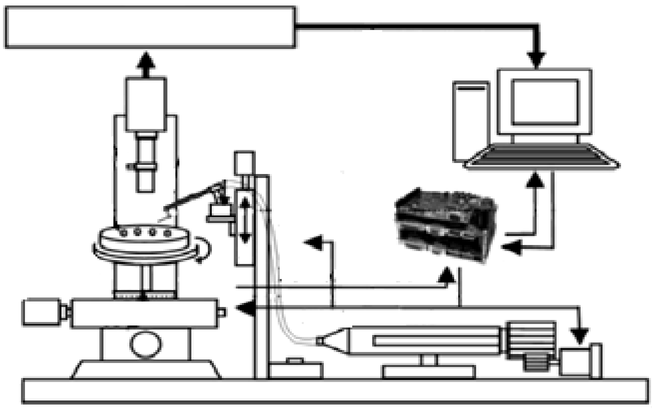
سیستم‌های تزریق سلولی بسیاری برای کاربردهای مختلف توسعه داده شد تا تعداد تکثیر و آهنگ موفقیت تزریق، افزایش یابد[۴،۳]. با این حال هنوز تجهیزات تزریق سلولی صنعتی، نمی‌تواند تمام نیازهای ممکن را برآورده سازد[۵]. سیستم‌های شبه خودکار تا حدودی در این زمینه موفق بودند[۶]. این سیستم‌ها در ابتدای کار برای تنظیم نوک تزریق‌کننده در محوطه قابل قبول، به یک متصدی[4] نیازمند هستند. بنابراین علم تزریق سلولی به سمت تمام خودکاری شدن سوق پیدا کرد[۷].

نیروی تزریقی بیش از حد، سبب آسیب به غشاء سلولی می‌گردد[۱]. این عکس العمل از نقطه نظر رباتیکی به این صورت است که نوک تزریق‌کننده یک تماس سخت فیزیکی با محیط برقرار سازد. سپس نیروی اعمالی موردنظر را در لحظه برخورد، به نقطه تماس اعمال کند[۸]. در سال‌های اخیر مدل‌سازی رفتار سلول تحت تزریق، یک مسئله مهم در تحقیقات علمی و آزمایشگاهی بوده است[۹]. این مدل‌ها در مشخصات مکانیکی تزریق سلولی مفید هستند، اما هنگام استفاده در طراحی مدل

---
[1] Cell Injection
[2] Automatic
[3] Injector
[4] Operator

سلول، سیستم کنترلی را پیچیده می‌کنند. 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[۱۰]. کنترل نیروی غیرمستقیم یا به معنای دیگر کنترل امپدانس[1]، یک روش واحد برای کنترل سیستم‌ها به صورت مناسب است[۱۱]. روش کنترل امپدانس مرسوم دارای مشکلات بسیاری می‌باشد. برای مثال یک راه حل پیشنهادی ساده در تابع امپدانس، تنظیم ضریب سختی در لحظه برخورد با محیط با مقدار صفر است[۱۲].

پیشرفت علم در این شاخه از علم پزشکی، به کنترل تزریق سلولی اتوماتیکی، در دسته سلول‌های معلق[2] می‌پردازد[۱۳]. برای این روند بایستی سلول‌ها را بر روی صفحه دوّار چید و به سلول‌ها به نوبت ماده شیمیایی را تزریق نمود. شکل (۱-۱) اجزای سیستم تزریق سلولی که امروزه در آزمایشگاه‌ها مورد استفاده است، را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱) سیستم تزریق به سلول‌های معلق مورد استفاده در آزمایشگاه‌ها

در مهندسی زیست‌شناسی، سلول‌های تحت تزریق به دو دسته سلول‌های به هم چسبیده[3] و سلول‌های معلق تقسیم‌بندی می‌شوند. تجهیزات بازرگانی به صورت اتوماتیک برای سلول‌های به هم

[1] Impedance Control
[2] Suspended Cells
[3] Adherent Cell

چسبیده تعبیه شده است، اما برای سلول‌های معلق این امکانات وجود ندارد. حرکت آزاد سلول‌های معلق سبب کاهش نرخ موفقیّت فرآیند تزریق سلولی می‌گردد[۱۴]. در سال‌های اخیر امکان تزریق به این دسته از سلول‌ها بسیار مورد توجه است[۱۵]. سیستم تزریق سلولی اتوماتیکی، به سلول‌های معلق[۱۶] به فرآیندهای پیچیده‌ای نیاز دارد. تعداد زیادی راه حل به منظور حل مشکل سلول‌های معلق مطرح شد. بعضی از این روش‌ها از قوانین مکانیکی و شیمیایی استفاده کردند تا سلول‌های معلق را در مکان خود ثابت کنند[۱۷].

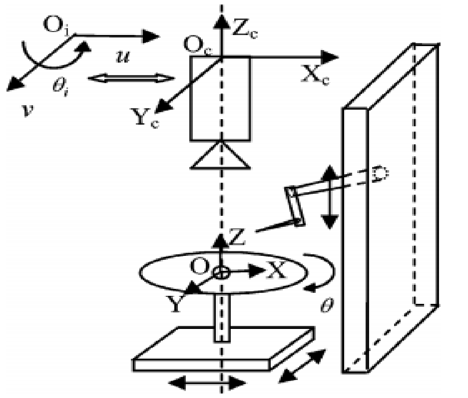
در تحقیقی دیگر وسیله‌ای برای نگه‌داری مبتنی بر خلأ سلول‌های معلق ارائه شد، که این تجهیز توسط یک مکش[1] و یک کانال[2]، هر سلول را در یک مکان خاص قرار می‌دهد. در این روش سلول‌ها در همان حفره کانال، ثابت می‌گردند[۱۸]. در این حالت بایستی سلول‌ها را روی صفحه دوّار چید و در مکان شیار صفحه، جایگذاری نمود. هنگامی‌که تزریق‌کننده در راستای x و y ردگیری موقعیت مطلوب را طی می‌کند، حرکت در راستای z به کمک کنترل امپدانس به ردگیری نیروی مطلوب می‌پردازد[۱۹]. به این صورت در راستای هر سه محور، می‌توان کنترل موقعیت و نیرو را محقق نمود[۲۰]. صفحه دوّار به کمک موتور پله‌ای[3] حرکت می‌کند. نیروی اعمالی به سلول در هر گونه و متناسب با سن سلول، متفاوت است. برای مثال نیروی لازم برای سوراخ کردن دیواره سلول موش بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ میکرونیوتون متفاوت است[۱۴].

در شکل (۱-۲) پیکربندی سیستم تزریق سلولی قابل مشاهده است. این سیستم در بعضی آزمایشگاه‌ها مورد استفاده می‌باشد[۲۱]. صفحه دوّار شامل x، y و θ است که با کمک موتور DC راه‌اندازی می‌گردد. یک سوزن ظریف نصب شده در محور z به عنوان تزریق‌کننده به سلول عمل می‌کند. قطر سلول‌ها معمولا در حدود ۶۰۰-۸۰۰ میکرومتر است[۱]. نیروی اعمالی لازم برای نفوذ به

---

1 Suction
2 Channel
3 Stepper Motor

داخل سلول در یک بازه‌ای از میکرونیوتون بایستی تعریف گردد و به همین دلیل نیاز است تا سنسور[1]ها دارای دقت بالایی باشند[۲۲]. در این حالت محور مختصات $O-XYZ$ را تعریف می‌کنیم، به این صورت که O در مرکز صفحه دوّار قرار داده می‌شود. سیستم بینایی را در راستای محور Z قرار می‌گیرد. محور مختصات دوربین $O_c-X_cY_cZ_c$ است که O_c در مرکز دوربین تعبیه می‌شود. محور مختصات O_i-uv محور مختصات صفحه عکس است، که توسط دوربین و سیستم کامپیوتری به دست می‌آید[۱۴].



شکل (۱-۲) پیکربندی سیستم تزریق سلولی

در روش کنترل امپدانس تزریق سلولی، بایستی یک رابطه مناسب بین کنترل نیروی اعمالی به سلول و موقعیت تزریق‌کننده بیان گردد[۱]. مدل‌سازی درست و دقیق از محیط، کارایی سیستم کنترل را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. ارائه یک مدل مکانیکی صحیح برای غشاء سلول سبب می‌شود تا تغییر شکل سلول در طی فرایند تزریق، نزدیک به واقعیت بیان شود. بنابراین نیروی اعمالی مناسب در نقطه تماس با سلول، کارایی مناسب کنترل‌کننده را نشان می‌دهد[۲۳]. در این حالت قبل از آنکه غشاء سلولی پاره شود، سلول در راستای محور z در برابر اعمال نیرو مقاومت کرده و تغییر شکل می‌یابد.

[1] Sensor

۱–۲ شرح فرآیند تزریق سلولی

کنترل نیروی ربات به دو روش در زمینه کنترل حرکت قابل دسته‌بندی است. روش اول کنترل امپدانس[۲۴] و روش دوم کنترل موقعیت/نیروی ترکیبی[1][۲۵] می‌باشد. در روش کنترل موقعیت/نیروی ترکیبی، فضای کار به دو حالت موقعیت و فضای کنترل نیرو تقسیم می‌شود. در این روش مجری نهایی قابلیت این را دارد تا نیروی مشخصی را در مسیر تعیین شده اعمال کند[۲۶]. روش کنترل نیرو به صورت مستقیم است و نیروی اعمالی به صورت صریح کنترل می‌شود. در این حالت کنترل موقعیت و کنترل نیرو به صورت جداگانه توسط مکانیزم سوئیچ کردن، تحقق می‌یابد[۲۷]. به وسیله یک الگوریتم کنترلی هر دو حالت حرکت آزاد و هنگام تماس، قابل کنترل است. کنترل امپدانس یک رابطه دینامیکی مطلوب بین موقعیت و نیروی اعمالی در نقطه تماس، حفظ می‌کند[۲۴].

در شروع فرآیند تزریق سلولی، یک دسته از سلول‌های موردنظر در شیار موجود صفحه دوّار قرار داده می‌شوند. سپس سلول‌ها را که با میکروسکوپ قابل مشاهده‌اند، در مکان خود جابجا کرده تا به موقعیت درستی برسند. در ابتدا مکان تزریق‌کننده ممکن است خارج از محدوده x و y مورد نظر باشد، که توسط دوربین قابل مشاهده و عکس‌برداری نیست. در اینصورت ابتدا ابزار تزریق را به محدوده مورد نظر در راستای z هدایت می‌کنیم، تا این نوک تزریق‌کننده به کمک دوربین و میکروسکوپ دیده شود. پس از آن با توجه به مکان قرار گرفتن سلول، تزریق‌کننده به آرامی به دیواره سلول نزدیک می‌شود. کنترل‌کننده در این قسمت بایستی ردگیری موقعیت مطلوب را، با خطای اندکی محقق سازد[۱۴].

مراحل تزریق به این صورت است، که در مرحله اول ابزار تزریق از موقعیت اولیه خود به سمت دیواره سلول به درستی حرکت کند. در این قسمت تزریق‌کننده با دیواره سلول برخورد می‌نماید. در

[1] Hybrid

مرحله دوم تزریق‌کننده بایستی از دیواره سلول به سمت مرکز سلول هدایت شود. در این حالت سرعت تزریق کننده بیشترین مقدار خود را دارد. این مرحله باعث پاره شدن جداره سلولی می‌شود. در این مرحله باید افزایش سرعت به گونه ای باشد که از آسیب دیدن به سلول یا ترکیدن سلول یا هر اتفاقی که منجر به مرگ سلول شود، جلوگیری کند[۱۴].

در مرحله بعد ماده شیمیایی به آرامی به سلول تزریق می‌گردد و ابزار تزریق به آرامی مسیر بازگشت خود را برای خروج از سلول طی می‌کند[۱۴]. در تزریق سلولی قبل از برخورد نوک تزریق‌کننده با سلول، فقط کنترل موقعیت انجام می‌شود و هیچ نیرویی از سوی تزریق‌کننده به محیط یا برعکس، اعمال نمی‌گردد. بعد از تماس نوک تزریق‌کننده به سلول، کنترل‌کننده موظف است تا نیروی مناسب و بدون نویز به سلول اعمال شود تا سلول پس از تزریق زنده و سالم باقی بماند[۲۸]. در این حالت کنترل موقعیت و نیرو به طور همزمان در راستاهای مختلف صورت می‌گیرد.

۳-۱ بررسی سابقه سیستم تزریق سلولی

شاید بتوان یکی از اولین و مهمترین سابقه و کاربرد تزریق سلولی که تزریق اسپرم است، را به عنوان ایده اصلی در این شاخه از علم پزشکی معرفی نمود. در این سیستم از کنترل موقعیت، برای تزریق به بدن موش استفاده شده است[۲۹]. در همین دوره از روش‌هایی دیگر کنترلی که ایده نوینی بودند، همانند کنترل ادمیناتس[1][۳۰] و کنترل ضریب سختی[۳۱] هم در علم تزریق سلولی استفاده شده و نتایج خوبی حاصل گردیده است.

در روشی دیگر با کنترل موقعیت نقطه تنظیم ثابت[2]، برای نفوذ به داخل سلول زنده استفاده شد. این مدل دارای کارایی بسیاری است اما به عنوان نقطه ضعف، قدرت تشخیص موفقیت آمیز بودن عملیات تزریق به سلول را ندارد[۳۲]. در همین راستای علمی، در مقاله‌ای دیگر از کنترل موقعیت

[1] Admittance
[2] Set point

مبتنی بر بینایی، برای تزریق ماده شیمایی مورد نظر به اطراف هسته *DNA* در سلول موش استفاده شد. در این حالت سیستم بینایی برای تشخیص مکان دقیق نوک تزریق‌کننده به کار گرفته شد. این روش نیز در قسمت شبیه‌سازی کارایی مطلوب خود را به نمایش گذاشت[۳۳].

در سال‌های اخیر یک سیستم تزریقی شبه رباتیکی، برای تزریق سلول‌های جنین ماهی زبرا[1] توسعه داده شد. در این حالت مرکز سیتوپلاسم[2] به عنوان موقعیت هدف مورد نظر، توسط سیستم بینایی کامپیوتری قرار داده شد و برای فرآیند تزریق، از یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی[3] استفاده می‌گردد[۳۴]. این تحقیقات در ترزیق سلولی مبتنی بر کنترل موقعیت هستند و اکثرا بر نیروی وارده بر سلول، کنترلی ندارند. اگرچه تزریق سلولی موفق آن است که، سلول پس از تزریق زنده و سالم باقی بماند و به سلول صدمه‌ای نرسد[۳۵].

برای تحقق کنترل امپدانس در سیستم تزریق سلولی، به منظور شبیه‌سازی سلول از مدل فنر با سختی نامعین استفاده شده است. در این مقاله از روش تطبیقی برای جبران نامعینی‌ها[4] در سختی پوسته استفاده شده است. نیروی مطلوب در این روش، متغیر با زمان است که به صورت سیگنال شیب‌دار[5] تعبیه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی کارایی مناسب این روش را بیان می‌کند[۸]. در تحقیق دیگری ترزیق سلولی با هدف کنترل نیرو به صورت آشکار، محقق گردید. در این حالت ردیابی هر نیروی مطلوب که از چندجمله‌ای درجه ۲[6] باشد، قابل دستیابی است. نتایج در آزمایشگاه تزریق سلولی، پیاده‌سازی شد که کارایی مطلوب این روش را نشان می‌دهد[۱].

کنترل نیروی متغیر با زمان، در علم تزریق سلولی با مشکلات زیادی همراه است. در این حالت دقت و صحت تزریق کاهش می‌یابد و با نامعینی مدل ربات، نامعینی موقعیت محیط و سختی سلول

---

[1] Zebra fish
[2] Cytoplasm
[3] PID
[4] Uncertainty
[5] Ramp
[6] Quadratic Polynomial

تزریق شده، مواجه می‌گردد. در این روش برعکس روش سنتی که نیرو و گاهی موقعیت[۳۶] مقداری ثابت داشت، طراحی به‌گونه‌ای است که نیروی اعمالی به سلول‌ها، متناسب با زمان تغییر کند. در این حالت با توجه به مدل محیط، قانون امپدانس تطبیق پیشنهاد می‌شود[۲۸].

یک ایده جدید دیگر در روش تزریق سلولی این است که به منظور تزریق با نرخ موفقیت بالاتر در روش سلول‌های معلق، با استفاده از ژل[1] در سایز سلولی، می‌توان سلول‌ها را در شیارهای صفحه سلولی ثابت نگه داشت. در این صورت می‌توان به سلول از هر زاویه‌ای، ماده مورد نظر را تزریق نمود[۳۷]. کنترل نیروی تزریق را می‌توان به کمک بازخورد نیرو، در طی زمان فرآیند شبیه‌سازی کرد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نیز، کارایی این روش را در سیستم‌های تزریق سلولی نشان می‌دهد[۳۸]. توسعه سیستم تزریقی اتوماتیکی، به این صورت که تغییرات پتانسیل درون سلولی را اندازه بگیرد و یک سیگنال توقف[2] برای راه‌انداز موتور[3]ها ارسال کند، تا به حال محقق شده است. در این حالت کنترل‌کننده به کنترل موقعیت می‌پردازد و از کنترل مستقیم نیروی تزریق به سلول‌ها، عاجز می‌باشد[۳۹].

سیستم تزریقی پیشرفته به این صورت است که در فضای ۳ بعدی، تزریق را انجام می‌دهد و در این حالت، تزریق سلولی کاملا خودکار به خوبی محقق می‌شود[۴۰]. تا به حال اکثر کنترل‌کننده‌هایی که طراحی شده‌اند یا مبتنی بر گشتاور و یا مبتنی بر موقعیت هستند. اما نکته بسیار مهم این است که نیروی اعمالی در طی فرآیند تزریق، مقداری متغیر با زمان باشد[۴۱]. توجه به همین عامل مهم، سبب می‌گردد تا کنترل در کاربردهای صنعتی موفقیت آمیز گردد و نیاز صنعت متناسب با تجهیزات برآورده شود[۴۲].

[1] Gel
[2] Stop Signal
[3] Motor Driver

۱–۴ مروری بر پایان‌نامه

در این پایان‌نامه پس از مطالعه مراجع و منابع مختلف و مدل‌سازی سیستم رباتیک، به طراحی کنترل امپدانس بازوی ربات اسکارا با راهبرد ولتاژ، در سیستم تزریق سلولی پرداخته می‌شود. در فصل دوم، به بررسی مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا پرداخته و با مفاهیم مورد نیاز در علم رباتیک آشنا می‌شویم. سیستم تزریق فصل سوم با صفحه سلولی ثابت است، و به منظور افزایش میزان موفقیت، ربات کنترل می‌شود. در اینجا مدل امپدانس ربات، بر اساس روش تونن بیان شده و پارامترهای مدل محیط توسط مدل غیرخطی پیشنهادی، تخمین زده می‌شود و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا بهینه می‌گردد.

در این رساله راهکاری برای عبور از چالش همیشگی کنترل امپدانس در سیستم تزریق سلولی، یعنی تعیین ضرایب امپدانس ارائه می‌گردد. در فصل چهارم به تنظیم ضرایب امپدانس بازوی ربات، به وسیله قانون تطبیق پیشنهادی می‌پردازیم. در ادامه به بررسی اثر نامعینی‌ها و اغتشاش خارجی در راهبرد کنترل ولتاژ پرداخته می‌شود. در فصل پنجم کنترل امپدانس مقاوم بر اساس راهبرد ولتاژ ارائه می‌شود، تا سیستم کنترل در برابر نامعینی‌ها و اغتشاش خارجی مقاوم گردد. در فصل ششم به سراغ چالش تعیین ضرایب امپدانس رفته و با در نظر گرفتن نامعینی‌ها و اغتشاش خارجی، یک سیستم فازی طراحی شده است و تحلیل پایداری سیستم ارائه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی در انتهای هر فصل آورده شده است و کارایی مناسب روش پیشنهادی را نشان دهد.

فصل ۲ : مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات

رسول اکرم (ص) فرموده‌اند: در قیامت بدترین مردم نزد پروردگار، عالِمی است که در جهان از دانش خود عملاً استفاده نکرده و از آن پیروی ننموده است.

لئالی اللخبار، صفحه ۱۹۲

۲–۱ مقدمه

در تعاریف علمی، سینماتیک به عنوان علم حرکت شناخته می‌شود و حرکت را بدون در نظر گرفتن نیروهای ایجادکننده آن مورد مطالعه قرار می‌دهد. هر بازوی مکانیکی را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از اجسام صلب در نظر گرفت، که این بازوها به وسیله مفصل به یکدیگر اتصال می‌یابند. در طراحی این فرض لحاظ می‌گردد که بازوهای مکانیکی ماهر، در حالت کلی از مفصل‌های با یک درجه آزادی تشکیل می‌شوند. سینماتیک بازوهای مکانیکی ماهر، شامل همه ویژگی‌های هندسی ربات می‌گردد. سینماتیک مستقیم یک ربات، در واقع توصیف‌کننده موقعیت مجری نهایی ربات، بر اساس زوایای رابط‌ها و متغیرهای مفاصل می‌باشد. بدین صورت لازم است پارامترهای مورد نیاز، برای توصیف مکان نسبی مفاصل را انتخاب کنیم. هنگام به دست آوردن معادلات سینماتیکی یک ربات، هر رابط تنها به صورت جسمی صلب می‌تواند رابطه بین دو محور مفصلی را در بازوی مکانیکی ماهر، توصیف کند و عواملی چون استحکام رابط‌ها، جنس رابط‌ها و مکان مفاصل در این بخش لحاظ نمی‌گردد.

۲–۲ مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی ربات

در این بخش ابتدا سینماتیک مستقیم ربات را محاسبه می‌کنیم. دستگاه‌های مختصات ربات را تعیین کرده و سپس معادلات سینماتیکی ربات را بر طبق قوانین دناویت هارتنبرگ[۱] به دست می‌آوریم. هم‌چنین سینماتیک سرعت بازوی ماهر را مورد بررسی قرار داده و با مفهوم ژاکوبین[۲] آشنا می‌شویم. در بخش بعد معادلات دینامیکی ربات با چند درجه آزادی، محاسبه می‌گردد. در انتها مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی بازوی ربات اسکارا[۳] مورد بررسی قرار داده می‌شود.

---
[1] Denavit-Hartenberg
[2] Jacobian
[3] SCARA Robot

۲-۲-۱ محاسبه معادلات سینماتیکی ربات

برای به دست آوردن معادلات سینماتیکی ربات، در ابتدا بایستی دستگاه‌های مختصات بازوی ربات به وسیله قوانین دناویت هارتنبرگ تعیین و ترسیم گردد[۴۳]. قوانین دناویت هارتنبرگ کمک می‌کند تا معادلات سینماتیکی ربات را بتوان محاسبه نمود. این قوانین به ترتیب زیر اعمال می‌گردد:

اولین قدم این است که رابط‌ها، نام‌گذاری شوند. رابط صفر همان رابط پایه و ساکن است و رابط یک، رابط بعدی است و به همین ترتیب کلیه رابط‌ها نام‌گذاری بر حسب شماره رابط می‌شوند. پس از آن بر روی هر مفصل، یک دستگاه مختصات قرار می‌گیرد. روش دناویت هارتنبرگ نحوه تعیین محورهای ربات را به صورت زیر شرح می‌دهد:

- محورهای مفاصل را شناسایی کرده که محور مفصل، محوری است که مفصل لولایی حول آن می‌چرخد و یا مفصل کشویی در راستای آن، حرکت می‌نماید. محورهای z، در راستای محورهای مفصلی قرار می‌گیرند.
- محور x_0 را به صورت اختیاری انتخاب می‌کنیم.
- محور x_i به گونه‌ای انتخاب می‌شود که، محور x_i عمود و متقاطع با محور z_{i-1} باشد.
- محور y_i به گونه‌ای انتخاب می‌شود، که همه دستگاه‌ها به صورت راست‌گرد باشند.
- از پارامترهای رابط‌ها که a_i طول، d_i انحراف، α_i پیچش و θ_i زاویه هستند[۴۳]، جدولی تشکیل می‌دهیم که هر پارامتر به صورت زیر قابل تعریف می‌باشد:

  a_i: فاصله از z_{i-1} تا z_i در جهت x_i

  d_i: فاصله از x_{i-1} تا x_i در جهت z_{i-1}

  α_i: زاویه از z_{i-1} تا z_i حول x_i

  θ_i: زاویه از x_{i-1} تا x_i حول z_{i-1}

- ماتریس همگن A_i را تشکیل دهید، که این ماتریس مختصات یک نقطه از دستگاه مختصات i را به دستگاه مختصات $i-1$ تبدیل می‌کند و این ماتریس متناسب با حرکت بازوی ربات تغییر می‌کند. اگرچه هر مفصل دارای یک درجه آزادی است، با توجه به نوع مفصل که اگر کشویی باشد، متغیر q_i اضافه طول و اگر لولایی باشد، متغیر q_i زاویه دوران مفصل را بیان می‌کند. حال نتیجه می‌شود که ماتریس A_i تنها تابعی از متغیر q_i است.

$$A_i = A_i(q_i) \tag{۱-۲}$$

- ماتریس تبدیل محاسبه گردد. ماتریس تبدیل، ماتریس همگنی است که مختصات نقطه را از دستگاه j به دستگاه i تبدیل می‌کند. رابطه این ماتریس در ادامه آورده شده است:

$$T_i^{\,j} = A_{i+1}A_{i+2}...A_{j-1}A_j \tag{۲-۲}$$

هر نقطه در مجری نهایی که در دستگاه مختصات n بیان می‌شود، دارای مقداری ثابت است و از شکل ربات مستقل می‌باشد. هم‌چنین موقعیت مجری نهایی نسبت به دستگاه پایه یا آغازین، توسط بردار ۳ عضوی d و ماتریس ۳×۳ دوران R قابل بیان است. حال ماتریس تبدیل به صورت زیر قابل بیان است:

$$T_0^{\,n} = A_1A_2...A_{n-1}A_n = \begin{bmatrix} R_0^n & d_0^n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{۳-۲}$$

در رابطه بالا R_0^n جهت مجری نهایی را در دستگاه پایه بیان می‌کند و هم‌چنین A_i به صورت زیر نشان داده می‌شود[۴۳].

$$A_i = Rot_{z,\theta_i}\; Trans_{z,d_i}\; Trans_{x,a_i}\; Rot_{x,\alpha_i} \tag{۴-۲}$$

متغیرهای a_i، d_i، α_i و θ_i پارامترهای رابط و مفصل iام هستند. در رابطه بالا ماتریس Rot، ماتریس دوران نام دارد و ماتریس $Trans$، ماتریس انتقال است.

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} & 0 & 0 \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{\alpha_i} & -S_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (۵-۲)$$

حاصل ضرب ماتریس بالا در ادامه آورده شده است:

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} C_{\alpha_i} & S_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i C_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i S_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (۶-۲)$$

در روابط (۲-۵) و (۲-۶) نمادهای S و C به ترتیب بیانگر توابع Sin و Cos هستند، که به صورت خلاصه نوشته شده‌اند.

۲-۲-۲ ژاکوبین بازوی ربات

ژاکوبین در محاسبه سرعت مجری نهایی، در اثر حرکت‌های خطی و زاویه‌ای رابط‌ها مورد استفاده است. به معنای دیگر ماتریس ژاکوبین صورتی چندبعدی از مشتق است، که برای تابع دلخواه Y که تابعی از متغیر X می‌باشد، به صورت زیر تعریف می‌شود. در این رابطه X و Y بردار می‌باشند.

$$Y = F(x) \qquad (۷-۲)$$

که ماتریس ژاکوبین به صورت زیر قابل تعریف است:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \qquad (۸-۲)$$

در رابطه بالا $F(x) = [f_1 \quad \cdots \quad f_n]^T$ است. مشتق رابطه (۲-۷) در رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$\dot{Y} = J(X)\dot{X} \tag{۹-۲}$$

ماتریس X در هر لحظه مقدار معینی دارد و $J(X)$ یک تبدیل خطی متغیر با زمان است که متناسب با تغییرات X، متغیر می‌باشد. از ماتریس ژاکوبین برای ارتباط بین سرعت مفاصل به سرعت دکارتی مجری نهایی استفاده می‌شود. رابطه کلی به صورت زیر قابل بیان است:

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \tag{۱۰-۲}$$

در رابطه بالا $\dot{X}$ بردار سرعت خطی و زاویه‌ای مجری نهایی است و q نیز بردار متغیرهای مفصلی می‌باشد. سرعت مجری نهایی از سرعت زاویه‌ای و سرعت خطی رابط‌ها ایجاد می‌گردد.

اگر W_0^n بردار سرعت زاویه‌ای مجری نهایی باشد و $V_0^n = \dot{d}_0^n$ معرف بردار سرعت خطی مجری نهایی باشد، در این صورت داریم:

$$W_0^n = J_w\dot{q} \tag{۱۱-۲}$$

و هم‌چنین رابطه زیر برقرار است.

$$V_0^n = J_v\dot{q} \tag{۱۲-۲}$$

در روابط بالا J_v و J_w ماتریس‌های $3\times n$ هستند. طبق رابطه (۲-۱۰) رابطه زیر برقرار است:

$$\begin{bmatrix} V_0^n \\ W_0^n \end{bmatrix} = J_0^n\dot{q} \tag{۱۳-۲}$$

در رابطه بالا ماتریس ژاکوبین به صورت زیر قابل تعریف است. این ماتریس دارای ابعاد $3\times n$ است که n تعداد رابط‌ها می‌باشد.

$$J_0^n = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} \tag{۱۴-۲}$$

اگر سرعت زاویه‌ای رابط‌ها در دستگاه پایه را تعیین کرده و سپس جمع کنیم، می‌توان سرعت زاویه‌ای مجری نهایی نسبت به دستگاه پایه را بیان نمود. هم‌چنین اگر مفصل iام لولایی باشد، آنگاه q_i برابر θ_i و z_{i-1} محور دوران است. بنابراین سرعت زاویه‌ای رابط i در دستگاه $i-1$ به صورت زیر خواهد بود:

$$W_i^{i-1} = \dot{q}_i k \qquad (۱۵-۲)$$

در رابطه بالا k بردار یکه در راستای محور z_{i-1} می‌باشد. اگر مفصل iام کشویی باشد، در این حالت حرکت دستگاه مختصات i، نسبت به دستگاه مختصات $i-1$ یک انتقال است.

$$W_{i-1}^{i} = 0 \qquad (۱۶-۲)$$

اگر بخواهیم سرعت‌های زاویه‌ای را با یکدیگر جمع کنیم، بایستی همه آن‌ها در یک دستگاه مختصات بیان شوند. بنابراین سرعت زاویه‌ای در دستگاه پایه به صورت زیر قابل بیان است:

$$W_0^n = W_0^1 + R_0^1 W_1^2 + R_0^2 W_2^3 + \ldots + R_0^{n-1} W_{n-1}^n \qquad (۱۷-۲)$$

به کمک روابط (۲-۱۵) و (۲-۱۶) رابطه بالا را می‌توان به فرم زیر نوشت.

$$W_0^n = \rho_1 \dot{q}_1 k + \rho_2 \dot{q}_2 R_0^1 k + \ldots + \rho_n \dot{q}_n R_0^{n-1} k = \sum_{i=1}^{n} \rho_i \dot{q}_i z_{i-1} \qquad (۱۸-۲)$$

که در رابطه بالا داریم:

$$z_{i-1} = R_0^{i-1} k \qquad (۱۹-۲)$$

در رابطه (۲-۱۸) اگر مفصل iام لولایی باشد، $\rho_i = 1$ و اگر مفصل iام کشویی باشد $\rho_i = 0$ است.

با استفاده از رابطه (۲-۱۱) و رابطه (۲-۱۸) می‌توان به نتیجه زیر رسید:

$$J_w = [\rho_1 z_0 \quad \rho_2 z_1 \quad \dots \quad \rho_n z_{n-1}] \qquad (۲-۲۰)$$

در رابطه بالا $z_0 = k = [0 \quad 0 \quad 1]^T$ می‌باشد. سرعت خطی مجری نهایی عبارت است از:

$$V_0^n = \dot{d}_0^n \qquad (۲-۲۱)$$

به کمک قانون زنجیره‌ای مشتق می‌توان به نتیجه زیر دست یافت.

$$\dot{d}_0^n = \frac{\partial d_0^n}{\partial q_1}\dot{q}_1 + \frac{\partial d_0^n}{\partial q_2}\dot{q}_2 + \dots + \frac{\partial d_0^n}{\partial q_n}\dot{q}_n = \sum_{i=1}^{n}\frac{\partial d_0^n}{\partial q_i}\dot{q}_i \qquad (۲-۲۲)$$

رابطه بالا همان رابطه سرعت خطی مجری نهایی است، که در این رابطه همه مفاصل به جز مفصل iام ثابت نگه داشته شده است. مفصل iام، دارای سرعت واحد می‌باشد و این فرض کلی در روابط بعدی نیز صدق می‌کند. اگر مفصل iام لولایی باشد، رابطه زیر برقرار خواهد بود.

$$d_0^n = d_0^1 + R_0^1 d_1^2 + R_0^2 d_2^3 + \dots + R_0^{i-1} d_{i-1}^i + \dots + R_0^{n-1} d_{n-1}^n \qquad (۲-۲۳)$$

بنابراین:

$$d_0^n = d_0^{i-1} + R_0^{i-1} d_{i-1}^n \qquad (۲-۲۴)$$

اگر از رابطه (۲-۲۴) مشتق بگیریم، داریم:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1}\dot{d}_{i-1}^n \qquad (۲-۲۵)$$

با استفاده از رابطه سرعت زاویه‌ای، رابطه فوق را به کمک ضرب خارجی می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1}(\dot{q}_i k \times d_{i-1}^n) = \dot{q}_i R_0^{i-1} k \times R_0^{i-1} d_{i-1}^n \qquad (۲-۲۶)$$

به کمک رابطه (۲-۱۹) و (۲-۲۴) می‌توان به نتیجه رسید که:

$$\dot{d}_0^n = \dot{q}_i z_{i-1} \times (\mathrm{d}_0^n - \mathrm{d}_0^{i-1}) \qquad (۲-۲۷)$$

اگر مفصل iام لولایی باشد، با استفاده از رابطه (۲-۱۲) و (۲-۲۱) ستون iام ماتریس J_{v_i}، به صورت زیر خواهد بود.

$$J_{v_i} = z_{i-1} \times (\mathrm{d}_0^n - \mathrm{d}_0^{i-1}) \qquad (۲-۲۸)$$

حال اگر مفصل iام کشویی باشد، رابطه زیر برقرار است:

$$d_{i-1}^i = d_i k + a_i i \qquad (۲-۲۹)$$

در رابطه بالا $i = [1 \quad 0 \quad 0]^T$ و d_i و a_i پارامترهای رابط iام هستند. به کمک رابطه (۲-۲۳) می‌توان به نتیجه زیر رسید.

$$d_0^n = d_0^{i-1} + R_0^{i-1} d_{i-1}^i + R_0^i d_i^n \qquad (۲-۳۰)$$

در رابطه بالا همه مفاصل به جز مفصل iام ثابت نگه داشته شده است و مفصل iام، دارای سرعت واحد می‌باشد. با مشتق‌گیری از رابطه بالا خواهیم داشت:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_{i-1}^i \qquad (۲-۳۱)$$

با استفاده از معادلات (۲-۲۹) و (۲-۳۱) می‌توان نوشت:

$$\dot{d}_0^n = R_0^{i-1} \dot{d}_i k \qquad (۲-۳۲)$$

به کمک رابطه (۲-۱۹) می‌توان به نتیجه زیر رسید:

$$\dot{d}_0^n = z_{i-1} \dot{d}_i \qquad (۲-۳۳)$$

در مفاصل کشویی $q_i = d_i$ است. بنابراین اگر مفصل iام ربات، کشویی باشد به کمک رابطه (۲-۱۲) ستون iام ماتریس J_v به صورت زیر خواهد بود:

$$J_{v_i} = z_{i-1} \quad (۳۴-۲)$$

بنابراین ماتریس J_v به صورت زیر خواهد بود:

$$J_v = \begin{bmatrix} J_{v_1} & J_{v_2} & \dots & J_{v_n} \end{bmatrix} \quad (۳۵-۲)$$

در رابطه بالا مقدار J_{v_i} اگر مفصل iام لولایی باشد، توسط رابطه (۲-۲۷) و اگر مفصل iام کشویی باشد، به کمک رابطه (۲-۳۴) قابل محاسبه است. ماتریس ژاکوبین ربات به صورت زیر است:

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & \dots & J_n \end{bmatrix} \quad (۳۶-۲)$$

که ستون iام ماتریس ژاکوبین برای مفصل لولایی ربات به صورت زیر است.

$$J = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (\mathrm{d}_0^n - \mathrm{d}_0^{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (۳۷-۲)$$

هم چنین ستون iام ماتریس ژاکوبین برای مفصل کشویی ربات به صورت خواهد بود.

$$J = \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۳۸-۲)$$

ماتریس ژاکوبین بازوی ماهر ربات به کمک این دو رابطه نهایی قابل محاسبه می‌باشد.

۲-۲-۳ معادلات دینامیکی ربات

با محاسبه انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی رابطها و مفاصل، می‌توان معادلات دینامیکی ربات با چند درجه آزادی را به دست آورد. برای این منظور ابتدا مقادیر انرژی‌ها را محاسبه کرده و سپس تابع لاگرازین[1] سیستم که اختلاف انرژی جنبشی و پتانسیل است، را به دست می‌آوریم. پس از آن از تابع لاگرازین نسبت به متغیرهای مفاصل مشتق می‌گیریم.

[1] Lagrangian

انرژی پتانسیل سیستم با جمع کردن انرژی پتانسیل رابط‌ها قابل محاسبه است.

$$V = \sum_{i=1}^{n} m_i g^T d_0^{c_i} \quad (۳۹-۲)$$

در رابطه بالا m_i جرم رابط iام، g^T بردار شتاب جاذبه در دستگاه 0 و $d_0^{c_i}$ بیانگر موقعیت مرکز جرم رابط iام در دستگاه 0 می‌باشد. برای به دست آوردن $d_0^{c_i}$ بایستی مکان مرکز جرم هر رابط را در دستگاه مختصات متصل به همان رابط، به معنای دیگر $d_i^{c_i}$ را محاسبه کرده و سپس با استفاده از رابطه زیر مقدار $d_0^{c_i}$ به دست می‌آید.

$$d_0^{c_i} = d_0^i + R_0^i d_i^{c_i} \quad (۴۰-۲)$$

انرژی جنبشی یک ربات، به کمک مجموع انرژی‌های جنبشی رابط‌های ربات قابل محاسبه است. رابطه زیر نحوه به دست آوردن انرژی جنبشی برای رابط iام را نشان می‌دهد.

$$K_i = \frac{1}{2} m_i V_{c_i}^T V_{c_i} + \frac{1}{2} W_0^{iT} I_0^i W_0^i \quad (۴۱-۲)$$

در رابطه بالا m_i جرم رابط iام، V_{c_i} بردار سرعت‌های خطی مرکز جرم رابط iام، W_0^i بردار سرعت زاویه‌ای رابط iام ربات نسبت به دستگاه مختصات پایه و I_0^iماتریس ممان‌های اینرسی زاویه‌ای رابط iام ربات نسبت به دستگاه مختصات پایه می‌باشد. اگر بتوان ماتریس ممان اینرسی را در دستگاهی متصل به همان رابط محاسبه کرد، آنگاه می‌توان ماتریس ممان اینرسی را مستقل از حرکت جسم بیان نمود. در این حالت دستگاه متصل به مرکز جرم ربات انتخاب می‌شود.

$$I_0^i = R_0^i I_i R_0^{iT} \quad (۴۲-۲)$$

به کمک رابطه بالا می‌توان رابطه (۲-۴۱) را به فرم زیر نوشت.

$$K_i = \frac{1}{2} m_i V_{c_i}^T V_{c_i} + \frac{1}{2} W_0^{iT} R_0^i \, I_i R_0^{iT} \, W_0^i \quad (۴۳-۲)$$

در رابطه بالا R_0^i ماتریس دورانی است که به کمک این ماتریس می‌توان بردارها را از دستگاه مختصات جسم به دستگاه مختصات پایه تبدیل کرد. I_i نیز ماتریس ممان اینرسی رابط iام، در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم ربات و موازی با دستگاه مختصات متصل به همان رابط می‌باشد. این ماتریس به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$I_i = \begin{bmatrix} \int (y^2+z^2)dm & -\int xydm & -\int xzdm \\ -\int xydm & \int (x^2+z^2)dm & -\int yzdm \\ -\int xzdm & -\int yzdm & \int (y^2+x^2)dm \end{bmatrix} \quad (۴۴-۲)$$

در رابطه بالا x، y و z مختصات نقطه‌ای در دستگاه مختصات متصل به مرکز جرم رابط iام است و رابطه بالا را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$I_i = \begin{bmatrix} I_{xx_i} & -I_{xy_i} & -I_{xz_i} \\ -I_{xy_i} & I_{yy_i} & -I_{yz_i} \\ -I_{xz_i} & -I_{yz_i} & I_{zz_i} \end{bmatrix} \quad (۴۵-۲)$$

انرژی جنبشی ربات با استفاده از رابطه (۲-۴۳) به صورت زیر قابل بیان است.

$$K = \sum_{i=1}^{n} K_i = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} m_i V_{c_i}^T V_{c_i} + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} W_0^{iT} R_0^i \, I_i \, R_0^{iT} \, W_0^i \quad (۴۶-۲)$$

با استفاده از رابطه (۲-۱۱) و رابطه (۲-۱۲) می‌توان نوشت:

$$V_{c_i} = J_{v_{ci}} \dot{q} \quad (۴۷-۲)$$

و رابطه زیر نیز برقرار است.

$$W_0^i = J_{w_i} \dot{q} \quad (۴۸-۲)$$

در دو رابطه بالا برای محاسبه $J_{v_{ci}}$ باید از $d_0^{c_i}$ به جای d_0^n که در معادله (۲-۲۸) مطرح شده، استفاده کرد. بنابراین برای محاسبه $d_0^{c_i}$ به رابطه (۲-۴۰) نیاز است. با جایگذاری روابط (۲-۴۷) و (۲-۴۸) در رابطه (۲-۴۶) به نتیجه زیر دست می‌یابد.

$$K = \frac{1}{2}\dot{q}^T \sum_{i=1}^{n}[m_i J_{v_{ci}}^T J_{v_{ci}} + J_{w_i}^T \, \mathrm{R}_0^i \, \mathrm{I}_i \mathrm{R}_0^{iT} \, J_{w_i}] \, \dot{q} \tag{۲-۴۹}$$

با توجه به رابطه بالا، این رابطه را می‌توان به فرم زیر در آورد.

$$K = \frac{1}{2}\dot{q}^T D(q)\dot{q} \tag{۲-۵۰}$$

در رابطه بالا ماتریس $D(q)$ به صورت زیر قابل بیان است:

$$D(q) = \sum_{i=1}^{n}[m_i J_{v_{ci}}^T J_{v_{ci}} + J_{w_i}^T \, \mathrm{R}_0^i \, \mathrm{I}_i \mathrm{R}_0^{iT} \, J_{w_i}] \tag{۲-۵۱}$$

با توجه به مطالبی که تاکنون مطرح شد، انرژی پتانسیل ربات به کمک رابطه (۲-۳۹) و انرژی جنبشی ربات توسط رابطه (۲-۵۰) قابل محاسبه است. حال تابع لاگراژین ربات را تشکیل می‌دهیم:

$$L = K - V \tag{۲-۵۲}$$

معادله دینامیکی سیستم در حالت کلی به فرم زیر است:

$$\tau = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial V}{\partial \dot{q}} \tag{۲-۵۳}$$

در رابطه بالا τ بردار گشتاور برای مفاصل لولایی ربات و نیرو برای مفاصل کشویی ربات می‌باشد. به کمک معادلات (۲-۵۰)، (۲-۵۱) و (۲-۵۲) در معادله (۲-۵۳) و ساده‌سازی آن، نتیجه کلی به صورت زیر قابل بیان است:

$$\tau = D(q)\ddot{q} + \dot{D}(q)\dot{q} - \frac{1}{2}\dot{q}^T \left(\frac{\partial D(q)}{\partial q}\right)\dot{q} + \frac{\partial V}{\partial q} \tag{۵۴-۲}$$

با استفاده از مباحث مطرح شده، معادله دینامیکی ربات به صورت زیر خواهد بود.

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) \tag{۵۵-۲}$$

در رابطه بالا $D(q)$ ماتریس $n \times n$ اینرسی ربات، $C(q,\dot{q})\dot{q} \in R^n$ بردار گشتاور کوریولیس و $G(q)$ بردار گشتاور گرانشی می‌باشد. در رابطه (۲-۵۵) با استفاده از رابطه (۲-۵۴) به نتایج زیر می‌توان دست یافت:

$$C(q,\dot{q}) = \dot{\mathrm{D}}(\mathrm{q}) - \frac{1}{2}\dot{q}^T \left(\frac{\partial D(q)}{\partial q}\right) \tag{۵۶-۲}$$

$$G(q) = \frac{\partial V}{\partial q} \tag{۵۷-۲}$$

با توجه به معادلات مدل ربات، می‌توان رفتار دینامیکی ربات را بررسی نمود.

۲-۲-۴ دینامیک موتورها

محرکه‌های الکتریکی که اغلب اوقات موتورهای الکتریکی هستند، گشتاور لازم برای حرکت مفاصل ربات را فراهم می‌سازند. در نتیجه موتورها یک قسمت اصلی از دینامیک سیستم ربات را تشکیل می‌دهند. گشتاور لازم برای هر مفصل به کمک موتورها با رابطه زیر قابل بیان است.

$$J\ddot{\theta}_m + B\dot{\theta}_m + r\tau_r = \tau_m \tag{۵۸-۲}$$

در رابطه بالا τ_m بردار گشتاور تولیدی موتورها برای هر مفصل، τ_r بردار گشتاور بار موتورها، r ماتریس ضریب کاهشی چرخ‌دنده‌ها، θ_m بردار زاویه موتورها، J ماتریس جمع ممان اینرسی روتورها و B ماتریس ضریب اصطکاک روتورها می‌باشد. J، B و r ماتریس‌های قطری $n \times n$ هستند.

$$\dot{q} = r\dot{\theta}_m \qquad (۵۹-۲)$$

به منظور محاسبه معادلات سیستم ربات بر اساس ولتاژ موتورها، به عنوان ورودی‌های کنترلی به معادله الکتریکی موتورهای مغناطیس دائم DC در فرم ماتریسی می‌پردازیم:

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1}\dot{q} + \varphi = u \qquad (۶۰-۲)$$

در رابطه بالا $u \in R^n$ بردار ولتاژ موتورها، $I_a \in R^n$ بردار جریان موتورها، $\varphi \in R^n$ بردار اغتشاش‌های خارجی، R، L و K_b ماتریس‌های $n \times n$ هستند که به ترتیب معرف مقاومت سیم‌پیچ‌ها، اندوکتانس سیم‌پیچ‌ها و ضریب‌های ثابت القا می‌باشند. هم‌چنین رابطه زیر برقرار است:

$$K_m I_a = \tau_m \qquad (۶۱-۲)$$

رابطه بالا بیانگر رابطه گشتاور تولیدی موتورها با جریان آرمیچر است. K_m ماتریس $n \times n$ معرف ضریب‌های ثابت گشتاور می‌باشد. به کمک معادلات (۲-۵۵) و (۲-۵۸) تا (۲-۶۱) می‌توان مدل فضای حالت را به صورت زیر بیان نمود.

$$\dot{x} = f(x) + bu - b\varphi \qquad (۶۲-۲)$$

در رابطه بالا u بردار ورودی سیستم، بردار x متغیرهای حالت سیستم و $f(x)$ به صورت زیر می‌باشد.

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ (\mathrm{Jr}^{-1} + \mathrm{rD}(\mathrm{x}_1))^{-1}(-(Br^{-1} + rC(x_1, x_2))x_2 - rG(x_1) - r\tau_f(x_2) + K_m x_3 \\ -L^{-1}(K_b r^{-1}x_2 + Rx_3) \end{bmatrix} \qquad (۶۳-۲)$$

و هم‌چنین داریم:

$$b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L^{-1} \end{bmatrix}, \; x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ I_a \end{bmatrix}$$ (۲-۶۴)

مدل فضای حالت (۲-۶۲) یک سیستم چندمتغیره غیر خطی با تزویج در فرم غیرهمراه است. سیستم ربات با دینامیک موتورها، بسیار پیچیده می‌باشد و کنترل و مدل‌سازی آن با مشکلاتی همراه است. با استفاده از تبدیل زیر، می‌توان معادله (۲-۶۲) را به فرم خطی‌سازی فیدبکی ورودی حالت تبدیل کرد:

$$\begin{aligned} z_1 &= x_1 \\ z_2 &= x_2 \\ z_3 &= (\mathrm{Jr}^{-1} + \mathrm{rD}(\mathrm{x}_1))^{-1}(K_m x_3 - (Br^{-1} + rC(x_1, x_2))x_2 - rG(x_1) - r\tau_f(x_2)) \end{aligned}$$ (۲-۶۵)

فرم همراه سیستم ربات با لحاظ کردن دینامیک موتورها به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= z_3 \\ \dot{z}_3 &= h(z_1, \mathrm{z}_2, \mathrm{z}_3) + (\mathrm{Jr}^{-1} + \mathrm{rD}(\mathrm{z}_1))^{-1} K_m L^{-1}(-\varphi + \mathrm{u}) \\ z &= \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} \end{aligned}$$ (۲-۶۶)

در رابطه بالا داریم:

(۲-۶۷)

$$\begin{aligned} &h(z_1, z_2, z_3) = \\ &\left(\frac{d}{dt}\left(Jr^{-1} + D(z_1)\right)^{-1}\right)\left(-\left(Br^{-1} + rC(z_1, z_2)\right)z_2 - rG(z_1) - r\tau_f(z_2)\right) + \\ &\left(\frac{d}{dt}\left(Jr^{-1} + D(z_1)\right)^{-1}\right)\left(\left(Jr^{-1} + rD(z_1)\right)z_3 + \left(Br^{-1} + rC(z_1, z_2)\right)z_2 + rG(z_1) + r\tau_f(z_2)\right) \\ &+\left(Jr^{-1} + D(z_1)\right)^{-1}\left(-r\dot{C}(z_1, z_2)z_2 - \left(Br^{-1} + rC(z_1, z_2)\right)z_3 - r\dot{G}(z_1) - r\dot{\tau}_f(z_2)\right) - \\ &\left(Jr^{-1} + D(z_1)\right)^{-1} L^{-1}R\left(\left(Jr^{-1} + rD(z_1)\right)z_3 + \left(Br^{-1} + rC(z_1, z_2)\right)z_2 + rG(z_1) + r\tau_f(z_2)\right) \\ &-\left(Jr^{-1} + D(z_1)\right)^{-1} K_m L^{-1} K_b r^{-1} z_2 \end{aligned}$$

بنابراین دینامیک سیستم ربات به کمک رابطه زیر قابل توصیف است.

$$\ddot{q} = h(q,\dot{q},\ddot{q}) + \left(Jr^{-1} + rD(\mathrm{q})\right)^{-1} K_m L^{-1}(-\varphi + u) \qquad (۶۸\text{-}۲)$$

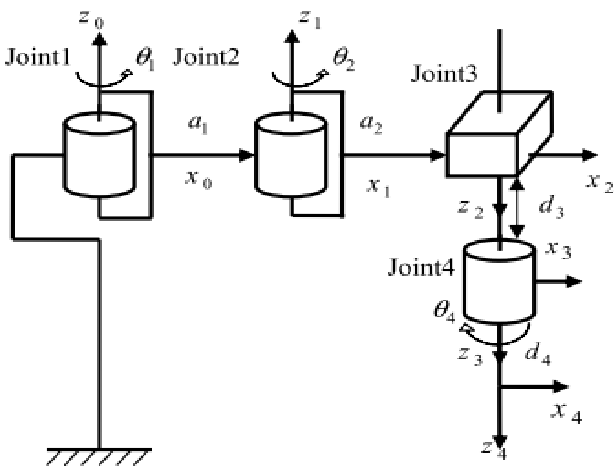
فرم همراه رابطه (۲-۶۶) ثابت می‌کند که سیستم کنترل‌پذیر است. زیرا ماتریس‌های $D(z_1)$، J، r، L و K_m مثبت هستند و در نتیجه ماتریس $\left(Jr^{-1} + rD(\mathrm{q})\right)$ وارون‌پذیر و مخالف صفر است. بنابراین $\left(Jr^{-1} + rD(q)\right)^{-1} K_m L^{-1} \neq 0$ می‌باشد، اگرچه فرم همراه سیستم ربات غیرخطی، با کوپلاژ و محاسبات پیچیده است.

۲-۳ مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی بازوی ربات صنعتی اسکارا

در این قسمت به مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی در بازوی ربات صنعتی اسکارا می‌پردازیم.

۲-۳-۱ مدل‌سازی سینماتیکی ربات اسکارا

ربات اسکارا که در صنعت مورد استفاده است، از سه مفصل لولایی و یک مفصل کشویی تشکیل می‌شود. شکل (۲-۱) دیاگرام مفصلی ربات اسکارا با ۴ رابط را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱) دیاگرام مفصلی بازوی ربات اسکارا با چهار رابط

دستگاه‌های مختصات بر اساس قوانین دناویت هارتنبرگ بر روی مفاصل ربات، مطابق شکل بالا قرار گرفته‌اند. پارامترهای متغیر و پارامترهای ثابت ربات در شکل (۲-۱) مشخص شده‌اند. باتوجه به دستگاه‌های مختصات تعیین شده، جدول (۲-۱) پارامترهای ربات را نشان می‌دهد[۴۴].

جدول (۲-۱) پارامترهای دناویت هارتنبرگ

$Link$	$\theta_i\,(rad)$	$d_i\,(m)$	$a_i\,(m)$	α_i (rad)
1	θ_1	0	$a_1 = 0.621$	0
2	θ_2	0	$a_2 = 1.064$	π
3	0	d_3	0	0
4	θ_4	$d_4 = 0.05$	0	0

به کمک معادلات (۲-۳) تا (۲-۶) ماتریس‌های تبدیل همگن A، متناسب با پارامترهای ربات در رابطه زیر بیان شده است.

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_{\theta_1} & -S_{\theta_1} & 0 & a_1 C_{\theta_1} \\ S_{\theta_1} & C_{\theta_1} & 0 & a_1 S_{\theta_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{۲-۶۹}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C_{\theta_2} & S_{\theta_2} & 0 & a_2 C_{\theta_2} \\ S_{\theta_2} & -C_{\theta_2} & 0 & a_2 S_{\theta_2} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{۲-۷۰}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{۲-۷۱}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C_{\theta_4} & -S_{\theta_4} & 0 & a_4 C_{\theta_4} \\ S_{\theta_4} & C_{\theta_4} & 0 & a_4 S_{\theta_4} \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۷۲\text{-}۲)$$

با توجه به روابط به دست آمده و در انتها برای نتیجه‌گیری کلی، با جایگذاری در معادله (۲-۳) رابطه زیر حاصل می‌گردد.

(۷۳-۲)

$$T_0^4 = \begin{bmatrix} \begin{matrix} C_{\theta_4}(C_{\theta_1}C_{\theta_2} - S_{\theta_1}S_{\theta_2}) \\ +S_{\theta_4}(C_{\theta_1}S_{\theta_2} + S_{\theta_1}C_{\theta_2}) \end{matrix} & \begin{matrix} -S_{\theta_4}(C_{\theta_1}C_{\theta_2} - S_{\theta_1}S_{\theta_2}) \\ +C_{\theta_4}(C_{\theta_1}S_{\theta_2} + S_{\theta_1}C_{\theta_2}) \end{matrix} & 0 & a_2(C_{\theta_1}C_{\theta_2} - S_{\theta_1}S_{\theta_2}) + a_1 C_{\theta_1} \\ \begin{matrix} C_{\theta_4}(C_{\theta_1}S_{\theta_2} + S_{\theta_1}C_{\theta_2}) \\ +S_{\theta_4}(\mathrm{S}_{\theta_1}S_{\theta_2} - C_{\theta_1}C_{\theta_2}) \end{matrix} & \begin{matrix} -S_{\theta_4}(C_{\theta_1}S_{\theta_2} + S_{\theta_1}C_{\theta_2}) \\ +C_{\theta_4}(\mathrm{S}_{\theta_1}S_{\theta_2} - C_{\theta_1}C_{\theta_2}) \end{matrix} & 0 & a_2(\mathrm{S}_{\theta_1}C_{\theta_2} + C_{\theta_1}S_{\theta_2}) + a_1 S_{\theta_1} \\ 0 & 0 & -1 & -d_4 - \theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

در رابطه بالا، نمادهای S و C نماینگر توابع Sin و Cos هستند که به صورت مختصر بیان شده‌اند.

۲-۳-۲ مدل‌سازی دینامیکی ربات اسکارا

در این بخش ابتدا ماتریس‌های تبدیل بازوی ربات را محاسبه نموده و سپس به کمک آن‌ها ماتریس‌های دوران، d، J_v، J_w و ماتریس D را به دست می‌آوریم. در گام بعدی انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی را محاسبه می‌کنیم. مدل دینامیکی بازوی ربات اسکارا به کمک معادله (۲-۵۵) به صورت زیر، قابل نمایش می‌باشد.

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (۷۴\text{-}۲)$$

اگر رابطه بالا را به صورت زیر بیان کنیم:

$$D=\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14}\\ D_{12} & D_{22} & D_{23} & D_{24}\\ D_{13} & D_{23} & D_{33} & D_{34}\\ D_{14} & D_{24} & D_{34} & D_{44}\end{bmatrix},\ C=\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14}\\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24}\\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34}\\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44}\end{bmatrix},\ G=\begin{bmatrix} G_1\\ G_2\\ G_3\\ G_4\end{bmatrix},\ q=\begin{bmatrix} q_1\\ q_2\\ q_3\\ q_4\end{bmatrix} \quad (۲-۷۵)$$

همچنین $[x_i \quad y_i \quad z_i]$ مختصات مرکز جرم رابط iام در دستگاه مختصات iام باشد، آنگاه نتایج زیر حاصل می‌گردد.

$$\begin{aligned}D_{11} = {} & 2m_1a_1x_1+2m_3a_2x_3+2m_2a_2x_2+m_1y_1^2+m_3x_3^2+m_3a_2^2+m_2a_2^2+m_3y_3^2+m_4a_2^2+m_3a_1^2\\ & +m_4x_4^2+m_1a_1^2+m_4a_1^2+m_1x_1^2+m_2a_1^2+m_2x_2^2+m_4y_4^2+m_2y_2^2+2m_2a_1x_2\cos(q_2)+\\ & 2m_3a_2a_1\cos(q_2)+I_{zz_2}+2m_3a_1y_3\sin(q_2)+2m_2a_2a_1\cos(q_2)-2m_4a_2y_4\sin(q_4)+I_{zz_4}\\ & +2m_4a_2x_4\cos(q_4)+2m_2a_1y_2\sin(q_2)+2m_3a_1x_3\cos(q_2)+2m_4a_2a_1\cos(q_2)+I_{zz_3}+\\ & 2m_4a_1x_4\cos(q_2-q_4)+I_{zz_1}+2m_4a_1y_4\sin(q_2-q_4)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}D_{12} = {} & 2m_3a_2x_3+2m_2a_2x_2+m_3x_3^2+m_3a_2^2+m_2a_2^2+m_3y_3^2+m_4a_2^2+m_4x_4^2+m_2x_2^2+m_4y_4^2+m_2y_2^2\\ & +m_2a_1x_2\cos(q_2)+m_3a_2a_1\cos(q_2)+m_3a_1y_3\sin(q_2)+m_2a_2a_1\cos(q_2)-2m_4a_2y_4\sin(q_4)\\ & +2m_4a_2x_4\cos(q_4)+m_2a_1y_2\sin(q_2)+m_3a_1x_3\cos(q_2)+m_4a_2a_1\cos(q_2)+I_{zz_3}\\ & +m_4a_1x_4\cos(q_2-q_4)+m_4a_1y_4\sin(q_2-q_4)+I_{zz_2}+I_{zz_4}\end{aligned}$$

$$D_{13}=0$$

$$\begin{aligned}D_{14} = {} & -m_4a_2x_4\cos(q_4)-m_4y_4^2-m_4a_1x_4\cos(q_2-q_4)-m_4a_1y_4\sin(q_2-q_4)+m_4a_2y_4\sin(q_4)\\ & -m_4x_4^2-I_{zz_4}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}D_{22} = {} & m_2y_2^2+2m_3a_2x_3+m_2x_2^2+2m_4a_2x_4\cos(q_4)+m_4y_4^2+m_4x_4^2+2m_2a_2x_2+\\ & I_{zz_3}-2m_4a_2y_4\sin(q_4)+m_3y_3^2+m_3a_2^2+m_4a_2^2+I_{zz_2}+I_{zz_4}+m_3x_3^2+m_2a_2^2\end{aligned}$$

$$D_{23}=0$$

$$D_{24}=-m_4a_2x_4\cos(q_4)-m_4y_4^2-m_4x_4^2+m_4a_2y_4\sin(q_4)-I_{zz_4}$$

$$D_{33}=m_3+m_4$$

$$D_{34}=0$$

$$D_{44}=m_4y_4^2+m_4x_4^2+I_{zz_4}$$

$$
\begin{aligned}
C_{11} = &-\dot{q}_2 m_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) + \dot{q}_2 m_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) + \dot{q}_2 m_2 a_1 y_2 \cos(q_2) - \\
&\dot{q}_2 m_2 a_1 x_2 \sin(q_2) - \dot{q}_2 m_2 a_2 a_1 \sin(q_2) - \dot{q}_2 m_4 a_2 a_1 \sin(q_2) - \dot{q}_2 m_3 a_2 a_1 \sin(q_2) + \\
&\dot{q}_2 m_3 a_1 y_3 \cos(q_2) - \dot{q}_2 m_3 a_1 x_3 \sin(q_2) - \dot{q}_4 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4) - \dot{q}_4 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) \\
&- \dot{q}_4 m_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) + \dot{q}_4 m_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
C_{12} = &-\dot{q}_1 m_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) + \dot{q}_1 m_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) + \dot{q}_1 m_2 a_1 y_2 \cos(q_2) - \\
&\dot{q}_1 m_2 a_1 x_2 \sin(q_2) - \dot{q}_1 m_2 a_1 a_2 \sin(q_2) - \dot{q}_1 m_4 a_1 a_2 \sin(q_2) - \dot{q}_1 m_3 a_2 a_1 \sin(q_2) \\
&+ \dot{q}_1 m_3 a_1 y_3 \cos(q_2) - \dot{q}_1 m_3 a_1 x_3 \sin(q_2) - \dot{q}_2 m_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) \\
&- \dot{q}_2 m_2 a_2 a_1 \sin(q_2) - \dot{q}_2 m_4 a_2 a_1 \sin(q_2) \; - \dot{q}_4 m_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) \\
&- \dot{q}_2 m_3 a_1 x_3 \sin(q_2) + \dot{q}_4 m_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) - \dot{q}_2 m_3 a_2 a_1 \sin(q_2) \\
&- \dot{q}_4 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4) + \dot{q}_2 m_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) \; + \dot{q}_2 m_2 a_1 y_2 \cos(q_2) \\
&+ \dot{q}_2 m_3 a_1 y_3 \cos(q_2) - \dot{q}_4 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_2 m_2 a_1 x_2 \sin(q_2)
\end{aligned}
$$

$$C_{13} = 0$$

$$
\begin{aligned}
C_{14} = m_4(&\dot{q}_1 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) - \dot{q}_1 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) - \dot{q}_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) \\
&- \dot{q}_2 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) - \dot{q}_2 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_2 a_2 y_4 \cos(q_4) - \dot{q}_1 a_2 x_4 \sin(q_4) \\
&+ \dot{q}_4 a_2 x_4 \sin(q_4) + \dot{q}_4 a_2 y_4 \cos(q_4) - \dot{q}_1 a_2 y_4 \cos(q_4) + \dot{q}_2 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) \\
&+ \dot{q}_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4))
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
C_{21} = &\dot{q}_1 m_4 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) - \dot{q}_1 m_4 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) - \dot{q}_1 m_2 a_1 y_2 \cos(q_2) \\
&+ \dot{q}_1 m_2 a_1 a_2 \sin(q_2) + \dot{q}_1 m_4 a_1 a_2 \sin(q_2) + \dot{q}_1 m_3 a_1 a_2 \sin(q_2) - \dot{q}_1 m_3 a_1 y_3 \cos(q_2) \\
&- \dot{q}_4 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_4 m_4 a_2 y_4 dq4 * m4 * a2 * yc4 * \cos(q_4) \\
&+ \dot{q}_1 m_2 a_1 x_2 \sin(q_2) + \dot{q}_1 m_3 a_1 x_3 \sin(q_2)
\end{aligned}
$$

$$C_{22} = -\dot{q}_4 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_4 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4)$$

$$C_{23} = 0$$

$$
\begin{aligned}
C_{24} = &-\dot{q}_1 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_1 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4) - \dot{q}_2 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) \\
&+ \dot{q}_4 m_4 a_2 x_4 \sin(q_4) + \dot{q}_4 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4) - \dot{q}_2 m_4 a_2 y_4 \cos(q_4)
\end{aligned}
$$

$$C_{31} = C_{32} = C_{33} = C_{34} = 0$$

$$
\begin{aligned}
C_{41} = -m_4(&\dot{q}_1 a_1 x_4 \sin(q_2 - q_4) - \dot{q}_1 a_1 y_4 \cos(q_2 - q_4) - \dot{q}_1 a_2 x_4 \sin(q_4) \\
&- \dot{q}_2 a_2 y_4 \cos(q_4) - \dot{q}_1 a_2 y_4 \cos(q_4) - \dot{q}_2 a_2 x_4 \sin(q_4))
\end{aligned}
$$

$$C_{42} = m_4 a_2 (\dot{q}_1 x_4 \sin(q_4) + \dot{q}_1 y_4 \cos(q_4) + \dot{q}_2 x_4 \sin(q_2) + \dot{q}_2 y_4 \cos(q_4))$$

$$C_{43} = C_{44} = 0$$

$G_1 = G_2 = 0$

$G_3 = -9.81m_3 - 9.81m_4$

$G_4 = 0$

پارامترهای ماتریس اینرسی و موقعیت مرکز جرم رابطها، در جدول (۲-۲) آورده شده است[۴۴].
معادلات دینامیکی بیان‌گر این مطلب هستند که مدل دینامیکی ربات پیچیده، چندمتغیره و با تزویج می‌باشد.

جدول (۲-۲) پارامترهای دینامیکی بازوی ربات اسکارا

i	x_i (m)	y_i (m)	z_i (m)	m_i (kg)	I_{xxi} (kgm^2)	I_{yyi} (kgm^2)	I_{zzi} (kgm^2)	I_{xyi} (kgm^2)	I_{xzi} (kgm^2)	I_{yzi} (kgm^2)
1	-0.308	-0.0014	-0.144	25.23	1.62	7.31	7.60	0.026	-0.002	0.0001
2	-0.673	0.0011	-0.195	15.81	3.74	22.64	21.68	0.013	2.099	-0.001
3	0	0	-0.540	6.61	1.63	1.63	0.040	0	-0.0004	0
4	0	0	-0.025	0.106	0.0003	0.0003	0.0004	0	0	0

فصل ۳: کنترل امپدانس ربات اسکارا با راهبرد کنترل ولتاژ به منظور تزریق سلولی

امام علی (ع) فرموده‌اند: عقل که غریزه‌ی اختصاصی انسان و از سرمایه‌های طبیعی بشر است، با علم آموزی و تجربه اندوزی افزایش می‌یابد.

غررالحکم، صفحه ٦٧

۳–۱ مقدمه

امروزه به‌کارگیری ربات‌ها در علم پزشکی، خدمات شهری و نظافتکاری[1][۴۵] به صورت چشم‌گیری رشد کرده است. اعمال کنترل موقعیت به تنهایی، با سختی‌هایی همانند نامعینی در ابعاد قطعه، موقعیت آن و سختی قطعات مواجه می‌گردد. نامعینی این پارامترها سبب می‌شود تا نیروی اعمالی[2] به محیط در نقطه تماس، بیشتر یا کمتر از مقدار مورد نیاز باشد[۴۶].

تاکنون کنترل امپدانس در ربات اسکارا با دو درجه آزادی، مورد آزمایش قرار گرفته است. در این حالت کنترل نیرو با یک کنترل‌کننده تناسبی- مشتقی و کنترل موقعیت به کمک روش تطبیقی[3] شبیه‌سازی شد[۴۶]. پس از آن یک شرکت ساخت ربات‌های کمک‌رسان[4] به بیماران تحت درمان، به کنترل نیرو و موقعیت هم‌زمان در یک ربات صنعتی پرداخت. در روش پیشنهادی مطرح شده، کنترل نیرو به خوبی محقق گردید[۴۷]. کنترل نیرو به باتوجه به کاربرد خاص برخی ربات‌ها گاهی نیاز به آشکارسازی برخورد ربات با محیط است. در این حالت ربات با خطای بسیار کمی، نقطه برخورد با محیط را به درستی تشخیص می‌دهد[۴۸].

در تحقیقات اخیر، کنترل به صفحه اعمال می‌شود[۴۹]. حال در این پایان‌نامه بازوی ربات اسکارا به عنوان ابزار تزریق، کنترل می‌شود که نیروی مطلوب ربات، یک نیروی متغیر با زمان[5] است. مدل امپدانس ربات، با روش تونن[6] بیان شده و پارامترهای مدل محیط توسط مدل غیرخطی پیشنهادی، تخمین زده می‌شود و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا[7] بهینه می‌گردد. شبیه‌سازی‌های طرح پیشنهادی، کارایی مطلوب این روش کنترلی را به خوبی نشان می‌دهد.

[1] Cleaning Robot
[2] Exerted Force
[3] Adaptive
[4] Auxiliary
[5] Time varying
[6] Thevenin model
[7] RLS

۳-۲ معادلات دینامیکی ربات

بازوی ربات از n رابط که به وسیله n مفصل به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل می‌شود. هر رابط به وسیله یک موتور dc مغناطیس دائم، راه‌اندازی می‌گردد. معادلات دینامیکی ربات با فرض عدم وجود انعطاف‌پذیری در مفاصل، به صورت معادله (۳-۱) قابل بیان است[۴۴].

$$D(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+g(q)+J^T(q)F_e=\tau_r \qquad (۳\text{-}۱)$$

که در آن $q \in R^n$ بردار موقعیت مفاصل ربات، $D(q) \in R^{n\times n}$ ماتریس اینرسی ربات، $C(q,\dot{q})\dot{q} \in R^n$ بردار گشتاورهای کوریولیس، $g(q) \in R^n$ بردار گشتاورهای گرانشی، $F_e \in R^m$ ماتریس نیروی وارده در نقطه تماس و $\tau_r \in R^n$ بردار گشتاور ربات نامیده می‌شود. هم‌چنین $J(q) \in R^{m\times n}$ ماتریس ژاکوبین ربات می‌باشد. این ماتریس یک انتقال از فضای مفصلی به فضای کار است. رابطه ماتریس ژاکوبین به صورت زیر قابل بیان است[۴۴].

$$\dot{x}=J(q)\dot{q} \qquad (۳\text{-}۲)$$

که در آن $x \in R^m$ موقعیت نقطه انتهایی ربات نامیده می‌شود. با مشتق‌گیری از طرفین رابطه (۳-۲) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\ddot{x}=\dot{J}(q)\dot{q}+J(q)\ddot{q} \qquad (۳\text{-}۳)$$

بنابراین $\ddot{q}$ از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\ddot{q}=J(q)^{-1}(\ddot{x}-\dot{J}(q)\dot{q}) \qquad (۳\text{-}۴)$$

ماتریس $J(q)^{-1}$ اگر غیرتکین بوده و $m=n$ باشد، وجود دارد[۴۴]. با جایگذاری رابطه (۳-۴) در رابطه (۳-۱) داریم:

$$D(q)J(q)^{-1}\ddot{x}+h(q,\dot{q})+J^T(q)F_e=\tau_r \qquad (۳\text{-}۵)$$

که در رابطه (۳-۵) مقدار $h(q,\dot{q})$ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$h(q,\dot{q}) = -D(q)J(q)^{-1}\dot{J}(q)\dot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) \tag{۳-۶}$$

موتورهای الکتریکی، گشتاور مفاصل ربات را بر طبق رابطه زیر به وجود می‌آورند[۴۴].

$$J_m r^{-1}\ddot{q} + B_m r^{-1}\dot{q} + r\tau_r = \tau_m \tag{۳-۷}$$

که در این رابطه $\tau_m \in R^n$ بردار گشتاور موتورها، J_m، B_m و r ماتریس‌های قطری $n \times n$ هستند، که به ترتیب ضرایب اینرسی، میرایی و کاهشی چرخ‌دنده موتورها نام دارند. بردار سرعت مفاصل $\dot{q}$ و سرعت موتورها $\dot{\theta}_m \in R^n$ توسط چرخ‌دنده‌ها به کمک رابطه زیر به یکدیگر مرتبط می‌شوند[۴۴].

$$\dot{q} = r\dot{\theta}_m \tag{۳-۸}$$

به منظور تأمین ولتاژ موتورها به عنوان ورودی سیستم، بایستی معادله الکتریکی موتورهای جریان مستقیم با جاروبک مغناطیسی در نمایش ماتریسی به صورت زیر منظور گردد[۴۴].

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1}\dot{q} = u \tag{۳-۹}$$

که در آن $u \in R^n$ بردار ولتاژ موتورها، $I_a \in R^n$ بردار جریان موتورها، R ، L و K_b که به ترتیب بیان‌گر ماتریس‌های قطری $n \times n$ برای ضرایب مقاومت آرمیچر، اثر تزویج و جریان بازگشتی می‌باشند. بردار گشتاور موتورها τ_m به عنوان ورودی معادله دینامیکی (۳-۷) توسط جریان موتورها بر طبق رابطه زیر به دست می‌آید[۴۴].

$$\tau_m = K_m I_a \tag{۳-۱۰}$$

که در این رابطه K_m یک ماتریس قطری ثابت گشتاور است. مدل فضای حالت موتورهای الکتریکی ربات را با استفاده از معادله (۳-۱) و رابطه (۳-۱۰) می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$\dot{z} = f(z) + bw \tag{۳-۱۱}$$

در این رابطه $w = \begin{bmatrix} F_e \\ u \end{bmatrix}$ به عنوان ورودی سیستم لحاظ می‌گردد و $z = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ I_a \end{bmatrix}$ متغیرهای حالت هستند. هم‌چنین b و $f(z)$ به صورت زیر قابل بیان می‌باشند.

$$f(z) = \begin{bmatrix} z_2 \\ (J_m r^{-1} + rD(z_1))^{-1}(-(B_m r^{-1} + rC(z_1, z_2))z_2 - rg(z_1) + K_m z_3) \\ -L^{-1}(K_b r^{-1} z_2 + Rz_3) \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -(J_m r^{-1} + rD(z_1))^{-1} rJ^T(z_1) & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{bmatrix} \qquad (۱۲\text{-}۳)$$

معادله فضای حالت (۳-۱۲) یک سیستم چندمتغیره غیرخطی با اثر متقابل را به نمایش گذاشته است. حال گاهی نیاز است که بردار موقعیت مفاصل ربات، از طریق نقطه انتهایی ربات محاسبه گردد. با استفاده از ماتریس ژاکوبین رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{x} \qquad (۱۳\text{-}۳)$$

بنابراین ورودی سیستم که همان ولتاژ موتورهای الکتریکی هستند، به کمک معادله الکتریکی موتورهای جریان مستقیم با جاروبک مغناطیسی به صورت زیر تأمین می‌گردد. این رابطه نهایی به کمک روابط (۳-۹) و (۳-۱۳) به دست می‌آید.

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} J^{-1}(q)\dot{x} = u \qquad (۱۴\text{-}۳)$$

۳-۳ کنترل امپدانس ربات با راهبرد ولتاژ

کنترل امپدانس که توسط هوگان[۲۴] معرفی شده، بر مبنای کنترل گشتاور می‌باشد. در این قسمت یک روش جدید کنترل امپدانس مبتنی بر راهبرد ولتاژ که از مدل دینامیکی ربات آزاد است، بیان می‌شود. این طرح امپدانس بر مبنای مدل تونن در روش مدار، طراحی شده است. هدف از کنترل امپدانس این است که سیستم ربات به گونه‌ای کنترل شود، که بتواند یک رفتار دینامیکی مطلوب در

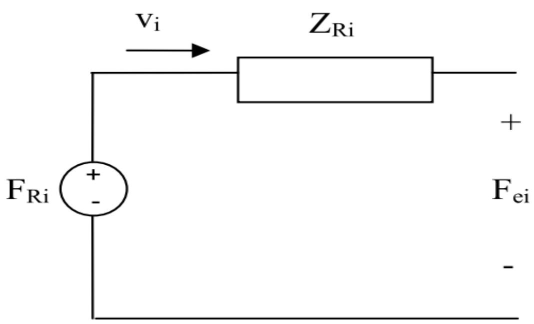
نقطه تماس با محیط، از خود نشان دهد. رفتار دینامیکی مطلوب سیستم ربات نسبت به محیط به صورت امپدانس مطلوب در حوزه لاپلاس، در رابطه زیر قابل بیان است[۴۴].

$$F_{Ri}(s) - Z_{Ri}(s)\, v_i(s) = F_{ei}(s) \qquad (۱۵\text{-}۳)$$

که در آن $F_{Ri}(s)$ نیروی مطلوب و $Z_{Ri}(s)$ امپدانس مطلوب نام دارد. هم‌چنین $v_i(s)$ که iامین عنصر $v(s)$ است، به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$v(s) = sx(s) \qquad (۱۶\text{-}۳)$$

مدل امپدانس (۳-۱۵) با مدار تونن در شکل (۳-۱) قابل مشاهده است[۴۴].



شکل (۳-۱) مدار تونن امپدانس مطلوب

در مدار تونن شکل (۳-۱) منبع $F_{Ri}(s)$منبع تونن و $Z_{Ri}(s)$ امپدانس تونن است. امپدانس مطلوب توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد[۴۴].

$$Z_{Ri}(s) = M_{Ri}s + B_{Ri} + \frac{K_{Ri}}{s} \qquad (۱۷\text{-}۳)$$

که در آن M_{Ri}، B_{Ri} و K_{Ri} به ترتیب ضریب اینرسی، اصطکاک و سختی مطلوب نام دارند. بنابراین کنترل‌کننده بایستی به گونه‌ای عمل نماید، که سیستم ربات و کنترل‌گر با یکدیگر، به عنوان امپدانس مطلوب بیان شوند[۴۴]. امپدانس مطلوب را به کمک روابط (۳-۱۵)، (۳-۱۶) و (۳-۱۷) به صورت زیر می‌توان بیان نمود:

$$F_{Ri}(s) - F_{ei}(s) = (M_{Ri}s^2 + B_{Ri}s + K_{Ri})x_i(s) \qquad (۳-۱۸)$$

نیروی مطلوب $F_{Ri}(s)$ در کنترل امپدانس نقش مهمی دارد. پس رابطه زیر را تعریف می‌کنیم[۴۴].

$$F_{Ri}(s) = Z_{Ri}(s)v_{di}(s) \qquad (۳-۱۹)$$

که در آن $v_{di}(s)$ سرعت مطلوب است. به کمک روابط (۳-۱۷) و (۳-۱۹) در حوزه لاپلاس داریم:

$$F_{Ri}(s) = (M_{Ri}s^2 + B_{Ri}s + K_{Ri})x_{di}(s) \qquad (۳-۲۰)$$

رابطه بالا از حوزه لاپلاس به حوزه زمان به صورت زیر انتقال می‌یابد.

$$F_{Ri} = M_{Ri}\ddot{x}_{di} + B_{Ri}\dot{x}_{di} + K_{Ri}x_{di} \qquad (۳-۲۱)$$

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

$$F_R = M_R\ddot{x}_d + B_R\dot{x}_d + K_Rx_d \qquad (۳-۲۲)$$

که در آن M_R، B_R و K_R به ترتیب ضریب اینرسی، اصطکاک و سختی مطلوب نام دارند. مدل امپدانس مطلوب بر طبق رابطه (۳-۱۸) در حالتی که $M_{Ri} = 0$ [۴۴] منظور گردد، به صورت زیر خواهد بود.

$$F_{Ri}(s) - F_{ei}(s) = (B_{Ri}s + K_{Ri})x_i(s) \qquad (۳-۲۳)$$

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

$$\dot{x}_i = -B_{Ri}^{-1}K_{Ri}x_i - B_{Ri}^{-1}F_{ei} + B_{Ri}^{-1}F_{Ri} \qquad (۳-۲۴)$$

با استفاده از معادلات اسکالر برای $i = 1,...,n$ معادله ماتریسی به صورت زیر خواهد بود.

$$\dot{x} = -B_R^{-1}K_Rx - B_R^{-1}F_e + B_R^{-1}F_R \qquad (۳-۲۵)$$

با جایگذاری رابطه (۳-۲۲) برای $M_R = 0$ [۴۴] در رابطه (۳-۲۵) رابطه نهایی به صورت زیر است:

$$\dot{x} = \dot{x}_d + B_R^{-1}K_R(x_d - x) - B_R^{-1}F_e \qquad (۳-۲۶)$$

قانون کنترل‌کننده امپدانس که بر پایه قانون امپدانس (۳-۲۲) پایه گزاری شده است، با جایگذاری رابطه (۳-۲۶) در رابطه (۳-۱۴) به صورت زیر خواهد بود. بر طبق این رابطه به کنترل امپدانس ربات، با استفاده از راهبرد ولتاژ موتورها پرداخته می‌شود.

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} J^{-1}(q)(\dot{x}_d + B_R^{-1} K_R (x_d - x) - B_R^{-1} F_e) = u \tag{۳-۲۷}$$

این قانون کنترل امپدانس پیشنهادی، به بازخورد موقعیت نقطه انتهایی ربات x، موقعیت مفاصل ربات q، جریان I_a، مشتق جریان $\dot{I}_a$ و نیروی برخورد F_e نیاز دارد. این قانون کنترل از دینامیک ربات آزاد است، بنابراین دارای محاسبات ساده است و در برابر نامعینی دینامیک ربات، رفتاری مقاوم از خود نشان می‌دهد. هنگامی‌که سیستم رباتیک با محیط برخوردی نداشته باشد، به معنای دیگر $F_{ei}(s) = 0$ باشد، برطبق رابطه (۲۶) برای $M_{Ri} = 0$ داریم:

$$(B_{Ri} s + K_{Ri})(x_{di}(s) - x_i(s)) = 0 \tag{۳-۲۸}$$

پارامترهای کنترلی B_{Ri} و K_{Ri} به گونه‌ای انتخاب می‌شوند، تا به ردگیری مطلوب برسند. اگر ریشه $B_{Ri} s + K_{Ri}$ در سمت چپ صفحه s باشد، هنگامی‌که $t \to \infty$ داریم $x_i \to x_{di}$. بنابراین سیستم کنترل امپدانس به عنوان کنترل موقعیت، نقش ایفا می‌کند[۴۴].

۳–۴ مدل‌سازی محیط به شکل سلول تحت تزریق

بر طبق آزمایشات انجام شده، یک رابطه بین نیروی تزریق و تغییر شکل پوسته بیان می‌شود. این شیوه از مدل‌سازی سلول به صورت فنر که روشی ساده است، به صورت زیر می‌باشد[۲۸].

$$F_e = K_e (x - x_e) \tag{۳-۲۹}$$

که در این رابطه K_e سختی محیط، x_e موقعیت پوسته سلول که تغییر شکل نداده و x موقعیت نقطه انتهایی تزریق‌کننده، که در این حالت سلول تغییر شکل یافته می‌باشد[۴۰].

تاکنون از بازوی ربات $PUMA\,560$، در شبیه‌سازی ابزار تزریق سلولی با کنترل مقاوم استفاده شده است. مشکل روش مطرح شده این است که؛ کنترل در فضای گشتاور است و خطای نیروی سیستم تزریق به مدت نیم ثانیه، مقدار زیادی در حدود ۴ نیوتون است[۲۸].

در فرآیند تزریق وقتی نیرو به طور غیرخطی افزایش یابد، دیواره سلولی هم تغییر شکل زیادی می‌دهد. هنگامی‌که نوک ابزار تزریق‌کننده داخل سلول شود، دیواره سلولی پاره شده و نیروی زیادی به طور ناگهانی به سلول اعمال می‌گردد. پس در این حالت یک سیگنال برای توقف نیرو به کنترل کننده ارسال می‌شود، تا به سلول آسیب نرسد. در این حالت می‌توان مدل سلول را به کمک معادله چندجمله‌ای درجه دو بیان نمود[۱].

$$F_e = Ax^2 + Bx \qquad (۳-۳۰)$$

در این رابطه F_e نیروی تماس و A و B ضرایب عبارت درجه دو و عبارت خطی هستند. تابع هزینه J که بایستی مقدار آن را کمینه کرد، به صورت زیر تعیین می‌گردد[۱].

$$J = \int_0^t e^{-\lambda(t-r)} [y(r) - w(r)\,\hat{a}(t)]^2 dr \qquad (۳-۳۱)$$

در این حالت $w^T = \begin{bmatrix} x^2 \\ x \end{bmatrix}$، $y = F_e$ و $\hat{a} = \begin{bmatrix} \hat{A} \\ \hat{B} \end{bmatrix}$ است، که $\hat{A}$ و $\hat{B}$ مقادیر تخمین زده از A و B می‌باشند. در این محاسبات، $\lambda = 0.9$ یک مقدار ثابت به نام فاکتور فراموشی است. قانون به‌روزرسانی از طریق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد[۱].

$$\dot{\hat{a}}(t) = -p(t)\, w^T e(t) \qquad (۳-۳۲)$$

که در این رابطه داریم:

$$e(t) = \hat{a}^T(t)\, w^T - y(t) \qquad (۳-۳۳)$$

قانون به‌روزرسانی بهره به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{d}{dt}[p] = -\lambda p - p w^T w p \qquad (۳-۳۴)$$

$$p(0)=\begin{bmatrix}\kappa & 0\\ 0 & \kappa\end{bmatrix} \qquad (۳-۳۵)$$

در این روابط مقادیر اولیه باتوجه به شرایط سیستم، تعیین می‌گردد[۱].

۳–۵ شبیه‌سازی سیستم کنترلی

در این قسمت به شبیه‌سازی قانون کنترل امپدانس ولتاژ (۳-۲۷) برای بازوی سه رابطی ربات اسکارا می‌پردازیم. هر رابط به وسیله یک موتور DC مغناطیس دائم تحریک می‌شود. این شبیه‌سازی با طول گام ۰,۰۰۱ در مدت زمان ۱۰ ثانیه انجام شده است. پارامترهای دناویت هارتنبرگ، مشخصه‌های دینامیکی ربات، مدل دینامیکی ربات اسکارا و پارامترهای موتورها[۴۴] اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی هستند، و مدل ربات توسط رابطه (۳-۵) به دست می‌آید.

با توجه به کاربرد ربات اسکارا در این تحقیق، مسیر مطلوب موقعیت که $x_d=\begin{bmatrix}x_{d1} & x_{d2} & x_{d3}\end{bmatrix}^T$ نام دارد، در شکل (۳-۲) قابل مشاهده است. این مسیر نرم و حداقل تا درجه دو مشتق‌پذیر را، به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

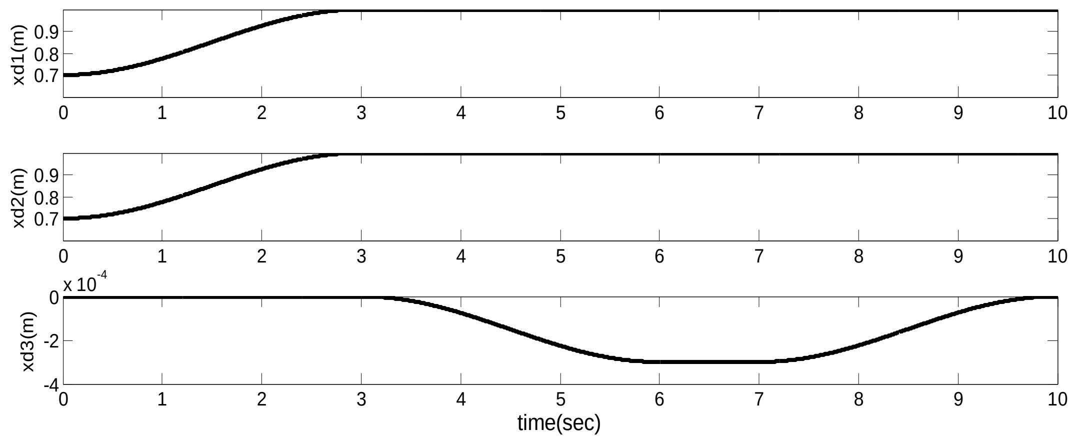
$$x_{d1}=\begin{cases}0.85-0.15\cos(\pi t/3) & 0\le t<3\\ 1 & 3\le t<10\end{cases}$$

$$x_{d2}=x_{d1} \qquad (۳-۳۶)$$

$$x_{d3}=\begin{cases}0 & 0\le t<3\\ 0.001(-0.15)(1+\cos(\pi t/3)) & 3\le t<6\\ 0.001(-0.3) & 6\le t<7\\ 0.001(-0.15)(1-\cos(\pi t/3)) & 7\le t<10\end{cases}$$

ابتدا مسیر ردگیری مطلوب را به گونه‌ای برای ربات در نظر می‌گیریم، که در قبل از زمان ۴ ثانیه از موقعیت ابتدایی بر روی سلول قرار گرفته و از زمان ۴ ثانیه فرآیند تزریق سلولی آغاز شود. در محور x و y کنترل موقعیت و در محور z کنترل نیرو اعمال می‌گردد. به دلیل کوچک بودن ابعاد قطر سلول که حدود ۵۰۰ میکرومتر است[۱]، جابجایی در محور z متناسب سایز سلول تعیین می‌شود. در این

شرایط مختصات نقطه برخورد ربات با محیط، در زمان ۴ ثانیه به صورت $x_e = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -7.49\times 10^{-5} \end{bmatrix}^T$ قابل بیان است.



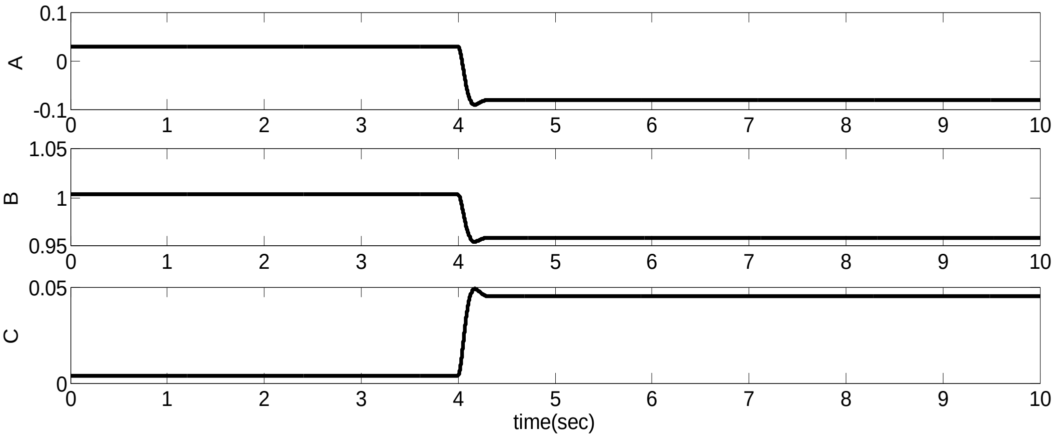
شکل (۳-۲) مسیر مطلوب موقعیت

مدل امپدانس ربات اسکارا طبق رابطه (۳-۲۲) به دست می‌آید. باتوجه به کاربرد ربات در سیستم تزریق سلولی که $M_{Ri}=0$ است، ضرایب $B_{Ri}=100Ns/m$ و $K_{Ri}=10000N/m$ برای $i=1,2,3$ لحاظ می‌شود. در این حالت ابتدا ربات را در یک نقطه اولیه، به مختصات $x_0 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.7 & 0 \end{bmatrix}^T m$ قرار می‌دهیم. این نقطه بر اساس موقعیت صفحه سلولی تعیین می‌گردد. مدل‌سازی محیط به کمک رابطه (۳-۳۰) به صورت معادله چندجمله‌ای درجه دو دارای دقت مناسبی است، اما اگر مدل غیرخطی آن تغییر یابد، نتایج حاصل از آن به مدل واقعی نزدیک‌تر است[۱]. در این پایان‌نامه، محیط را به کمک معادله غیرخطی زیر، پیشنهاد می‌کنیم.

$$F_e = Ax_3^2 + Bx_3 + C\sin(x_3) \quad (۳۷-۳)$$

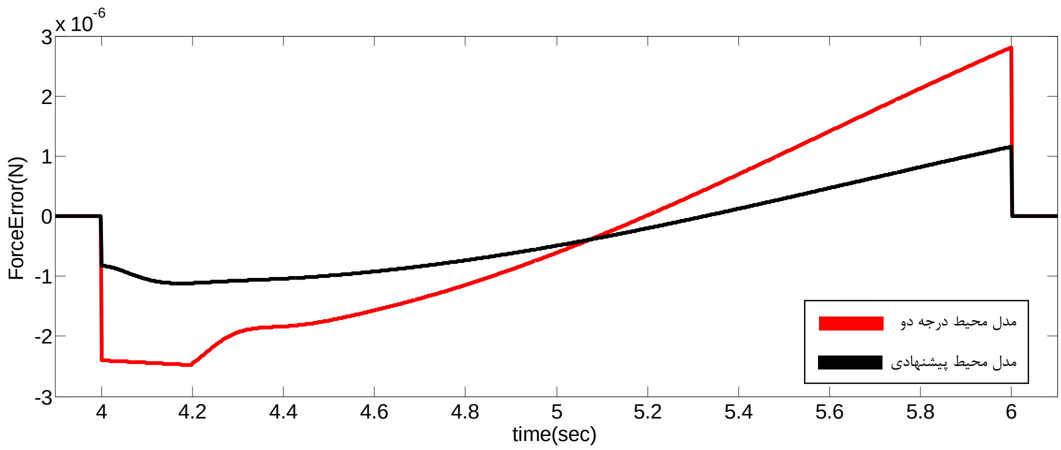
در این حالت تابع هزینه همان رابطه (۳-۳۱) است و $w=[x^2 \quad x \quad \sin(x)]$، $y=F_e$ و $\hat{a}=\begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} & \hat{C} \end{bmatrix}^T$، $\hat{A}$، $\hat{B}$ و $\hat{C}$ مقادیر تخمینی A، B و C هستند. فاکتور فراموشی $\lambda=0.9$ در نظر گرفته شد. قانون به روزرسانی پارامترها بر طبق رابطه (۳-۳۲)، (۳-۳۳) و (۳-۳۴) لحاظ می‌شود.

به دلیل شروع فرایند تزریق از لحظه ۴ به بعد، تخمین پارامترها هم از این لحظه به روز می‌شود. شکل (۳-۳) تخمین پارامترهای مدل محیط را نشان می‌دهد.



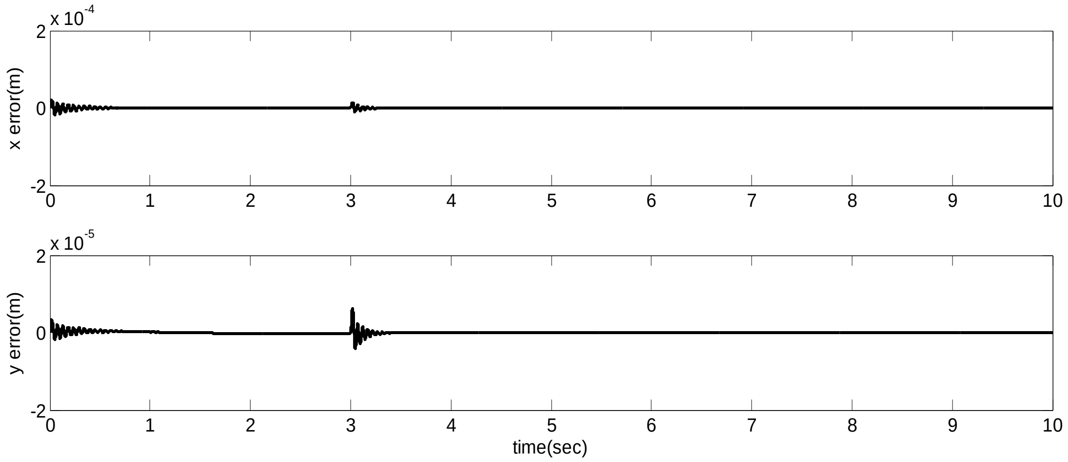
شکل (۳-۳) تخمین پارامترهای A، B و C

به دلیل برخورد ربات با محیط، در نقطه تماس نوسان کمی ایجاد می‌شود. با توجه با اینکه ابعاد سلول در حد میکرون است، استفاده از یک تابع سینوسی باعث کاهش خطای نیرو و نزدیک‌تر شدن مدل پیشنهادی به مدل واقعی می‌گردد. کارایی مدل محیط پیشنهادی در کاهش خطای نیروی وارده از سوی ربات به محیط، در شکل (۳-۴) قابل مشاهده است. میزان خطای نیرو در قبل از زمان ۴ ثانیه و بعد از زمان ۶ ثانیه، در هر دو نمودار صفر است.



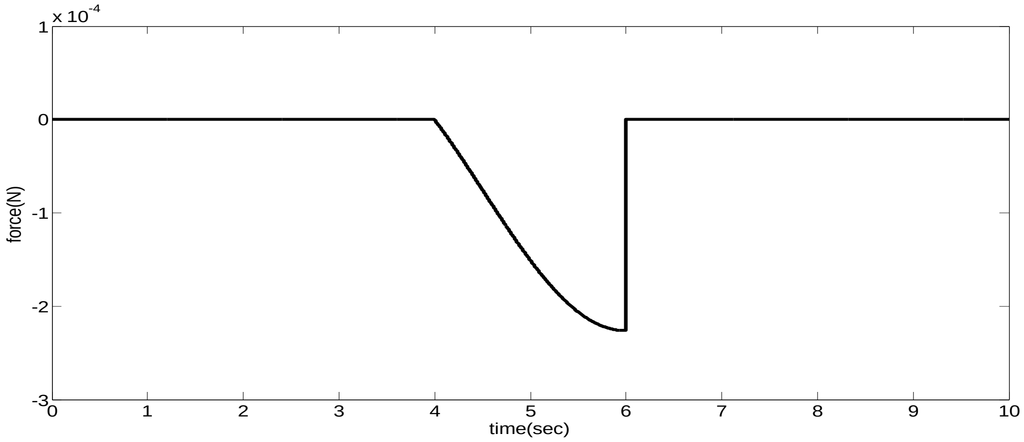
شکل (۳-۴) کاهش خطای نیرو در مدل محیط پیشنهادی

با توجه به کاربرد اسکارا در تزریق سلولی، در محور x و y کنترل موقعیت داریم. همانطور که در شکل (۳-۵) مشاهده می‌شود، ردگیری به خوبی محقق شده است و خطای موقعیت در این دو محور حداکثر $m\ \left[2\times10^{-5} \quad 6\times10^{-6}\right]^T$ می‌باشد.



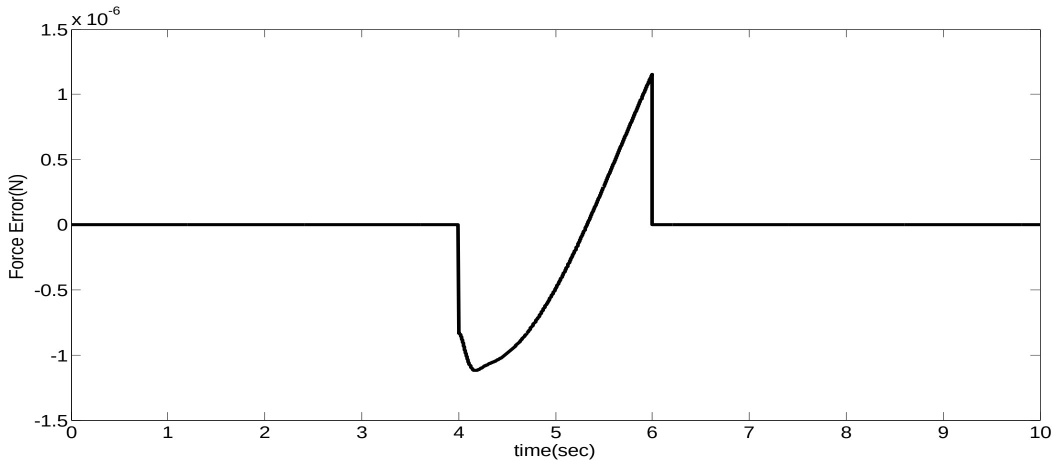
شکل (۳-۵) خطای ردگیری موقعیت

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 می‌شود. مدت زمان تزریق بین ۴ تا ۶ 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 ۶ تا ۷ ثانیه به سلول وارد می‌گردد. سپس ربات مسیر بازگشت به نقطه اولیه خود را طی می‌کند. نیروی محیط به ربات در شکل (۳-۶) آمده است.



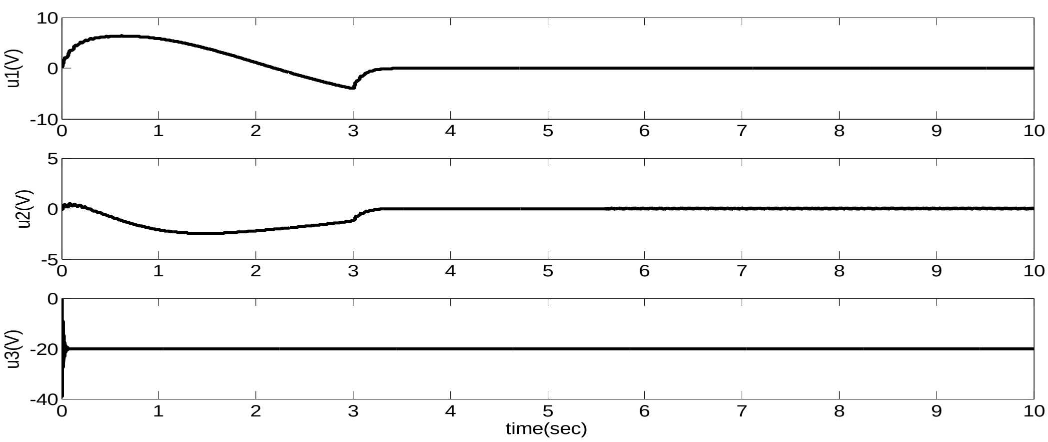
شکل (۳-۶) نیروی اعمالی در نقطه برخورد

هدف این است که؛ با توجه به مدل پیشنهادی امپدانس ربات و محیط، نیروی F_e تا حدامکان به نیروی مطلوب ربات نزدیک باشد. بر طبق مطالعاتی که در زمینه تزریق سلولی انجام شده، حداکثر خطای این طرح پیشنهادی کنترلی 12×10^{-7} نیوتون است، که مقدار مطلوبی می‌باشد. خطای نیروی اعمالی در محور z در شکل (۳-۷) قابل مشاهده است.



شکل (۳-۷) خطای نیروی اعمالی

ولتاژ موتورها در مقدارهای اسمی، رفتار بسیار مطلوبی دارند. موتور ۳ دارای ولتاژ ۲۰- ولت برای اعمال به نقطه برخورد است. در حالی‌که موتور ۱ و ۲ در زمان شروع فرآیند تزریق تقریبا ولتاژی ندارند، زیرا باری بر روی مفاصل آن‌ها نیست. نمودار ولتاژ موتورها در شکل (۳-۸) قابل مشاهده است.



شکل (۳-۸) ولتاژ موتورها

۳-۶ نتیجه‌گیری

کنترل امپدانس که به طور معمول تاکنون استفاده شده، بر مبنای کنترل گشتاور است. مشکل روش کنترل گشتاور این است که؛ نمی‌توان به صورت مستقیم، فرمان کنترل گشتاور را به ورودی‌های محرکه‌ها برای تحریک بازوی ربات اعمال کرد. روش کنترلی پیشنهادی بر این مشکل غلبه می‌کند، زیرا از مدل دینامیکی ربات آزاد است. بنابراین این روش ساده‌تر، با محاسبات کمتر و موثرتر در مقایسه با روش کنترل گشتاور است. استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ، برای هر بازوی ربات با در نظر گرفتن دینامیک محرکه‌ها، به خوبی جوابگوست.

مدل امپدانس ربات بر اساس روش تونن و مدل امپدانس محیط هم، بر طبق آخرین تحقیقات به صورت یک معادله غیرخطی پیشنهادی، یک مدل دقیق و نزدیک به واقعیت است. استفاده از کنترل‌کننده امپدانس تا لحظه قبل از برخورد ربات با محیط، کنترل موقعیت را به خوبی انجام می‌دهد. پس از برخورد ربات با محیط، این کنترل‌کننده وظیفه کنترل نیرو، در راستای سوم را به عهده دارد.

بیشتر ابزارهای تزریقی که تاکنون در صنعت پزشکی مورد آزمایش هستند، بسیار ساده‌اند و قابل کنترل نیستند. استفاده از ربات پرکاربرد اسکارا، در صنعت تزریق سلولی یک طرح پیشنهادی است. در این حالت تزریق به سلول‌ها، آسان‌تر و دقیق‌تر انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی طرح پیشنهادی، کارایی آن را به خوبی نشان می‌دهد.

فصل ۴ : کنترل امپدانس تطبیقی ربات اسکارا با راهبرد کنترل ولتاژ به منظور تزریق سلولی

امام صادق (ع) فرموده اند: مطالعه‌ی بسیار و پی گیر در مسائل علمی، باعث شگفتی عقل و تقویت نیروی فکر و فهم است.
بحار ۱، صفحه ۵۲

۴–۱ مقدمه

مطالعات اخیر بیان می‌کند که کنترل امپدانس با ضرایب ثابت در کاربردهایی که دینامیک محیط، متغیر است به خوبی جوابگو نمی‌باشد[۵۰]. به منظور حل این چالش اساسی، روش کنترل امپدانس با ضرایب متغیر ارائه شده است. در این روش کنترلی، پارامترهای امپدانس بر اساس ویژگی‌های مختلف و شرایط سیستم به صورت لحظه‌ای تنظیم می‌شوند.

ضرایب امپدانس را می‌توان به روش‌های مختلفی همانند روش فازی[۱]، تطبیقی[۵۱] و مکانیزم‌های سوئیچزنی[۲][۵۲] تنظیم کرد. ضرایب امپدانس مکانیکی را می‌توان با یک سیستم فازی شبه تناسبی-انتگرالی-مشتقی[۳]، تنظیم نمود[۵۳]. در این تحقیق به منظور تعیین ضریب امپدانس از خطای نیرو و اندازه نیرو، استفاده می‌شود. یک طرح پژوهشی دیگر، برای تعیین مدل امپدانس ربات، از مکانیزم فازی استفاده می‌کند[۵۴]. در مقاله‌ای نیز، یک سیستم فازی تطبیقی[۴] طراحی می‌شود، که که به تعیین ضرایب امپدانس می‌پردازد[۵۵]. هم‌چنین می‌توان با روش کنترل امپدانس تطبیقی[۵۶]، بازوی ربات را به خوبی کنترل نمود.

بنابراین در این فصل، روش کنترل امپدانس تطبیقی ربات اسکارا با راهبرد ولتاژ در سیستم تزریق سلولی ارائه خواهد شد. در این حالت پارامترهای مدل محیط توسط مدل غیرخطی پیشنهادی، تخمین زده می‌شود و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا، بهینه می‌گردد. هم‌چنین به تنظیم ضرایب امپدانس بازوی ربات، به وسیله قانون تطبیق پیشنهادی پرداخته می‌شود.

---

[1] Fuzzy
[2] Switching
[3] PID
[4] Fuzzy Adaptive

۴-۲ معادلات دینامیکی ربات

بازوی ربات از n رابط که به وسیله n مفصل به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل می‌شود. هر رابط به وسیله یک موتور dc مغناطیس دائم، راه‌اندازی می‌گردد. معادلات دینامیکی ربات با فرض عدم وجود انعطاف‌پذیری در مفاصل، به صورت معادله (۴-۱) قابل بیان است[۴۴].

$$D(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+g(q)+J^{T}(q)F_{e}=\tau_{r} \tag{۴-۱}$$

که در آن $q\in R^{n}$ بردار موقعیت مفاصل ربات، $D(q)\in R^{n\times n}$ ماتریس اینرسی ربات، $C(q,\dot{q})\dot{q}\in R^{n}$ بردار گشتاورهای کوریولیس، $g(q)\in R^{n}$ بردار گشتاورهای گرانشی، $F_{e}\in R^{m}$ ماتریس نیروی وارده در نقطه تماس و $\tau_{r}\in R^{n}$ بردار گشتاور ربات است. هم‌چنین $J(q)\in R^{m\times n}$ ماتریس ژاکوبین ربات می‌باشد. رابطه ماتریس ژاکوبین به صورت زیر قابل بیان است[۴۴].

$$\dot{x}=J(q)\dot{q} \tag{۴-۲}$$

که در آن $x\in R^{m}$ موقعیت نقطه انتهایی ربات نامیده می‌شود. با مشتق‌گیری از طرفین رابطه (۴-۲) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\ddot{x}=\dot{J}(q)\dot{q}+J(q)\ddot{q} \tag{۴-۳}$$

بنابراین $\ddot{q}$ از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\ddot{q}=J(q)^{-1}(\ddot{x}-\dot{J}(q)\dot{q}) \tag{۴-۴}$$

ماتریس $J(q)^{-1}$ در حالتی‌که غیرتکین بوده و $m=n$ باشد، وجود دارد[۴۴]. بنابراین با جایگذاری رابطه (۴-۴) در رابطه (۴-۱) داریم:

$$D(q)J(q)^{-1}\ddot{x}+h(q,\dot{q})+J^{T}(q)F_{e}=\tau_{r} \tag{۴-۵}$$

که در رابطه (۴-۵) مقدار $h(q,\dot{q})$ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$h(q,\dot{q}) = -D(q)J(q)^{-1}\dot{J}(q)\dot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) \tag{۴-۶}$$

موتورهای الکتریکی، گشتاور مفاصل ربات را بر طبق رابطه زیر به وجود می‌آورند[۴۴].

$$J_m r^{-1}\ddot{q} + B_m r^{-1}\dot{q} + r\tau_r = \tau_m \tag{۴-۷}$$

که در این رابطه $\tau_m \in R^n$ بردار گشتاور موتورها، J_m، B_m و r ماتریس‌های قطری $n \times n$ هستند، که به ترتیب ضرایب اینرسی، میرایی و کاهشی چرخ‌دنده موتورها نام دارند. بردار سرعت مفاصل $\dot{q}$ و سرعت موتورها $\dot{\theta}_m \in R^n$ توسط چرخ‌دنده‌ها به کمک رابطه زیر، به یکدیگر مرتبط می‌شوند[۴۴].

$$\dot{q} = r\dot{\theta}_m \tag{۴-۸}$$

به منظور تأمین ولتاژ موتورها به عنوان ورودی سیستم، بایستی معادله الکتریکی موتورهای جریان مستقیم با جاروبک مغناطیسی در نمایش ماتریسی، به صورت زیر منظور گردد[۴۴].

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1}\dot{q} = u \tag{۴-۹}$$

که در آن $u \in R^n$ بردار ولتاژ موتورها، $I_a \in R^n$ بردار جریان موتورها، R، L و K_b که به ترتیب بیان‌گر ماتریس‌های قطری $n \times n$ برای ضرایب مقاومت آرمیچر، اثر تزویج و جریان بازگشتی می‌باشند. بردار گشتاور موتورها τ_m به عنوان ورودی معادله دینامیکی (۴-۷) توسط جریان موتورها، بر طبق رابطه زیر به دست می‌آید[۴۴].

$$\tau_m = K_m I_a \tag{۴-۱۰}$$

که در این رابطه K_m ماتریس قطری ثابت گشتاور است. مدل فضای حالت موتورهای الکتریکی ربات را با استفاده از معادله (۴-۱) و رابطه (۴-۱۰) می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$\dot{z} = f(z) + bw \tag{۴-۱۱}$$

در این رابطه $w=\begin{bmatrix} F_e \\ u \end{bmatrix}$ به عنوان ورودی سیستم لحاظ می‌گردد و $z=\begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ I_a \end{bmatrix}$ متغیرهای حالت هستند. هم‌چنین b و $f\,(z)$ به صورت زیر قابل بیان می‌باشند.

$$f\,(z)=\begin{bmatrix} z_2 \\ (J_m r^{-1}+rD(z_1))^{-1}(-(B_m r^{-1}+rC(z_1,z_2))z_2-rg(z_1)+K_m z_3) \\ -L^{-1}(K_b r^{-1} z_2+Rz_3) \end{bmatrix}$$

$$b=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -(J_m r^{-1}+rD(z_1))^{-1} rJ^T(z_1) & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{bmatrix} \tag{۱۲-۴}$$

معادله فضای حالت (۴-۱۲) یک سیستم چندمتغیره غیرخطی با اثر متقابل را به نمایش گذاشته است. با استفاده از ماتریس ژاکوبین، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{q}=J^{-1}(q)\dot{x} \tag{۱۳-۴}$$

بنابراین ورودی سیستم که همان ولتاژ موتورهای الکتریکی هستند، به کمک معادله الکتریکی موتورهای جریان مستقیم با جاروبک مغناطیسی، به صورت زیر تأمین می‌گردد. این رابطه نهایی به کمک روابط (۴-۹) و (۴-۱۳) به دست می‌آید.

$$RI_a+L\dot{I}_a+K_b r^{-1} J^{-1}(q)\dot{x}=u \tag{۱۴-۴}$$

۴-۳ کنترل امپدانس تطبیقی ربات با راهبرد ولتاژ

این طرح امپدانس تطبیقی با راهبرد ولتاژ، بر مبنای مدل تونن در روش مدار طراحی شده است و ضرایب امپدانس ربات، قابل طراحی و متغیر با زمان هستند. همچنین پارامترهای مدل محیط، توسط مدل غیرخطی پیشنهادی، تخمین زده می‌شود و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا، بهینه می‌گردد. رفتار دینامیکی مطلوب سیستم ربات، نسبت به محیط به صورت امپدانس مطلوب در حوزه لاپلاس در رابطه زیر قابل بیان است[۴۴].

$$F_{Ri}(s)-Z_{Ri}(s)\,v_i(s)=F_{ei}(s) \tag{۱۵-۴}$$

که در آن $F_{Ri}(s)$ نیروی مطلوب و $Z_{Ri}(s)$ امپدانس مطلوب نام دارد. هم‌چنین $v_i(s)$ که iامین عنصر $v(s)$ است، به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$v(s)=sx(s) \tag{۱۶-۴}$$

مدل تونن امپدانس ربات اسکارا، توسط رابطه زیر پیشنهاد می‌گردد[۴۴].

$$Z_{Ri}(s)=M_{Ri}(s)s+B_{Ri}(s)+\frac{K_{Ri}(s)}{s} \tag{۱۷-۴}$$

که در آن $M_{Ri}(s)$، $B_{Ri}(s)$ و $K_{Ri}(s)$ به ترتیب ضریب اینرسی، اصطکاک و سختی مطلوب نام دارند. بنابراین کنترل‌کننده بایستی به گونه‌ای عمل نماید، که سیستم ربات و کنترل‌گر با یکدیگر به عنوان امپدانس مطلوب، بیان شوند[۴۴]. بنابراین امپدانس مطلوب را به کمک روابط (۴-۱۵)، (۴-۱۶) و (۴-۱۷) به صورت زیر می‌توان بیان نمود:

$$F_{Ri}(s)-F_{ei}(s)=(M_{Ri}(s)s^2+B_{Ri}(s)s+K_{Ri}(\mathrm{s}))x_i(s) \tag{۱۸-۴}$$

نیروی مطلوب $F_{Ri}(s)$ در کنترل امپدانس، نقش مهمی دارد. پس رابطه زیر را تعریف می‌کنیم[۴۴].

$$F_{Ri}(s)=Z_{Ri}(s)\,v_{di}(s) \tag{۱۹-۴}$$

که در آن $v_{di}(s)$ سرعت مطلوب است. به کمک روابط (۴-۱۷) و (۴-۱۹) در حوزه لاپلاس داریم:

$$F_{Ri}(s)=(M_{Ri}(s)s^2+B_{Ri}(s)s+K_{Ri}(\mathrm{s}))x_{di}(s) \tag{۲۰-۴}$$

رابطه بالا از حوزه لاپلاس به حوزه زمان به صورت زیر انتقال می‌یابد.

$$F_{Ri}=M_{Ri}(t)\ddot{x}_{di}+B_{Ri}(t)\dot{x}_{di}+K_{Ri}(t)x_{di} \tag{۲۱-۴}$$

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

$$F_R = M_R(t)\ddot{x}_d + B_R(t)\dot{x}_d + K_R(t)x_d \qquad (۲۲\text{-}۴)$$

که در آن $M_R(t)$، $B_R(t)$ و $K_R(t)$ به ترتیب ضریب اینرسی، اصطکاک و سختی مطلوب نام دارند. این ماتریس‌های قطری، پارامترهای امپدانس متغیر با زمان‌اند که قابل طراحی می‌باشند و در ادامه نحوه تعیین آن‌ها، توضیح داده می‌شود.

مدل امپدانس مطلوب بر طبق رابطه (۴-۱۸) درحالتی‌که $M_{Ri}(t)=0$ [۴۴] منظور گردد، به صورت زیر خواهد بود.

$$F_{Ri}(s) - F_{ei}(s) = (B_{Ri}(s)s + K_{Ri}(\mathrm{s}))x_i(s) \qquad (۲۳\text{-}۴)$$

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

$$\dot{x}_i = -B_{Ri}^{-1}(t)K_{Ri}(t)x_i - B_{Ri}^{-1}(t)F_{ei} + B_{Ri}^{-1}(t)F_{Ri} \qquad (۲۴\text{-}۴)$$

با استفاده از معادلات اسکالر برای $i=1,\dots,n$ معادله ماتریسی به صورت زیر خواهد بود.

$$\dot{x} = -B_R^{-1}(t)K_R(t)x - B_R^{-1}(t)F_e + B_R^{-1}(t)F_R \qquad (۲۵\text{-}۴)$$

با جایگذاری رابطه (۴-۲۲) با $M_R(t)=0$ [۴۴] در رابطه (۴-۲۵)، رابطه نهایی به صورت زیر است:

$$\dot{x} = \dot{x}_d + B_R^{-1}(t)K_R(\mathrm{t})(x_d - x) - B_R^{-1}(t)F_e \qquad (۲۶\text{-}۴)$$

قانون کنترل‌کننده امپدانس که بر پایه قانون امپدانس (۴-۲۲) پایه‌گزاری شده است، با جایگذاری رابطه (۴-۲۶) در رابطه (۴-۱۴) به صورت زیر خواهد بود. بر طبق این رابطه به کنترل امپدانس ربات با استفاده از راهبرد ولتاژ موتورها پرداخته می‌شود.

$$RI_a + K_b r^{-1}J^{-1}(q)(\dot{x}_d + B_R^{-1}(t)K_R(\mathrm{t})(x_d - x) - B_R^{-1}(t)F_e) = v \qquad (۲۷\text{-}۴)$$

به منظور محافظت موتورها از ولتاژ اضافه و سالم ماندن سلول‌ها از اعمال نیروی ناگهانی یا بالاتر از سطح تحمل سلول، بایستی موتورها را به محدودکننده مجهز کنیم. بنابراین قانون کنترلی (۴-۲۷) به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$sat(u) = v \qquad (۴-۲۸)$$

که در آن داریم:

$$RI_a + K_b r^{-1} J^{-1}(q)(\dot{x}_d + B_R^{-1}(t) K_R(\mathrm{t})(x_d - x) - B_R^{-1}(t) F_e) = u \qquad (۴-۲۹)$$

در رابطه (۴-۲۸) بردار $sat(u)$ را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$v_i = sat(\mathrm{u}_i),\ \ sat(u_i) = \begin{cases} v_{\max} & if \quad u_i \geq v_{\max} \\ u_i & if \quad -v_{\max} \leq u_i \leq v_{\max} \\ -v_{\max} & if \quad u_i \leq -v_{\max} \end{cases} \qquad (۴-۳۰)$$

که در این رابطه، $v_{\max}$ بیشترین ولتاژ موتورها می‌باشد. معادله سیستم حلقه بسته با جایگذاری قانون کنترل (۴-۲۸) در سیستم (۴-۹) به صورت زیر است.

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} \dot{q} = sat(u) \qquad (۴-۳۱)$$

اگر $-v_{\max} \leq u_i \leq v_{\max}$ باشد، با استفاده از روابط (۴-۲۷)، (۴-۲۸) و (۴-۳۱) و ساده‌سازی این روابط، معادله نهایی سیستم حلقه بسته، به صورت زیر خواهد بود.

$$B_R(t)(\dot{\mathrm{x}}_d - \dot{\mathrm{x}}) + K_R(\mathrm{t})(x_d - x) = B_R(t)\,\mathrm{J(q)\,rK}_b^{-1} L\dot{I}_a + F_e \qquad (۴-۳۲)$$

ضرایب امپدانس ربات باید به گونه‌ای تنظیم بشوند تا $F_e \to F_d$ میل کند، که در بحث امپدانس ربات F_d همان F_R می‌باشد. به منظور تحقق این هدف، تابع اسکالر معین مثبت لیاپانوف $V(t)$ [۵۷] به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد.

$$V(t) = 0.5 E^T E \qquad (۴-۳۳)$$

که در این رابطه داریم:

$$E = F_d - F_e \qquad (۴-۳۴)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۴-۲۲) و با فرض $dF_e = 0$ در بازه زمانی تزریق ۴ تا ۶ ثانیه، داریم:

$$\frac{\partial F_R}{\partial B_R} = \dot{x}_d \,, \; \frac{\partial F_R}{\partial K_R} = x_d \qquad (۳۵-۴)$$
$$dF_e = 0 \quad if \quad 4 \le t \le 6$$

بنابراین به کمک الگوریتم گرادیان نزولی برای رسیدن به $\dot{V}(t) < 0$، به منظور تحقق کاهش V و رسیدن به هدف $E \to 0$، می‌توان نوشت:

$$\dot{B}_R(t) = -\lambda_\alpha (F_R - F_e)(\dot{x}_d)^T \qquad (۳۶-۴)$$

$$\dot{K}_R(t) = -\lambda_\beta (F_R - F_e)(x_d)^T \qquad (۳۷-۴)$$

در رابطه بالا ضرایب λ_α و λ_β، ضرایب مثبت هستند. پارامترهای امپدانس با روابط زیر به‌روز می‌شوند.

$$B_R(t) = -\lambda_\alpha \int_0^t (F_R - F_e)(\dot{x}_d)^T dt' + B_R(0) \qquad (۳۸-۴)$$

$$K_R(t) = -\lambda_\beta \int_0^t (F_R - F_e)(x_d)^T dt' + K_R(0) \qquad (۳۹-۴)$$

۴-۴ مدل‌سازی محیط به شکل سلول تحت تزریق

در اکثر تحقیقاتی که تاکنون در این شاخه از علم پزشکی صورت گرفته است، مدل سلول را به صورت یک فنر بیان می‌کنند. این شیوه از مدل‌سازی سلول که روشی ساده است، را به صورت زیر می‌توان مطرح نمود[۲۸].

$$F_e = K_e (x - x_e) \qquad (۴۰-۴)$$

که در این رابطه K_e سختی محیط، x_e موقعیت پوسته سلول که تغییر شکل نداده و x موقعیت نقطه انتهایی تزریق‌کننده، که در این حالت سلول تغییر شکل یافته می‌باشد[۴۰]. مدل دقیق‌تر و

نزدیک‌تر به واقعیت سلول، به کمک معادله چندجمله‌ای درجه دو، قابل بیان می‌باشد. در این حالت، مدل پیشنهادی محیط به صورت زیر است[۱].

$$F_e = Ax^2 + Bx \tag{۴-۴۱}$$

در این رابطه F_e نیروی تماس و A و B ضرایب عبارت درجه دو و عبارت خطی هستند. تابع هزینه J که بایستی مقدار آن را کمینه کرد، به صورت زیر تعیین می‌گردد[۱].

$$J = \int_0^t e^{-\lambda(t-r)} [y(r) - w(r)\hat{a}(t)]^2 dr \tag{۴-۴۲}$$

در این حالت $w^T = \begin{bmatrix} x^2 \\ x \end{bmatrix}$، $y = F_e$ و $\hat{a} = \begin{bmatrix} \hat{A} \\ \hat{B} \end{bmatrix}$ است، که $\hat{A}$ و $\hat{B}$ مقادیر تخمین زده از A و B می‌باشند. در این محاسبات، $\lambda = 0.9$ یک مقدار ثابت به نام فاکتور فراموشی است. قانون به‌روزرسانی از طریق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد[۱].

$$\dot{\hat{a}}(t) = -p(t) w^T e(t) \tag{۴-۴۳}$$

که در این رابطه داریم:

$$e(t) = \hat{a}^T(t) w^T - y(t) \tag{۴-۴۴}$$

قانون به‌روزرسانی بهره به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{d}{dt}[p] = -\lambda p - p w^T w p \tag{۴-۴۵}$$

$$p(0) = \begin{bmatrix} \kappa & 0 \\ 0 & \kappa \end{bmatrix} \tag{۴-۴۶}$$

در این روابط مقادیر اولیه باتوجه به شرایط سیستم، تعیین می‌گردد[۱].

۴–۵ شبیه‌سازی سیستم کنترلی

در این قسمت به شبیه‌سازی قانون کنترل امپدانس ولتاژ (۴-۲۹)، برای بازوی سه رابطی ربات اسکارا می‌پردازیم. هر رابط به وسیله یک موتور DC مغناطیس دائم تحریک می‌شود. این شبیه‌سازی با طول گام ۰,۰۰۱ در مدت زمان ۱۰ ثانیه انجام شده است. مدل ربات توسط رابطه (۴-۵) به دست می‌آید.

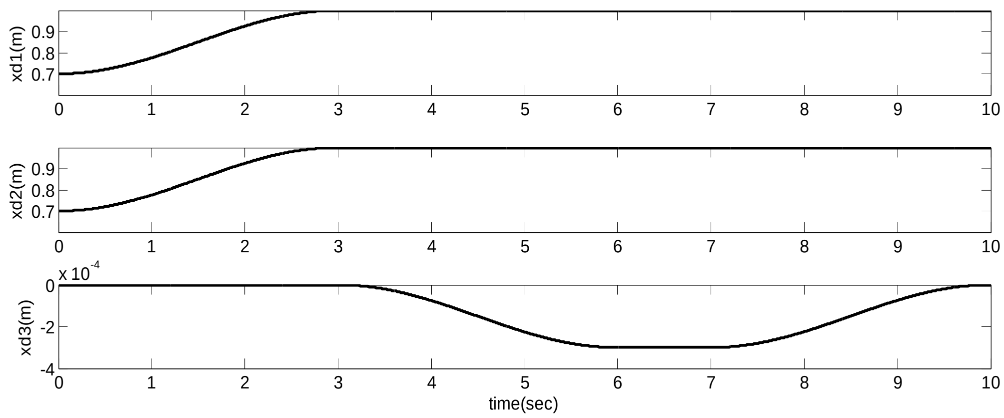
با توجه به کاربرد ربات اسکارا در این تحقیق، مسیر مطلوب موقعیت که $x_d = \begin{bmatrix} x_{d1} & x_{d2} & x_{d3} \end{bmatrix}^T$ نام دارد، در شکل (۴-۱) قابل مشاهده است. این مسیر نرم و حداقل تا درجه دو مشتق‌پذیر را، به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

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

$$x_{d2} = x_{d1} \qquad (۴۷-۴)$$

$$x_{d3} = \begin{cases} 0 & 0 \le t < 3 \\ 0.001(-0.15)(1+\cos(\pi t/3)) & 3 \le t < 6 \\ 0.001(-0.3) & 6 \le t < 7 \\ 0.001(-0.15)(1-\cos(\pi t/3)) & 7 \le t < 10 \end{cases}$$

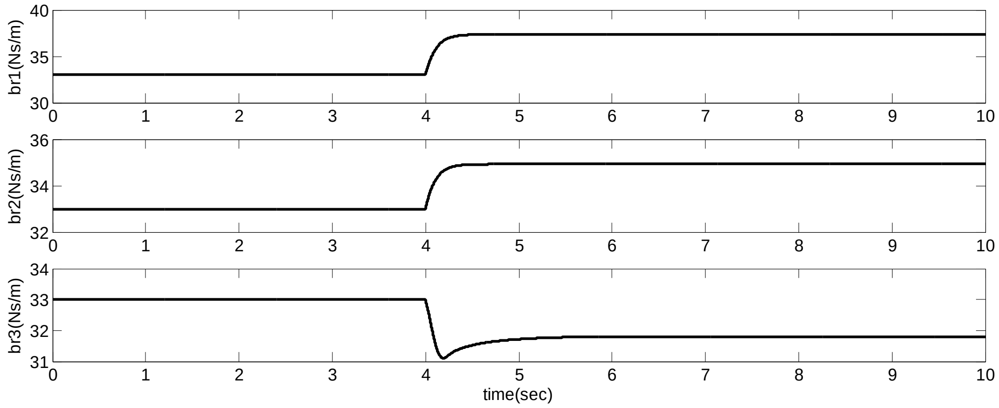
در این شرایط مختصات نقطه برخورد ربات با محیط، در زمان ۴ ثانیه به صورت $x_e = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -7.49\times10^{-5} \end{bmatrix}^T$ قابل بیان است.



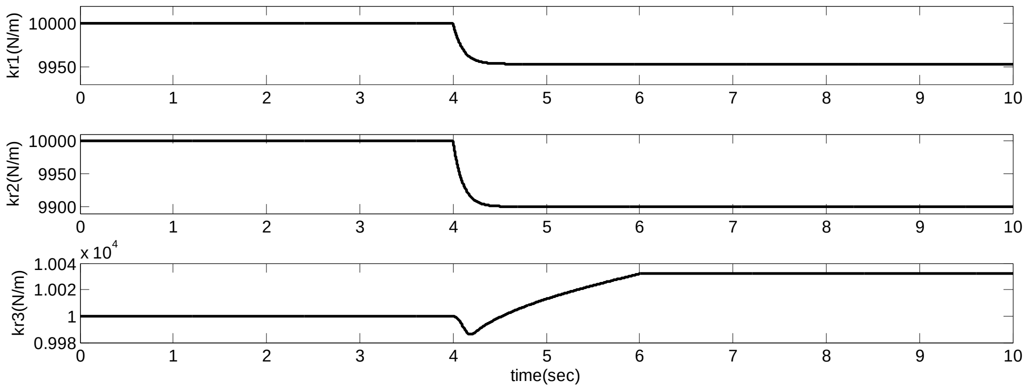
شکل (۴-۱) مسیر مطلوب موقعیت

در این حالت ابتدا ربات را در یک نقطه اولیه، به مختصات $x_0 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.7 & 0 \end{bmatrix}^T m$ قرار می‌دهیم. این نقطه بر اساس موقعیت صفحه سلولی تعیین می‌گردد. مدل امپدانس ربات اسکارا طبق رابطه (۴-۲۲) به دست می‌آید و باتوجه به کاربرد ربات در سیستم تزریق سلولی، $M_{Ri} = 0$ است. پارامترهای امپدانس B_{Ri} و K_{Ri} برای $i = 1,2,3$ قابل طراحی می‌باشند. این پارامترها به کمک

الگوریتم گرادیان نزولی، توسط روابط (۴-۳۸) و (۴-۳۹) به‌روز می‌شوند. شکل (۴-۲) و (۴-۳) تنظیم پارامترهای امپدانس ربات را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲) تنظیم پارامتر ضریب اصطکاک



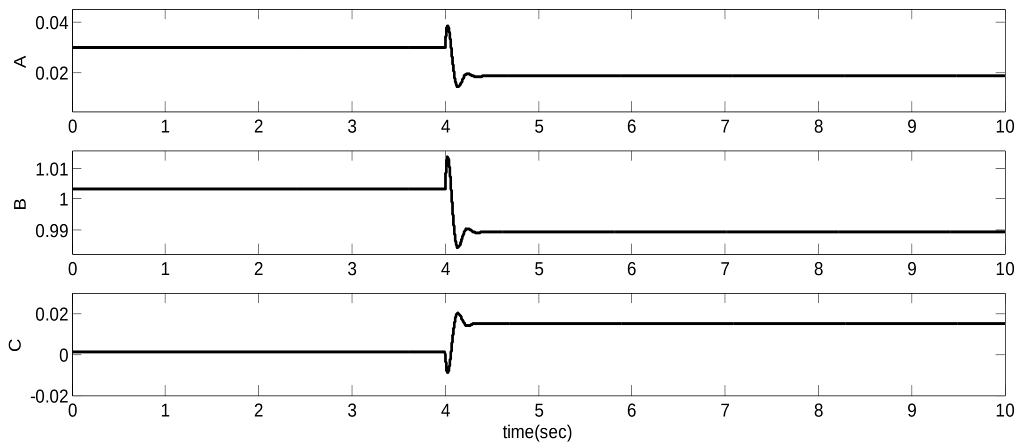
شکل (۴-۳) تنظیم پارامتر ضریب سختی

مدل‌سازی محیط به کمک رابطه (۴-۴۱) به صورت معادله چندجمله‌ای درجه دو دارای دقت مناسبی است، اما اگر مدل غیرخطی آن تغییر یابد، نتایج حاصل از آن به مدل واقعی نزدیک‌تر است[۱]. در این پایان‌نامه، محیط را به کمک معادله غیرخطی زیر، پیشنهاد می‌کنیم.

$$F_e = Ax_3^2 + Bx_3 + C\sin(x_3) \qquad (۴۸-۴)$$

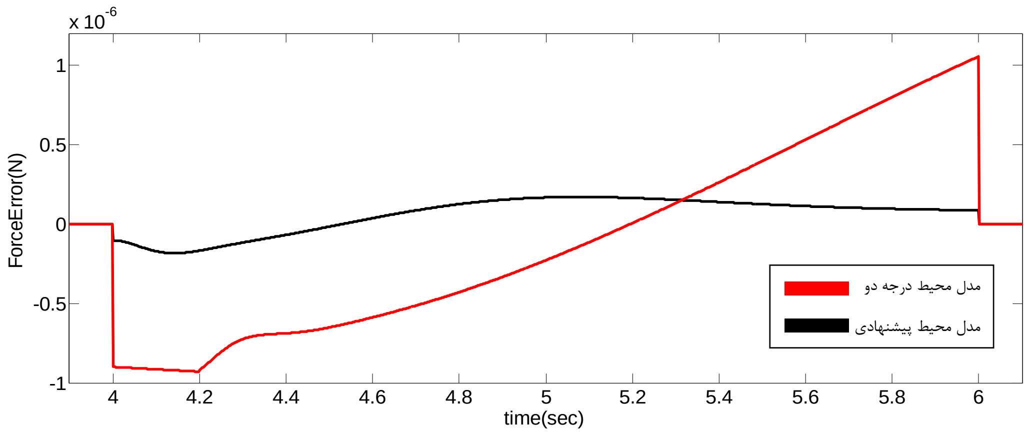
در این حالت تابع هزینه همان رابطه (۴-۴۲) است و $w=[x^2 \quad x \quad \sin(x)]$، $y=F_e$ و $\hat{a}=\left[\hat{A} \quad \hat{B} \quad \hat{C}\right]^T$، $\hat{A}$، $\hat{B}$ و $\hat{C}$ مقادیر تخمینی A، B و C هستند. فاکتور فراموشی $\lambda=0.9$ در نظر گرفته شد. قانون به روزرسانی پارامترها بر طبق رابطه (۴-۴۳)، (۴-۴۴) و (۴-۴۵) لحاظ می‌شود.

به دلیل شروع فرایند تزریق از لحظه ۴ به بعد، تخمین پارامترها هم از این لحظه به روز می‌شود. شکل (۴-۴) تخمین پارامترهای مدل محیط را نشان می‌دهد.



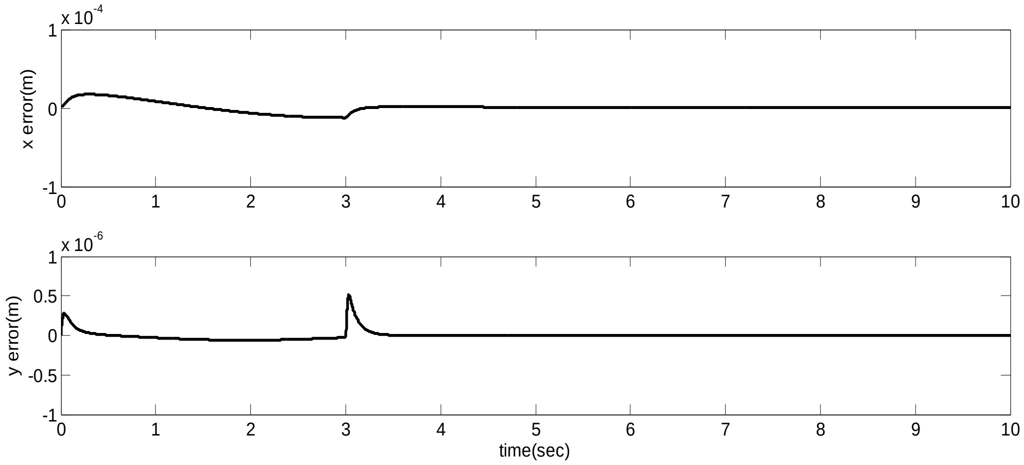
شکل (۴-۴) تخمین پارامترهای A، B و C

به دلیل برخورد ربات با محیط، در نقطه تماس نوسان کمی ایجاد می‌شود. با توجه با اینکه ابعاد سلول در حد میکرون است، استفاده از یک تابع سینوسی باعث کاهش خطای نیرو و نزدیک‌تر شدن مدل پیشنهادی به مدل واقعی می‌گردد. کارایی مدل محیط پیشنهادی در کاهش خطای نیروی وارده از سوی ربات به محیط در شکل (۴-۵) قابل مشاهده است. میزان خطای نیرو در قبل از زمان ۴ ثانیه و بعد از زمان ۶ ثانیه در هر دو نمودار صفر است.



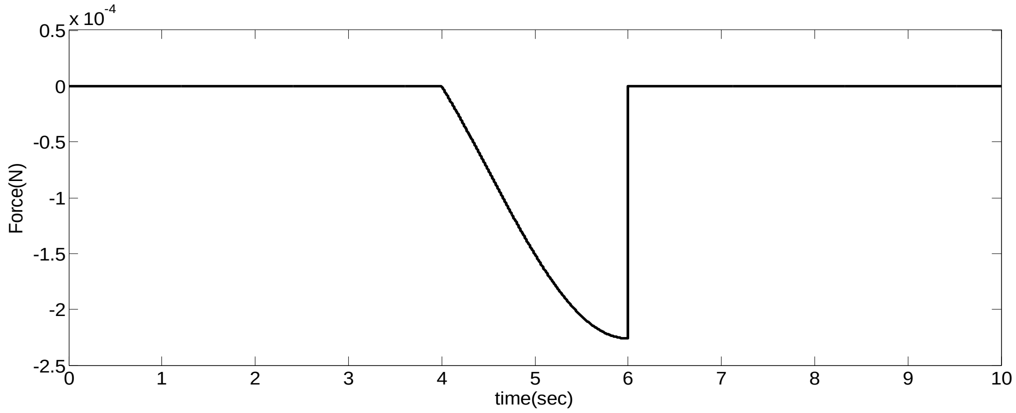
شکل (۴-۵) کاهش خطای نیرو در مدل محیط پیشنهادی

با توجه به کاربرد اسکارا در تزریق سلولی، در محور x و y کنترل موقعیت داریم. همانطور که در شکل (۴-۶) مشاهده می‌شود، ردگیری به خوبی محقق شده است و خطای موقعیت در این دو محور حداکثر $m\ \begin{bmatrix} 2\times10^{-5} & 5\times10^{-7} \end{bmatrix}^T$ می‌باشد.



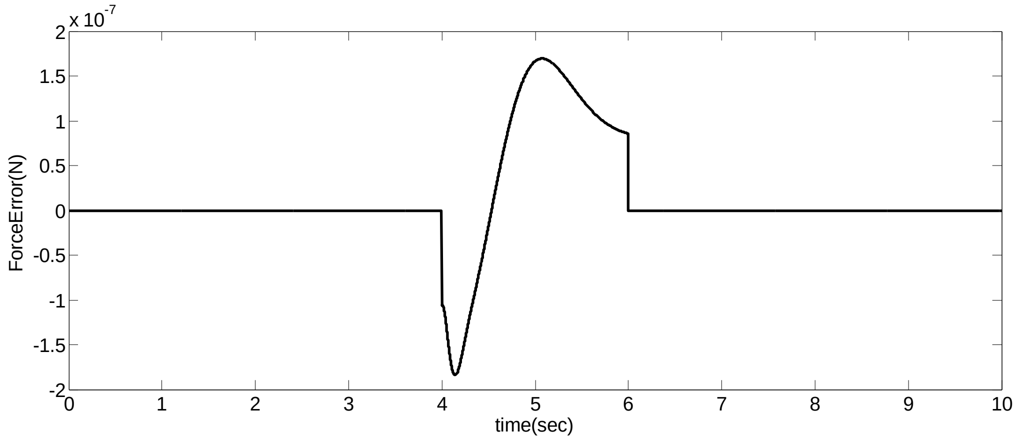
شکل (۴-۶) خطای ردگیری موقعیت

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 می‌شود. مدت زمان تزریق، بین ۴ تا ۶ ثانیه است. پس از آن ماده شیمیایی توسط ابزار تزریق، در زمان ۶ تا ۷ ثانیه به سلول وارد می‌گردد. سپس ربات مسیر بازگشت به نقطه اولیه خود را طی می‌کند. نیروی محیط به ربات در شکل (۴-۷) آورده شده است.



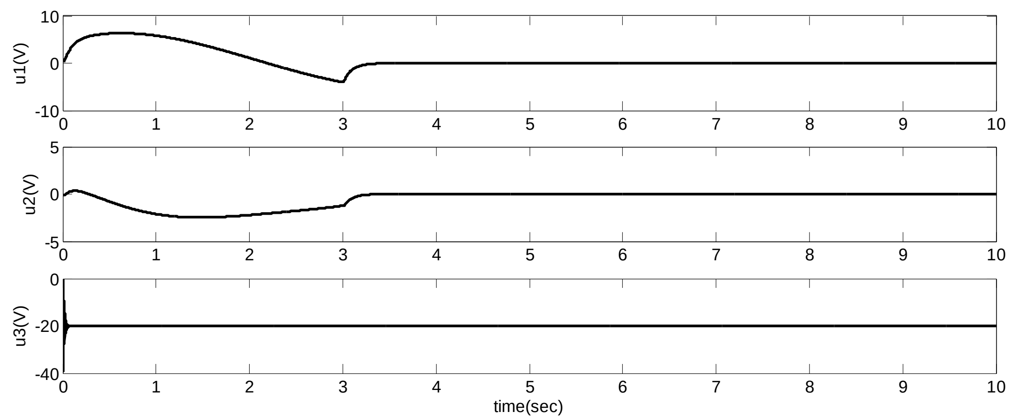
شکل (۴-۷) نیروی اعمالی در نقطه برخورد

هدف این است که؛ با توجه به مدل پیشنهادی امپدانس ربات و محیط، نیروی F_e تا حدامکان به نیروی مطلوب ربات نزدیک باشد. بر طبق مطالعاتی که در زمینه تزریق سلولی انجام شده، حداکثر خطای این طرح پیشنهادی کمتر از 2×10^{-7} نیوتون است، که مقدار مطلوبی می‌باشد. خطای نیروی اعمالی در محور z در شکل (۴-۸) قابل مشاهده است.



شکل (۴-۸) خطای نیروی اعمالی

ولتاژ موتورها در مقدارهای اسمی، رفتار بسیار مطلوبی دارند. موتور ۳ دارای ولتاژ ۲۰- ولت، برای اعمال به نقطه برخورد است. درحالی‌که موتور ۱ و ۲ در زمان شروع فرآیند تزریق، تقریبا ولتاژی ندارند، زیرا باری بر روی مفاصل آن‌ها نیست. نمودار ولتاژ موتورها در شکل (۴-۹) قابل مشاهده است.



شکل (۴-۹) ولتاژ موتورها

۴–۶ نتیجه‌گیری

در این فصل کنترل امپدانس تطبیقی، با استفاده از مدل تونن برای امپدانس ربات و مدل محیط، به صورت یک معادله غیرخطی پیشنهادی که دقیق و نزدیک به واقعیت است، محقق گردید. هم‌چنین به منظور غلبه بر چالش اساسی کنترل امپدانس، یعنی تعیین ضرایب امپدانس مطلوب، یک روش تطبیقی جدید ارائه شد. در این روش کنترلی مبتنی بر ولتاژ، پارامترهای مدل محیط با استفاده از الگوریتم کمترین مربعات خطا، به صورت لحظه‌ای به‌روز می‌گردند. ضرایب امپدانس ربات نیز، بر اساس الگوریتم گرادیان نزولی قانون تطبیق، محاسبه می‌شوند. این ضرایب امپدانس باتوجه به قانون تطبیقی پیشنهادی در هر لحظه به‌روز می‌شوند، تا بتوانند نتایج مطلوب‌تری را نشان دهند. هدف این روش کنترلی، رسیدن به نیروی مطلوب و درست، برای تزریق به سلول‌هاست تا پس از آزمایش، سلول‌ها زنده و سالم باقی بمانند. نتایج شبیه‌سازی، کارایی مناسب روش پیشنهادی را به خوبی نشان می‌دهد.

فصل ۵ : کنترل امپدانس مقاوم ربات اسکارا با راهبرد کنترل ولتاژ به منظور تزریق سلولی

امام علی (ع) فرموده‌اند: کسی که در آموخته‌های خود بسیار بیندیشد، دانش خود را استوار ساخته و به فهم مطالبی که درک نمی‌کند، نائل می‌گردد.

فهرست غرر، صفحه ۳۱٦

۵-۱ مقدمه

اگرچه اهداف کنترلی به دلیل وجود نامعینی در مدل یا اندازه‌گیری در سیستم کنترل به خوبی محقق نمی‌گردد، اما کنترل مقاوم[1] تلاشی برای حل این مشکل است[۵۸]. همچنین یکی از چالش‌های اساسی کنترل مقاوم، حفظ پایداری[2] در حضور نامعینی‌هاست[۵۹]. کنترل مقاوم بازوی ربات با راهبرد ولتاژ[۶۰] و بهینه‌سازی توسط الگوریتم پرندگان[3][۶۱] تابه‌حال تحت بررسی بوده و پایداری سیستم‌ها نیز ارزیابی شده است.

مطالعات اخیر بیان می‌کند که کنترل امپدانس با ضرایب ثابت در کاربردهایی که دینامیک محیط، متغیر است به خوبی جوابگو نمی‌باشد[۵۰]. در تحقیقی به پیشنهاد تخمین پارامترهای امپدانس محیط، به صورت آفلاین پرداخته است[۶۲]. به منظور حل این چالش اساسی، روش کنترل امپدانس با ضرایب متغیر ارائه شد. در این روش کنترلی، پارامترهای امپدانس بر اساس ویژگی‌های مختلف و شرایط سیستم، به صورت لحظه‌ای تنظیم می‌شوند.

در این فصل به طراحی کنترل‌کننده مقاوم ربات اسکارا با راهبرد کنترل ولتاژ، به منظور سیستم تزریق سلولی پرداخته شد. این کنترل‌کننده در حضور اغتشاش خارجی و نامعینی‌ها[۱۲] می‌باشد. در این حالت پارامترهای مدل محیط توسط مدل غیرخطی پیشنهادی، تخمین زده می‌شود و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا، بهینه می‌گردد. هم‌چنین به تنظیم ضرایب امپدانس بازوی ربات، به وسیله الگوریتم گرادیان نزولی پرداخته می‌شود. تحلیل پایداری روش کنترلی پیشنهادی، نشان می‌دهد که سیستم پایدار است. نتایج شبیه‌سازی نیز، کارایی روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

---
[1] Robust
[2] Stability
[3] PSO

۵-۲ معادلات دینامیکی ربات

بازوی ربات از n رابط که به وسیله n مفصل به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل می‌شود. هر رابط به وسیله یک موتور dc مغناطیس دائم، راه‌اندازی می‌گردد. معادلات دینامیکی ربات با فرض عدم وجود انعطاف‌پذیری در مفاصل به صورت معادله (۵-۱) قابل بیان است[۴۴].

$$D(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+g(q)+J^{T}(q)F_{e}=\tau_{r} \tag{۵-۱}$$

که در آن $q\in R^{n}$ بردار موقعیت مفاصل ربات، $D(q)\in R^{n\times n}$ ماتریس اینرسی ربات، $C(q,\dot{q})\dot{q}\in R^{n}$ بردار گشتاورهای کوریولیس، $g(q)\in R^{n}$ بردار گشتاورهای گرانشی، $F_{e}\in R^{m}$ ماتریس نیروی وارده در نقطه تماس و $\tau_{r}\in R^{n}$ بردار گشتاور ربات نامیده می‌شود. هم‌چنین $J(q)\in R^{m\times n}$ ماتریس ژاکوبین ربات می‌باشد. رابطه ماتریس ژاکوبین به صورت زیر قابل بیان است[۴۴].

$$\dot{x}=J(q)\dot{q} \tag{۵-۲}$$

که $x\in R^{m}$ موقعیت نقطه انتهایی ربات، نامیده می‌شود. مشتق رابطه (۵-۲) رابطه زیر است:

$$\ddot{x}=\dot{J}(q)\dot{q}+J(q)\ddot{q} \tag{۵-۳}$$

بنابراین $\ddot{q}$ از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\ddot{q}=J(q)^{-1}(\ddot{x}-\dot{J}(q)\dot{q}) \tag{۵-۴}$$

ماتریس $J(q)^{-1}$ درحالتی‌که غیرتکین بوده و $m=n$ باشد، وجود دارد[۴۴]. با جایگذاری رابطه (۵-۴) در رابطه (۵-۱) داریم:

$$D(q)J(q)^{-1}\ddot{x}+h(q,\dot{q})+J^{T}(q)F_{e}=\tau_{r} \tag{۵-۵}$$

که در رابطه (۵-۵) مقدار $h(q,\dot{q})$ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$h(q,\dot{q}) = -D(q)J(q)^{-1}\dot{J}(q)\dot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) \tag{۶-۵}$$

موتورهای الکتریکی، گشتاور مفاصل ربات را بر طبق رابطه زیر به وجود می‌آورند[۴۴].

$$J_m r^{-1}\ddot{q} + B_m r^{-1}\dot{q} + r\tau_r = \tau_m \tag{۷-۵}$$

که در این رابطه $\tau_m \in R^n$ بردار گشتاور موتورها، J_m، B_m و r ماتریس‌های قطری $n \times n$ هستند، که به ترتیب ضرایب اینرسی، میرایی و کاهشی چرخ‌دنده موتورها نام دارند. بردار سرعت مفاصل $\dot{q}$ و سرعت موتورها $\dot{\theta}_m \in R^n$ توسط چرخ‌دنده‌ها، به کمک رابطه زیر به یکدیگر مرتبط می‌شوند[۴۴].

$$\dot{q} = r\dot{\theta}_m \tag{۸-۵}$$

به منظور تأمین ولتاژ موتورها به عنوان ورودی سیستم، بایستی معادله الکتریکی موتورهای جریان مستقیم با جاروبک مغناطیسی، در نمایش ماتریسی به صورت زیر منظور گردد[۴۴].

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1}\dot{q} + \phi = u \tag{۹-۵}$$

که در آن $u \in R^n$ بردار ولتاژ موتورها، $I_a \in R^n$ بردار جریان موتورها، $\phi \in R^n$ بردار اغتشاشات خارجی، R، L و K_b که به ترتیب بیان‌گر ماتریس‌های قطری $n \times n$ برای ضرایب مقاومت آرمیچر، اثر تزویج و جریان بازگشتی می‌باشند. بردار گشتاور موتورها τ_m به عنوان ورودی معادله دینامیکی (۵-۷) توسط جریان موتورها، بر طبق رابطه زیر به دست می‌آید[۴۴].

$$\tau_m = K_m I_a \tag{۱۰-۵}$$

که در این رابطه K_m، ماتریس قطری ثابت گشتاور است. مدل فضای حالت موتورهای الکتریکی ربات را با استفاده از معادله (۵-۱) و رابطه (۵-۱۰) می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$\dot{z} = f(z) + bw - b\varphi \tag{۱۱-۵}$$

در این رابطه $w=\begin{bmatrix} F_e \\ u \end{bmatrix}$ به عنوان ورودی سیستم لحاظ می‌گردد، $\varphi=\begin{bmatrix} 0 \\ \phi \end{bmatrix}$ و $z=\begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ I_a \end{bmatrix}$ متغیرهای حالت هستند. هم‌چنین b و $f(z)$ به صورت زیر قابل بیان می‌باشند.

$$f(z)=\begin{bmatrix} z_2 \\ (J_m r^{-1}+rD(z_1))^{-1}(-(B_m r^{-1}+rC(z_1,z_2))z_2-rg(z_1)+K_m z_3) \\ -L^{-1}(K_b r^{-1}z_2+Rz_3) \end{bmatrix}$$

$$b=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -(J_m r^{-1}+rD(z_1))^{-1}rJ^T(z_1) & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{bmatrix} \tag{۱۲-۵}$$

معادله فضای حالت (۵-۱۲) یک سیستم چندمتغیره غیرخطی با اثر متقابل را به نمایش گذاشته است. رابطه (۵-۲) انتقالی از فضای مفصلی به فضای کار است. با استفاده از ماتریس ژاکوبین، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{q}=J^{-1}(q)\dot{x} \tag{۱۳-۵}$$

بنابراین ورودی سیستم که همان ولتاژ موتورهای الکتریکی هستند، به کمک معادله الکتریکی موتورهای جریان مستقیم با جاروبک مغناطیسی، به صورت زیر تأمین می‌گردد. این رابطه نهایی به کمک روابط (۵-۹) و (۵-۱۳) به دست می‌آید.

$$RI_a+L\dot{I}_a+K_b r^{-1}J^{-1}(q)\dot{x}+\phi=u \tag{۱۴-۵}$$

۵-۳ کنترل امپدانس مقاوم با راهبرد ولتاژ

در این قسمت یک روش جدید کنترل امپدانس مقاوم، در حضور اغتشاش خارجی و نامعینی‌ها که مبتنی بر راهبرد ولتاژ است، بیان می‌شود. این طرح امپدانس، بر مبنای مدل تونن در روش مدار طراحی شده است و ضرایب امپدانس ربات، قابل طراحی و متغیر با زمان هستند، که در این فصل به تنظیم این ضرایب به وسیله الگوریتم گرادیان نزولی پرداخته می‌شود. همچنین پارامترهای مدل

محیط توسط مدل غیرخطی پیشنهادی، تخمین زده می‌شود و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا، بهینه می‌گردد.

۵-۳-۱ طراحی کنترل‌کننده امپدانس مقاوم ربات

رفتار دینامیکی مطلوب سیستم ربات، نسبت به محیط به صورت امپدانس مطلوب در حوزه لاپلاس در رابطه زیر قابل بیان است[۴۴].

$$F_{Ri}(s) - Z_{Ri}(s)v_i(s) = F_{ei}(s) \qquad (۵\text{-}۱۵)$$

که در آن $F_{Ri}(s)$ نیروی مطلوب و $Z_{Ri}(s)$ امپدانس مطلوب نام دارد. هم‌چنین $v_i(s)$ که iامین عنصر $v(s)$ است، به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$v(s) = sx(s) \qquad (۵\text{-}۱۶)$$

مدل تونن امپدانس ربات اسکارا، توسط رابطه زیر پیشنهاد می‌گردد[۴۴].

$$Z_{Ri}(s) = M_{Ri}(s)s + B_{Ri}(s) + \frac{K_{Ri}(s)}{s} \qquad (۵\text{-}۱۷)$$

که در آن $M_{Ri}(s)$، $B_{Ri}(s)$ و $K_{Ri}(s)$ به ترتیب ضریب اینرسی، اصطکاک و سختی مطلوب نام دارند که پارامترهای امپدانس قابل طراحی هستند. امپدانس مطلوب ربات را به کمک روابط (۵-۱۵)، (۵-۱۶) و (۵-۱۷) به صورت زیر می‌توان بیان نمود:

$$F_{Ri}(s) - F_{ei}(s) = (M_{Ri}(s)s^2 + B_{Ri}(s)s + K_{Ri}(\mathrm{s}))x_i(s) \qquad (۵\text{-}۱۸)$$

نیروی مطلوب $F_{Ri}(s)$ در کنترل امپدانس، نقش مهمی دارد. پس رابطه زیر را تعریف می‌کنیم[۴۴].

$$F_{Ri}(s) = Z_{Ri}(s)v_{di}(s) \qquad (۵\text{-}۱۹)$$

که در آن $v_{di}(s)$ سرعت مطلوب نامیده می‌شود. با روابط (۵-۱۷) و (۵-۱۹) در حوزه لاپلاس داریم:

$$F_{Ri}(s) = (M_{Ri}(s)s^2 + B_{Ri}(s)s + K_{Ri}(\mathrm{s}))x_{di}(s) \qquad (۵\text{-}۲۰)$$

رابطه بالا از حوزه لاپلاس به حوزه زمان به صورت زیر انتقال می‌یابد.

$$F_{Ri}=M_{Ri}(t)\ddot{x}_{di}+B_{Ri}(t)\dot{x}_{di}+K_{Ri}(t)x_{di} \tag{۲۱-۵}$$

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

$$F_{R}=M_{R}(t)\ddot{x}_{d}+B_{R}(t)\dot{x}_{d}+K_{R}(t)x_{d} \tag{۲۲-۵}$$

که در آن $M_R(t)$، $B_R(t)$ و $K_R(t)$ به ترتیب ضریب اینرسی، اصطکاک و سختی مطلوب نام دارند. این ماتریس‌های قطری، پارامترهای امپدانس متغیر با زمان‌اند که قابل طراحی می‌باشند. مدل امپدانس مطلوب بر طبق رابطه (۵-۱۸) درحالتی‌که $M_{Ri}(t)=0$ [۴۴] منظور گردد، به صورت زیر خواهد بود.

$$F_{Ri}(s)-F_{ei}(s)=(B_{Ri}(s)s+K_{Ri}(\mathrm{s}))x_i(s) \tag{۲۳-۵}$$

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

$$\dot{x}_i=-B_{Ri}^{-1}(t)K_{Ri}(t)x_i-B_{Ri}^{-1}(t)F_{ei}+B_{Ri}^{-1}(t)F_{Ri} \tag{۲۴-۵}$$

با استفاده از معادلات اسکالر برای $i=1,...,n$ معادله ماتریسی به صورت زیر خواهد بود.

$$\dot{x}=-B_{R}^{-1}(t)K_{R}(t)x-B_{R}^{-1}(t)F_{e}+B_{R}^{-1}(t)F_{R} \tag{۲۵-۵}$$

با جایگذاری رابطه (۵-۲۲) برای $M_R(t)=0$ [۴۴] در رابطه (۵-۲۵) به صورت زیر قابل بیان است:

$$\dot{x}=\dot{x}_d+B_{R}^{-1}(t)K_{R}(\mathrm{t})(x_d-x)-B_{R}^{-1}(t)F_{e} \tag{۲۶-۵}$$

قانون کنترل‌کننده امپدانس که بر پایه قانون امپدانس (۵-۲۲) پایه‌گزاری شده است، با جایگذاری رابطه (۵-۲۶) در رابطه (۵-۱۴) به صورت زیر خواهد بود. بر طبق این رابطه به کنترل امپدانس ربات، با استفاده از راهبرد ولتاژ موتورها پرداخته می‌شود.

$$RI_a+L\dot{I}_a+K_b r^{-1}J^{-1}(q)(\dot{x}_d+B_{R}^{-1}(t)K_{R}(\mathrm{t})(x_d-x)-B_{R}^{-1}(t)F_{e})+\phi=u \tag{۲۷-۵}$$

قانون کنترل (۵-۲۷) به دلیل شناخته نبودن اغتشاش‌های خارجی ϕ و مشخص نبودن مقادیر دقیق آن، قابل محاسبه نمی‌باشد. برای جبران نامعینی‌ها، قانون کنترل مقاوم زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$\hat{R}I_a + \hat{K}_b \hat{r}^{-1}\hat{J}^{-1}(q)(\dot{x}_d + B_R^{-1}(t)K_R(\mathrm{t})(x_d - x) - B_R^{-1}(t)F_e + \mathrm{u}_c) = u \qquad (۵\text{-}۲۸)$$

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 (۵-۲۸) در سیستم (۵-۹) به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1}\dot{q} + \phi = \hat{K}_b \hat{r}^{-1}\hat{J}^{-1}(q)(\dot{x}_d + B_R^{-1}(t)K_R(\mathrm{t})(x_d - x) - \\ B_R^{-1}(t)F_e + \mathrm{u}_c) + \hat{R}I_a \end{aligned} \qquad (۵\text{-}۲۹)$$

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

$$\begin{aligned} -F_e + B_R(t)(\dot{\mathrm{x}}_d - \dot{x}) + K_R(t)(\mathrm{x}_d - \mathrm{x}) = -B_R(t)\dot{x} - B_R(t)u_c \\ + \mathrm{B}_R(t)\hat{J}(q)\hat{r}\hat{K}_b^{-1}((R - \hat{R})I_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1}\dot{q} + \phi) \end{aligned} \qquad (۵\text{-}۳۰)$$

هم‌چنین این رابطه را به صورت زیر، می‌توان بیان نمود.

$$B_R^{-1}(t)(-\mathrm{F}_e + \mathrm{B}_R(\mathrm{t})(\dot{\mathrm{x}}_d - \dot{\mathrm{x}}) + \mathrm{K}_R(\mathrm{t})(\mathrm{x}_d - \mathrm{x})) = \eta - \mathrm{u}_c \qquad (۵\text{-}۳۱)$$

که در این رابطه η مجموع نامعینی‌هاست، به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\eta = \hat{J}(q)\hat{r}\hat{K}_b^{-1}((\mathrm{R} - \hat{\mathrm{R}})\,\mathrm{I}_a + \mathrm{L}\dot{\mathrm{I}}_a + \mathrm{K}_b\mathrm{r}^{-1}\dot{\mathrm{q}} + \phi) - \mathrm{J(q)}\,\dot{\mathrm{q}} \qquad (۵\text{-}۳۲)$$

مجموع نامعینی‌ها که η نام دارد، محدود است.

$$\|\eta\| \le \rho \qquad (۵\text{-}۳۳)$$

حد بالای نامعینی‌ها را، به صورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\rho = \alpha_u \|\dot{q}\| + \beta_u + \gamma_u \|I_a\| \tag{۳۴-۵}$$

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

$$\left\|\hat{J}(q)\hat{r}\hat{K}_b^{-1}K_b r^{-1} - J(q)\right\| \le \alpha_u,\ \left\|\hat{J}(q)\hat{r}\hat{K}_b^{-1}\right\|.\left\|L\dot{I}_a + \phi\right\| \le \beta_u,\ \left\|\hat{J}(q)\hat{r}\hat{K}_b^{-1}(\mathrm{R}-\hat{\mathrm{R}})\right\| \le \gamma_u \tag{۳۵-۵}$$

نکته لازم برای قبولی معادله (۵-۳۵) این است که؛ $\hat{J}(q)$ و $J(q)$ محدود هستند. همچنین K، $\hat{K}$، $\hat{R}$، R و L ماتریس‌های ثابت هستند. با استفاده از معادلات (۵-۳۱) تا (۵-۳۴) قانون کنترل را به صورت زیر پیشنهاد می‌کنیم.

$$u_c = \alpha(t)\dot{q} + \beta(t)\mathrm{d} + \gamma(t)\mathrm{I}_a \tag{۳۶-۵}$$

که در رابطه بالا $\alpha(t)$، $\beta(t)$ و $\gamma(t)$ پارامترهای طراحی کنترل‌کننده و $d \in R^n$ بردار واحد است. حال برای آنکه کنترل امپدانس رابطه (۵-۲۲) فراهم گردد، بایستی ترم مقاوم u_c به گونه‌ای طراحی شود که u_c به سمت η میل کند ($u_c \to \eta$). به منظور تحقق این هدف یک تابع اسکالر مثبت معین لیاپانوف $V(t)$ [۵۷] به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

$$V(t) = 0.5E^T E \tag{۳۷-۵}$$

که در رابطه بالا E به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$E = \eta - u_c \tag{۳۸-۵}$$

برای آن که u_c به سمت η میل کند ($u_c \to \eta$)، پارامترهای طراحی کنترل‌کننده باید به گونه‌ای به‌روز گردند تا $V(t) \to 0$. با جایگذاری رابطه (۵-۳۱) در رابطه (۵-۳۸)، نتیجه زیر حاصل می‌شود.

$$E = B_R^{-1}(t)(-\mathrm{F}_e + \mathrm{B}_R(\mathrm{t})(\dot{\mathrm{x}}_d - \dot{\mathrm{x}}) + \mathrm{K}_R(\mathrm{t})(\mathrm{x}_d - \mathrm{x})) \tag{۳۹-۵}$$

به کمک روابط (۵-۳۶)، (۵-۳۷) و (۵-۳۸) 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 $E\to 0$، نتایج زیر حاصل می‌گردد.

$$\dot{\alpha}=-\lambda_{\alpha}\frac{\partial V}{\partial \alpha} \tag{۵-۴۰}$$

$$\dot{\beta}=-\lambda_{\beta}\frac{\partial V}{\partial \beta} \tag{۵-۴۱}$$

$$\dot{\gamma}=-\lambda_{\gamma}\frac{\partial V}{\partial \gamma} \tag{۵-۴۲}$$

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 $\|E\|\le\|E(0)\|$. حال به این نتیجه می‌توان رسید که:

نتیجه۱: E محدود است. با استفاده از روابط (۵-۳۶)، (۵-۳۷) و (۵-۳۸) می‌توان به نتایج زیر رسید.

$$\frac{\partial V}{\partial \alpha}=-\dot{q}^{T}E \tag{۵-۴۳}$$

$$\frac{\partial V}{\partial \beta}=-d^{T}E \tag{۵-۴۴}$$

$$\frac{\partial V}{\partial \gamma}=-I_{a}^{\ T}E \tag{۵-۴۵}$$

با جایگذاری رابطه (۵-۴۳) در (۵-۴۰)، رابطه (۵-۴۴) در (۵-۴۱) و رابطه (۵-۴۵) در (۵-۴۲) نتایج زیر حاصل می‌گردد.

$$\alpha(t)=\int_0^t \lambda_{\alpha}\dot{q}^{T}E dt+\alpha(0) \tag{۵-۴۶}$$

$$\beta(t)=\int_0^t \lambda_{\beta}d^{T}E dt+\beta(0) \tag{۵-۴۷}$$

$$\gamma(t) = \int_0^t \lambda_\gamma I_a^{\ T} E dt + \gamma(0) \qquad (۴۸-۵)$$

۵-۳-۲ تحلیل پایداری

در این قسمت اثبات می‌شود که متغیرهای حالت محدود هستند. ابتدا فرض‌های زیر برای تحلیل پایداری[۶۳] 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 (۵-۹) محدود است.

$$\|\phi(t)\| \le \phi_{\max} \qquad (۴۹-۵)$$

برای آن که نقطه تکینی 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 $\det(\mathrm{J(q)}) \neq 0$.

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 $|u_i| \le u_{\max}$ که u_i ولتاژ موتور iام می‌باشد و $u_{\max}$ حداکثر ولتاژ است.

در رابطه (۵-۲۲) با اعمال $M_{Ri}(t) = 0$ [۴۴] می‌توان نوشت:

$$B_R(t)\dot{x}_d + K_R(t)x_d = W \qquad (۵۰-۵)$$

که در رابطه بالا W به صورت زیر توصیف می‌گردد.

$$W = B_R(t)E + F_e + B_R(t)\dot{x} + K_R(t)x \qquad (۵-۵۱)$$

در معادله (۵-۵۰) با توجه به فرض اول و این نکته که ماتریس‌های $B_R(t)$ و $K_R(t)$ قطری مثبت هستند، بنابراین رابطه (۵-۵۰) یک معادله مرتبه اول خطی با ورودی محدود است. در رابطه (۵-۵۱)، مقدار E بر طبق نتیجه ۱ محدود است و نیروی اعمالی توسط سلول در نقطه تماس F_e، نیز محدود است. پس این نتیجه حاصل می‌گردد که سیستم خطی (۵-۵۱)، به دلیل محدود بودن ورودی، برطبق قضیه راث-هرویتس محدود است.

نتیجه۲: متغیرهای x، $\dot{x}$ و $\ddot{x}$ 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.

نتیجه۳: ماتریس ژاکوبین $J(q)$، محدود است. به کمک فرض ۳ و نتیجه ۳ می‌توان اظهار کرد:

نتیجه۴: ماتریس معکوس $J(q)$، به معنای دیگر ماتریس $J(q)^{-1}$ محدود است.

در رابطه (۵-۱۳) با استفاده از نتیجه۲ و نتیجه ۴، می‌توان به نتیجه زیر دست یافت.

نتیجه۵: متغیر حالت $\dot{q}$ محدود است.

از طرفین رابطه (۵-۱۳) انتگرال‌گیری کرده و رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$q = \int_{x_0}^{x} J(q)^{-1} d\delta \qquad (۵-۵۲)$$

نتیجه۶: متغیر حالت q محدود است.

با استفاده از رابطه (۵-۴) و محدود بودن $\ddot{x}$، $\dot{q}$ و $J(q)^{-1}$ به ترتیب در نتایج ۲، ۵ و ۴ و به دلیل مشتق‌پذیر بودن $J(q)$، نتیجه زیر حاصل می‌شود.

نتیجه۷: متغیر حالت $\ddot{q}$ محدود است.

در رابطه (۵-۱) با استفاده از محدود بودن q، $\dot{q}$، $\ddot{q}$ و F_e می‌توان به نتیجه زیر دست یافت.

نتیجه۸: بردار گشتاور مفاصل ربات τ_r، محدود است.

با استفاده از ویژگی‌های دینامیک ربات و محدود بودن متغیر q نتیجه می‌دهد، ماتریس $D(q)$ و $g(q)$ محدود است. هم‌چنین محدود بودن $\dot{q}$ نیز منجر به محدود بودن $C(q,\dot{q})$ می‌شود.

در معادله (۵-۷) بردارهای $\dot{q}$، $\ddot{q}$ و τ_r محدودند و ماتریس‌های J_m، B_m و r ثابتند. بنابراین داریم:

نتیجه۹: بردار گشتاور موتور τ_m، محدود است.

از معادله (۵-۱۰) می‌توان این رابطه را به صورت زیر نوشت:

$$I_a = K_m^{-1}\tau_m \qquad (۵۳-۵)$$

در رابطه بالا K_m ماتریس ثابت و باتوجه به نتیجه ۹، τ_m محدود است. نتیجه زیر بدست می‌آید.

نتیجه۱۰: بردار جریان موتور I_a، محدود است.

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

۵-۳-۳ طراحی ضرایب امپدانس ربات با الگوریتم گرادیان نزولی

ابتدا در الگوریتم گرادیان نزولی یک تابع از خطا داریم، تا هدف به خوبی تخمین زده شود. تابع خطا که ε نام دارد، به صورت تفاضل مقدار واقعی هدف و مقدار خروجی مورد نظر تعریف می‌شود. هدف استفاده از الگوریتم گرادیان نزولی این است که، مقدارها به گونه‌ای تخمین زده شود تا خطای ε، کمینه گردد[۶۴]. در این حالت یک تابع مثبت معین $\mathrm{S}(t)$ پیشنهاد می‌گردد و برای تحقق هدف $\varepsilon \to 0$ لازم است $\dot{\mathrm{S}}(t) < 0$. بنابراین ضرایب امپدانس ربات باید به گونه‌ای تنظیم بشوند، تا

$F_e \to F_d$ میل کند که در بحث امپدانس ربات F_d همان F_R می‌باشد. به منظور تحقق این هدف، تابع اسکالر معین مثبت $S(t)$، به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد و رابطه بعد نیز برقرار است.

$$S(t) = 0.5\varepsilon^T \varepsilon \qquad (۵۴-۵)$$

$$\varepsilon = F_d - F_e \qquad (۵۵-۵)$$

در رابطه (۴-۲۲) و با فرض $dF_e = 0$ در بازه زمانی تزریق ۴ تا ۶ ثانیه، رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} &\frac{\partial F_R}{\partial B_R} = (\dot{x}_d), \frac{\partial F_R}{\partial K_R} = (x_d) \\ &dF_e = 0 \quad if \quad 4 \le t \le 6 \end{aligned} \qquad (۵۶-۵)$$

بنابراین به کمک الگوریتم گرادیان نزولی، برای کاهش S می‌توان نوشت:

$$\dot{B}_R(t) = -\lambda_\alpha (F_R - F_e)(\dot{x}_d)^T \qquad (۵۷-۵)$$

$$\dot{K}_R(t) = -\lambda_\beta (F_R - F_e)(x_d)^T \qquad (۵۸-۵)$$

در رابطه بالا ضرایب λ_α و λ_β مثبت هستند. پارامترهای امپدانس، توسط روابط زیر به‌روز می‌شوند.

$$B_R(t) = -\lambda_\alpha \int_0^t (F_R - F_e)(\dot{x}_d)^T dt' + B_R(0) \qquad (۵۹-۵)$$

$$K_R(t) = -\lambda_\beta \int_0^t (F_R - F_e)(x_d)^T dt' + K_R(0) \qquad (۶۰-۵)$$

۵-۴ مدل‌سازی محیط به شکل سلول تحت تزریق

مدل‌سازی محیط به شکل سلول که روشی ساده است، را به صورت زیر می‌توان مطرح نمود[۲۸].

$$F_e = K_e(x - x_e) \qquad (۶۱-۵)$$

که در این رابطه K_e سختی محیط، x_e موقعیت پوسته سلول که تغییر شکل نداده و x موقعیت نقطه انتهایی تزریق‌کننده که در این حالت سلول تغییر شکل یافته می‌باشد[۴۰]. مدل پیشنهادی دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت محیط، به صورت زیر است[۱].

$$F_e = Ax^2 + Bx \tag{۶۲-۵}$$

در این رابطه F_e نیروی تماس و A و B ضرایب عبارت درجه دو و عبارت خطی هستند. تابع هزینه J، که بایستی مقدار آن را کمینه کرد، به صورت زیر تعیین می‌گردد[۱].

$$J = \int_0^t e^{-\lambda(t-r)} [y(r) - w(r)\hat{a}(t)]^2 dr \tag{۶۳-۵}$$

در این حالت $w^T = \begin{bmatrix} x^2 \\ x \end{bmatrix}$ ، $y = F_e$ و $\hat{a} = \begin{bmatrix} \hat{A} \\ \hat{B} \end{bmatrix}$ است که $\hat{A}$ و $\hat{B}$ مقادیر تخمین زده از A و B می‌باشند. در این محاسبات، $\lambda = 0.9$ یک مقدار ثابت به نام فاکتور فراموشی است. قانون به‌روزرسانی از طریق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد[۱].

$$\dot{\hat{a}}(t) = -p(t) w^T e(t) \tag{۶۴-۵}$$

$$e(t) = \hat{a}^T(t) w^T - y(t) \tag{۶۵-۵}$$

قانون به‌روزرسانی بهره، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{d}{dt}[p] = -\lambda p - p w^T w p \tag{۶۶-۵}$$

$$p(0) = \begin{bmatrix} \kappa & 0 \\ 0 & \kappa \end{bmatrix} \tag{۶۷-۵}$$

در این روابط مقادیر اولیه باتوجه به شرایط سیستم تعیین می‌گردد[۱].

۵-۵ شبیه‌سازی سیستم کنترلی

در این قسمت به شبیه‌سازی قانون کنترل امپدانس ولتاژ (۵-۲۸)، برای بازوی سه رابطی ربات اسکارا می‌پردازیم. هر رابط به وسیله یک موتور DC مغناطیس دائم، تحریک می‌شود. این شبیه‌سازی با طول گام ۰,۰۰۱ در مدت زمان ۱۰ ثانیه انجام شده است. مدل ربات توسط رابطه (۵-۵) به دست

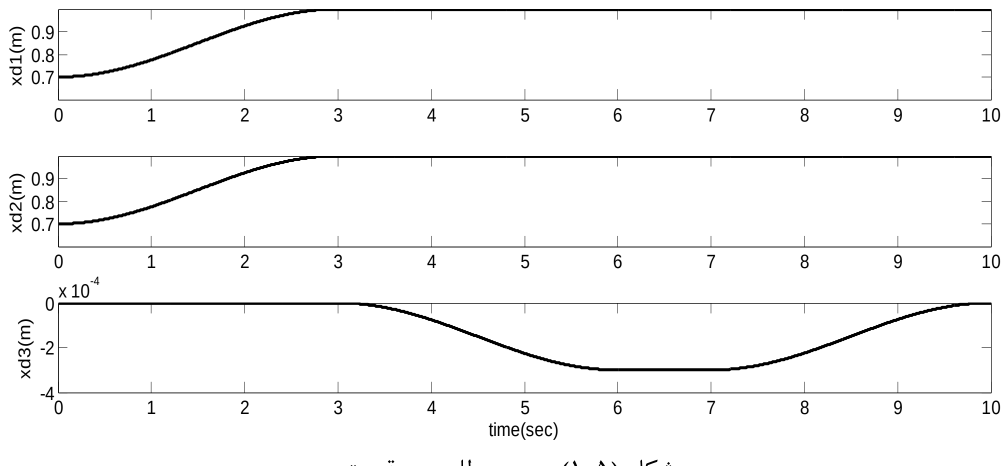
می‌آید. با توجه به کاربرد ربات اسکارا در این تحقیق، مسیر مطلوب موقعیت که $x_d = [x_{d1} \quad x_{d2} \quad x_{d3}]^T$ نام دارد، در شکل (۵-۱) قابل مشاهده است. این مسیر نرم و حداقل تا درجه دو مشتق‌پذیر را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

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

$$x_{d2} = x_{d1} \tag{۵-۶۸}$$

$$x_{d3} = \begin{cases} 0 & 0 \le t < 3 \\ 0.001(-0.15)(1+\cos(\pi t/3)) & 3 \le t < 6 \\ 0.001(-0.3) & 6 \le t < 7 \\ 0.001(-0.15)(1-\cos(\pi t/3)) & 7 \le t < 10 \end{cases}$$

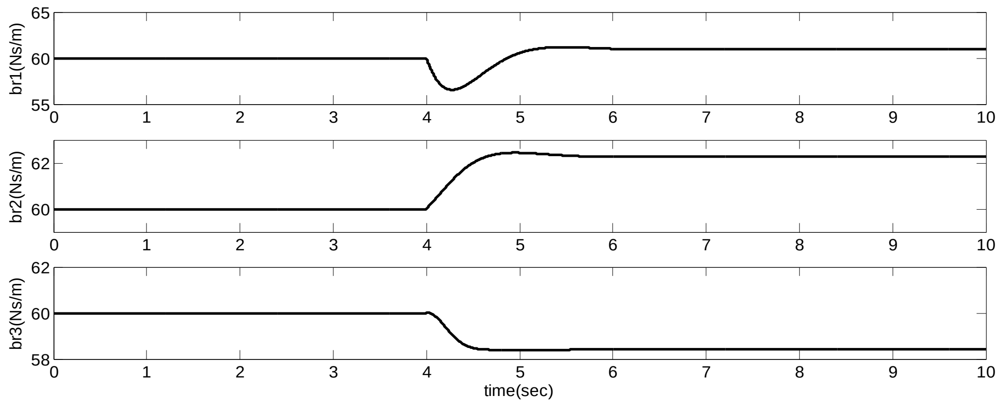
ابتدا مسیر ردگیری مطلوب را به گونه‌ای برای ربات در نظر می‌گیریم، که در قبل از زمان ۴ ثانیه از موقعیت ابتدایی بر روی سلول قرار گرفته و از زمان ۴ ثانیه فرآیند تزریق سلولی آغاز شود. به دلیل کوچک بودن ابعاد قطر سلول که حدود ۵۰۰ میکرومتر است[۱]، جابجایی در محور z متناسب سایز سلول تعیین می‌شود. در این شرایط مختصات نقطه برخورد ربات با محیط در زمان ۴ ثانیه، به صورت $x_e = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -7.49\times10^{-5} \end{bmatrix}^T$ قابل بیان است.



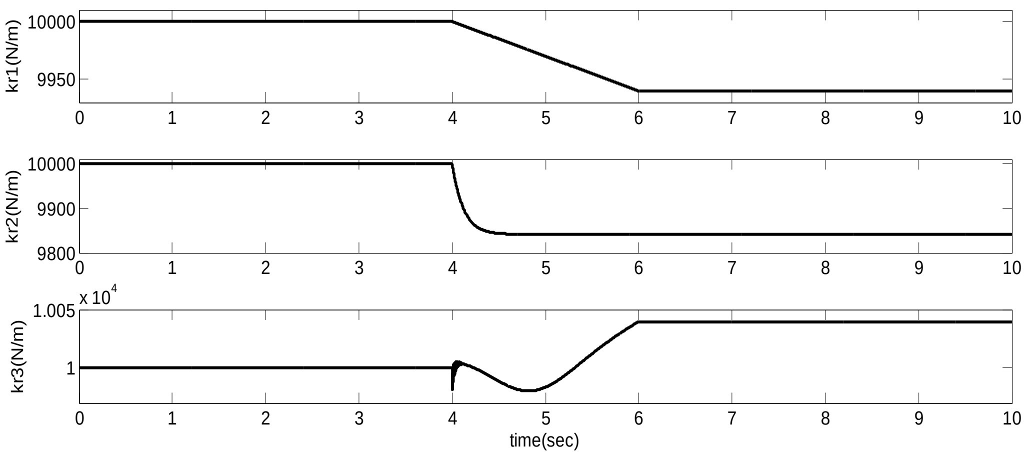
شکل (۵-۱) مسیر مطلوب موقعیت

در این حالت، ابتدا ربات را در نقطه اولیه به مختصات $x_0 = [0.7 \quad 0.7 \quad 0]^T \; m$ قرار می‌دهیم. این نقطه بر اساس موقعیت صفحه سلولی، تعیین می‌گردد. مدل امپدانس ربات اسکارا طبق رابطه (۵-۲۲)

به دست می‌آید و باتوجه به کاربرد ربات در تزریق سلولی، $M_{Ri} = 0$ است. پارامترهای امپدانس B_{Ri} و K_{Ri} برای $i = 1,2,3$ قابل طراحی می‌باشند. این پارامترها با الگوریتم گرادیان نزولی، توسط روابط (۵-۵۹) و (۵-۶۰) به‌روز می‌شوند. شکل (۵-۲) و (۵-۳) تنظیم پارامترهای امپدانس ربات را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲) تنظیم پارامتر ضریب اصطکاک

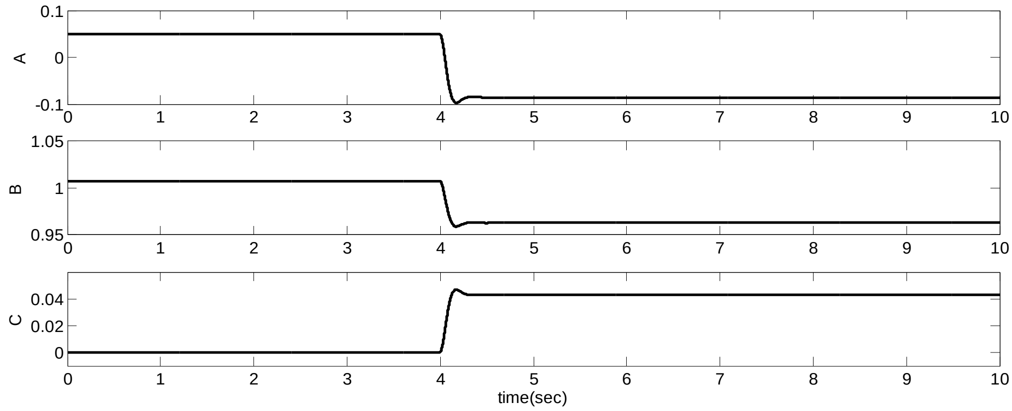


شکل (۵-۳) تنظیم پارامتر ضریب سختی

مدل‌سازی محیط به کمک رابطه (۵-۶۲) به صورت معادله چندجمله‌ای درجه دو دارای دقت مناسبی است، اما اگر مدل غیرخطی آن تغییر یابد، نتایج حاصل از آن به مدل واقعی نزدیک‌تر است[۱]. در این پایان‌نامه محیط را به کمک معادله غیرخطی زیر، پیشنهاد می‌کنیم.

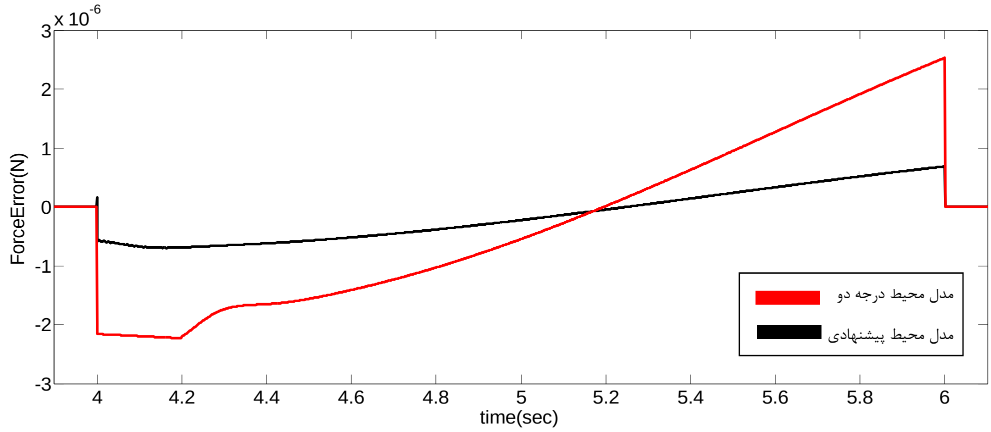
$$F_e = Ax_3^2 + Bx_3 + C\sin(x_3) \qquad (۵-۶۹)$$

در این حالت تابع هزینه، همان رابطه (۵-۶۳) است و $w=[x^2 \quad x \quad \sin(x)]$، $y=F_e$ و $\hat{a}=\begin{bmatrix}\hat{A} & \hat{B} & \hat{C}\end{bmatrix}^T$، $\hat{A}$، $\hat{B}$ و $\hat{C}$ مقادیر تخمینی A، B و C هستند. فاکتور فراموشی $\lambda=0.9$، در نظر گرفته شد. قانون به روزرسانی پارامترها، بر طبق روابط (۵-۶۴)، (۵-۶۵) و (۵-۶۶) لحاظ می‌شود. به دلیل شروع فرایند تزریق از لحظه ۴ به بعد، تخمین پارامترها هم از این لحظه به روز می‌شود. شکل (۵-۴) تخمین پارامترهای مدل محیط را نشان می‌دهد.



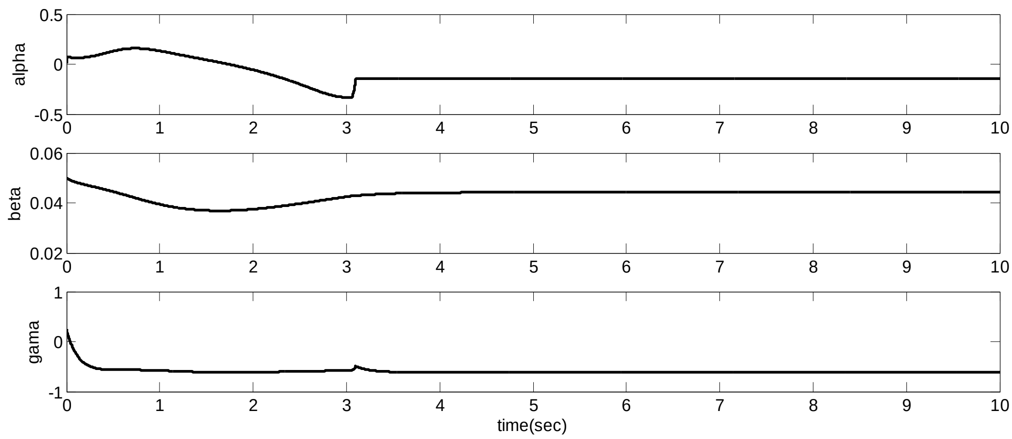
شکل (۵-۴) تخمین پارامترهای A، B و C

به دلیل برخورد ربات با محیط، در نقطه تماس نوسان کمی ایجاد می‌شود. با توجه با اینکه ابعاد سلول در حد میکرون است، استفاده از یک تابع سینوسی باعث کاهش خطای نیرو و نزدیک‌تر شدن مدل پیشنهادی به مدل واقعی می‌گردد. کارایی مدل محیط پیشنهادی در کاهش خطای نیروی وارده از سوی ربات به محیط، در شکل (۵-۵) قابل مشاهده است. میزان خطای نیرو در قبل از زمان ۴ ثانیه و بعد از زمان ۶ ثانیه، در هر دو نمودار صفر است.



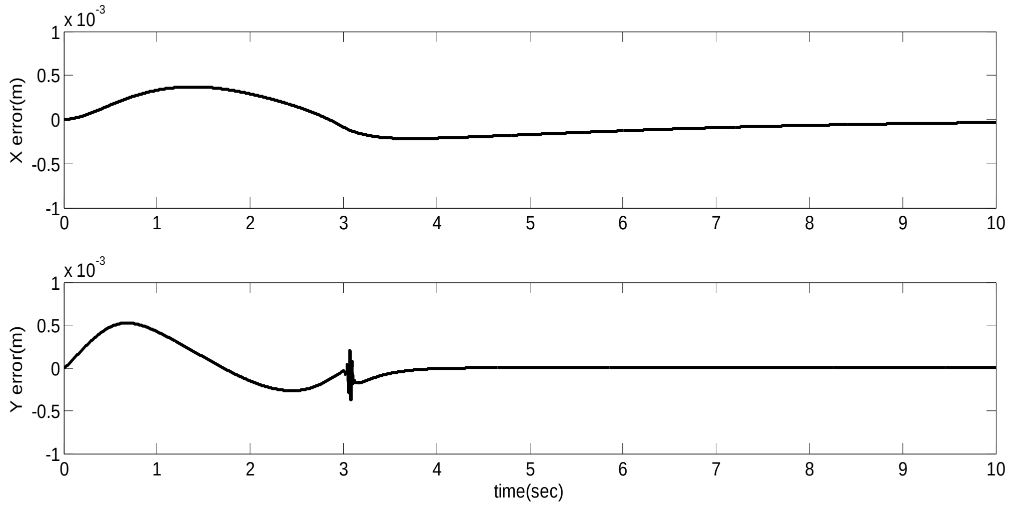
شکل (۵-۵) کاهش خطای نیرو در مدل محیط پیشنهادی

در این قسمت طراحی، کنترل‌کننده با استفاده از روش مقاوم در حضور نامعینی‌های احتمالی موجود در رابطه (۵-۲۸) بیان شده است. پارامترهای نامعینی $\hat{R}$، $\hat{K}_b$، $\hat{r}$ هریک به اندازه ٪۹۰ مقدار واقعی خودشان فرض شده‌اند. همچنین نرخ همگرایی‌ها به ترتیب $\lambda_\alpha = 100$، $\lambda_\beta = 100$ و $\lambda_\gamma = 100$ منظور می‌گردند. پارامترهای طراحی کنترل‌کننده $\alpha(t)$، $\beta(t)$ و $\gamma(t)$ برطبق روابط (۵-۴۶)، (۵-۴۷) و (۵-۴۸) مطابق با شکل (۵-۶)، تنظیم می‌شوند.



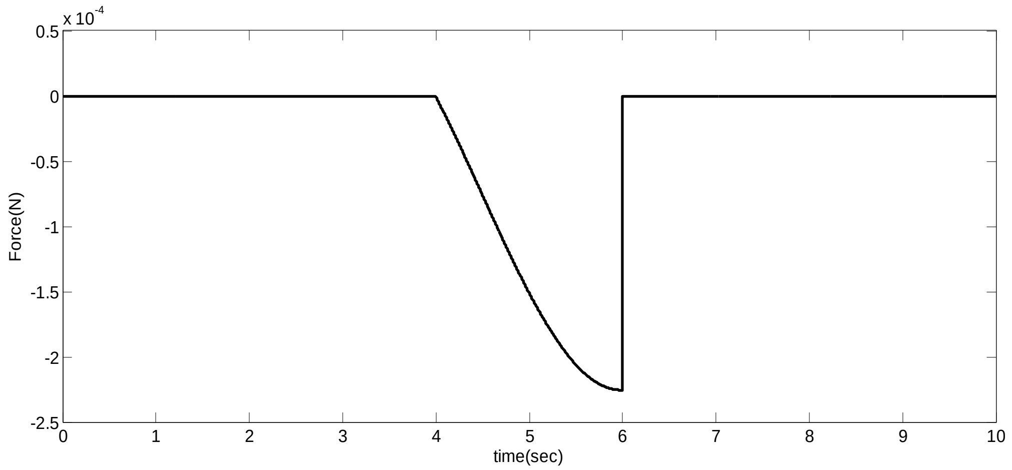
شکل (۵-۶) تنظیم پارامترهای طراحی کنترل‌کننده

با توجه به کاربرد ربات اسکارا در تزریق سلولی، در محور x و y کنترل موقعیت داریم. همانطور که در شکل (۵-۷) مشاهده می‌شود، ردگیری به خوبی محقق شده است و خطای موقعیت در این دو محور، حداکثر m $\left[3.8\times10^{-4} \quad 5\times10^{-4}\right]^T$ می‌باشد.



شکل (۵-۷) خطای ردگیری موقعیت

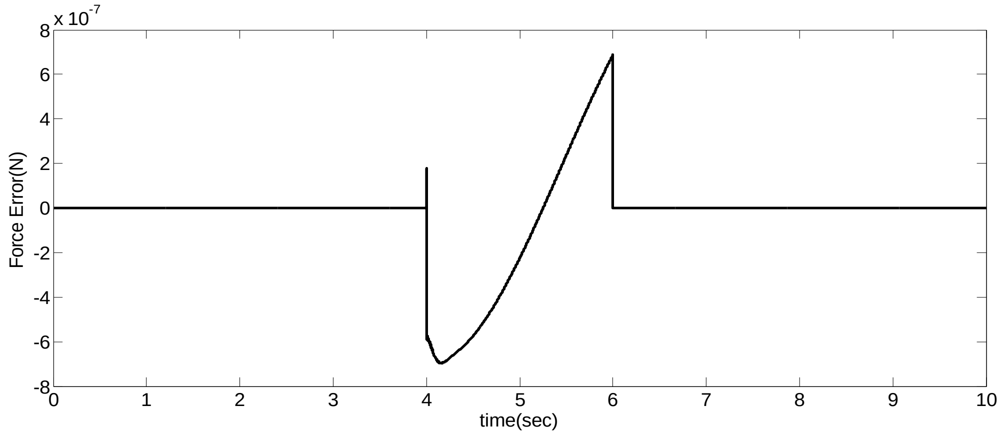
ربات اسکارا در تزریق سلولی، قبل از برخورد هیچ نیرویی به محیط، اعمال نمی‌کند. پس از برخورد، نیروی F_e از سوی محیط به ربات وارد می‌شود. مدت زمان تزریق، بین ۴ تا ۶ ثانیه است. پس از آن ماده شیمیایی توسط ابزار تزریق در زمان ۶ تا ۷ ثانیه، به سلول وارد می‌گردد. سپس ربات مسیر بازگشت به نقطه اولیه خود را طی می‌کند. نیروی وارده از سوی محیط به ربات در شکل (۵-۸) آورده شده است.



شکل (۵-۸) نیروی اعمالی در نقطه برخورد

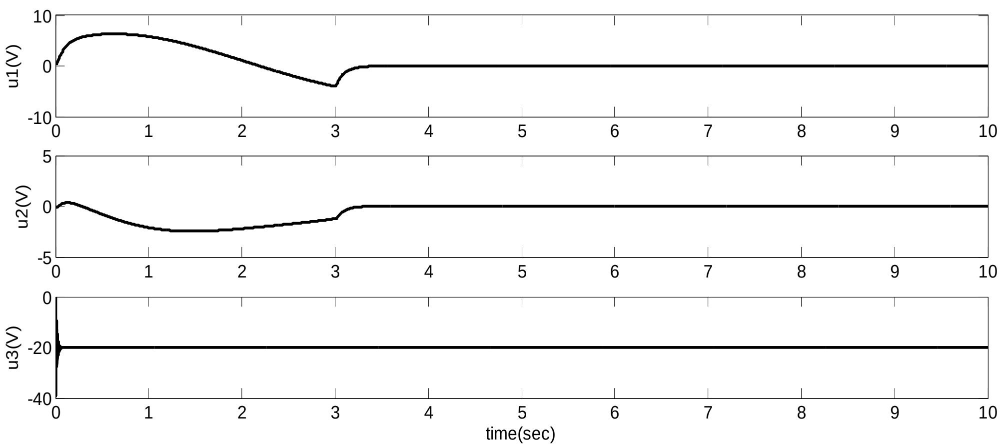
در حالت کنترل امپدانس، نیروی F_R که ربات در نقطه تماس به محیط وارد می‌کند، به عنوان نیروی مطلوب شناخته می‌شود. هدف این است که؛ با توجه به مدل پیشنهادی امپدانس ربات و محیط،

نیروی F_e تا حدامکان 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 (۵-۹)، قابل مشاهده است.



شکل (۵-۹) خطای نیروی اعمالی

ولتاژ موتورها در مقدارهای اسمی، رفتار بسیار مطلوبی دارند. موتور ۳ دارای ولتاژ ۲۰- ولت برای اعمال به نقطه برخورد است. در حالی‌که موتور ۱ و ۲ در زمان شروع فرآیند تزریق، تقریبا ولتاژی ندارند، زیرا باری بر روی مفاصل آن‌ها نیست. نمودار ولتاژ موتورها در شکل (۵-۱۰)، قابل مشاهده است.



شکل (۵-۱۰) ولتاژ موتورها

۵-۶ نتیجه‌گیری

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 فصل به ارائه یک روش کنترل مقاوم بر مبنای راهبرد ولتاژ پرداخته شد. هم‌چنین کنترل امپدانس با ضرایب ثابت در کاربردهایی که دینامیک محیط متغیر است، به خوبی جوابگو نمی‌باشد. بنابراین ضرایب امپدانس بازوی ربات بر پایه گرادیان نزولی، تنظیم می‌گردد.

در این حالت پارامترهای مدل محیط توسط مدل غیرخطی پیشنهادی، تخمین زده می‌شود و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا، بهینه می‌شود. تحلیل پایداری روش کنترلی پیشنهادی، نشان می‌دهد که سیستم 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 را نشان می‌دهد.

فصل ۶ : کنترل امپدانس مقاوم فازی ربات اسکارا با راهبرد ولتاژ به منظور تزریق سلولی

پیامبر اکرم(ص) فرموده‌اند: فرشتگان بال‌های خود را برای جوینده دانش می‌گسترانند و برایش طلب آمرزش می‌کنند.
کنزالعمال، حکمهٔ ۳۹۸

۶–۱ مقدمه

روش فازی به دلیل توانایی مقابله با سیستم‌های همراه با نامعینی و غیرخطی، به صورت ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌است[۶۵]. یکی از کاربردهای سیستم فازی در علم رباتیک، تنظیم و تطبیق پارامترهای کنترل‌کننده به منظور بهبود کارایی در حضور نامعینی‌هاست[۶۶]. اکنون نگاهی تازه به نحوه تنظیم ضرایب به روش فازی[۶۷] و فازی-عصبی[1][۶۸] می‌گردد و به تبیین قانون‌های فازی، برای سیستم موردنظر[۶۹] پرداخته می‌شود. در این فصل از قدرت سیستم‌های فازی، در تعیین پارامترهای امپدانس ربات بهره می‌گیریم.

در این قسمت به طراحی کنترل‌کننده مقاوم ربات اسکارا با راهبرد ولتاژ به منظور سیستم تزریق سلولی، پرداخته شده است. این کنترل‌کننده در حضور اغتشاش خارجی و نامعینی‌ها می‌باشد. در این حالت پارامترهای مدل محیط توسط مدل غیرخطی پیشنهادی، تخمین زده می‌شود و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا، بهینه می‌گردد. تحلیل پایداری روش کنترلی پیشنهادی، نشان می‌دهد که سیستم پایدار است. نتایج شبیه‌سازی نیز، کارایی روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

۶–۲ معادلات دینامیکی ربات

بازوی ربات از n رابط که به وسیله n مفصل به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل می‌شود. هر رابط به وسیله یک موتور dc مغناطیس دائم، راه‌اندازی می‌گردد. معادلات دینامیکی ربات با فرض عدم وجود انعطاف‌پذیری در مفاصل، به صورت معادله (۶-۱) قابل بیان است[۴۴].

$$D(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+g(q)+J^T(q)F_e=\tau_r \qquad (۱-۶)$$

که در آن $q\in R^n$ بردار موقعیت مفاصل ربات، $D(q)\in R^{n\times n}$ ماتریس اینرسی ربات، $C(q,\dot{q})\dot{q}\in R^n$ بردار گشتاورهای کوریولیس، $g(q)\in R^n$ بردار گشتاورهای گرانشی، $F_e\in R^m$

[1] neural

ماتریس نیروی وارده در نقطه تماس و $\tau_r \in R^n$ بردار گشتاور ربات است. هم‌چنین $J(q) \in R^{m\times n}$ ماتریس ژاکوبین ربات می‌باشد. رابطه ماتریس ژاکوبین، به صورت زیر قابل بیان است[۴۴].

$$\dot{x} = J(\mathrm{q})\dot{\mathrm{q}} \tag{۲-۶}$$

که در آن $x \in R^m$ موقعیت نقطه انتهایی ربات، نامیده می‌شود. با مشتق رابطه (۶-۲) داریم:

$$\ddot{x} = \dot{J}(q)\dot{q} + J(q)\ddot{q} \tag{۳-۶}$$

بنابراین $\ddot{q}$ از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\ddot{q} = J(q)^{-1}(\ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q}) \tag{۴-۶}$$

با جایگذاری رابطه (۶-۴) در رابطه (۶-۱) داریم:

$$D(q)J(q)^{-1}\ddot{x} + h(q,\dot{q}) + J^T(q)F_e = \tau_r \tag{۵-۶}$$

که در رابطه (۶-۵) مقدار $h(q,\dot{q})$ به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$h(q,\dot{q}) = -D(q)J(q)^{-1}\dot{J}(q)\dot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) \tag{۶-۶}$$

موتورهای الکتریکی، گشتاور مفاصل ربات را بر طبق رابطه زیر به وجود می‌آورند[۴۴].

$$J_m r^{-1}\ddot{q} + B_m r^{-1}\dot{q} + r\tau_r = \tau_m \tag{۷-۶}$$

که در این رابطه $\tau_m \in R^n$ بردار گشتاور موتورها، J_m، B_m و r ماتریس‌های قطری $n\times n$ هستند، که به ترتیب ضرایب اینرسی، میرایی و کاهشی چرخ‌دنده موتورها نام دارند. بردار سرعت مفاصل $\dot{q}$ و سرعت موتورها $\dot{\theta}_m \in R^n$ توسط چرخ‌دنده‌ها، به کمک رابطه زیر به یکدیگر مرتبط می‌شوند[۴۴].

$$\dot{q} = r\dot{\theta}_m \tag{۸-۶}$$

به منظور تأمین ولتاژ موتورها به عنوان ورودی سیستم، بایستی معادله الکتریکی موتورهای جریان مستقیم با جاروبک مغناطیسی در نمایش ماتریسی، به صورت زیر منظور گردد[۴۴].

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1}\dot{q} + \phi = u \tag{۶-۹}$$

که در آن $u \in R^n$ بردار ولتاژ موتورها، $I_a \in R^n$ بردار جریان موتورها، $\phi \in R^n$ بردار اغتشاشات خارجی، R، L و K_b که به ترتیب بیان‌گر ماتریس‌های قطری $n \times n$ برای ضرایب مقاومت آرمیچر، اثر تزویج و جریان بازگشتی می‌باشند. بردار گشتاور موتورها τ_m به عنوان ورودی معادله دینامیکی (۶-۷)، توسط جریان موتورها بر طبق رابطه زیر به دست می‌آید[۴۴].

$$\tau_m = K_m I_a \tag{۶-۱۰}$$

که در این رابطه K_m، ماتریس قطری ثابت گشتاور است. مدل فضای حالت موتورهای الکتریکی ربات را با استفاده از معادله (۶-۱) و رابطه (۶-۱۰) می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$\dot{z} = f(z) + bw - b\varphi \tag{۶-۱۱}$$

در این رابطه $w = \begin{bmatrix} F_e \\ u \end{bmatrix}$ به عنوان ورودی سیستم لحاظ می‌گردد، $\varphi = \begin{bmatrix} 0 \\ \phi \end{bmatrix}$ و $z = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ I_a \end{bmatrix}$ متغیرهای حالت هستند. هم‌چنین b و $f(z)$ به صورت زیر قابل بیان می‌باشند.

$$f(z) = \begin{bmatrix} z_2 \\ (J_m r^{-1} + rD(z_1))^{-1}(-(B_m r^{-1} + rC(z_1, z_2))z_2 - rg(z_1) + K_m z_3) \\ -L^{-1}(K_b r^{-1} z_2 + Rz_3) \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -(J_m r^{-1} + rD(z_1))^{-1} rJ^T(z_1) & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{bmatrix} \tag{۶-۱۲}$$

معادله فضای حالت (۶-۱۲) یک سیستم چندمتغیره غیرخطی با اثر متقابل را به نمایش گذاشته است. رابطه (۶-۲) انتقالی از فضای مفصلی به فضای کار است. با استفاده از ماتریس ژاکوبین، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{x} \tag{۶-۱۳}$$

بنابراین ورودی سیستم که همان ولتاژ موتورهای الکتریکی هستند، به کمک معادله الکتریکی موتورهای جریان مستقیم با جاروبک مغناطیسی به صورت زیر تأمین می‌گردد. این رابطه نهایی به کمک روابط (۶-۹) و (۶-۱۳) به دست می‌آید.

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1} J^{-1}(q)\dot{x} + \phi = u \tag{۶-۱۴}$$

۶-۳ کنترل امپدانس مقاوم فازی با راهبرد ولتاژ

در این قسمت کنترل امپدانس مقاوم در حضور اغتشاش خارجی و نامعینی‌ها که مبتنی بر راهبرد ولتاژ است، بیان می‌شود. ضرایب امپدانس ربات متغیر با زمان هستند، که به تنظیم این ضرایب به وسیله سیستم فازی می‌پردازیم. همچنین پارامترهای مدل محیط توسط مدل غیرخطی پیشنهادی، تخمین زده می‌شود و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا، بهینه می‌گردد.

۶-۳-۱ طراحی کنترل‌کننده امپدانس مقاوم ربات

رفتار دینامیکی مطلوب سیستم ربات نسبت به محیط به صورت امپدانس مطلوب، در حوزه لاپلاس در رابطه زیر قابل بیان است[۴۴].

$$F_{Ri}(s) - Z_{Ri}(s)\, v_i(s) = F_{ei}(s) \tag{۶-۱۵}$$

که در آن $F_{Ri}(s)$ نیروی مطلوب و $Z_{Ri}(s)$ امپدانس مطلوب نام دارد. هم‌چنین $v_i(s)$ که iامین عنصر $v(s)$ است، به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$v(s) = sx(s) \tag{۱۶-۶}$$

مدل تونن امپدانس ربات اسکارا، توسط رابطه زیر پیشنهاد می‌گردد[۴۴].

$$Z_{Ri}(s) = M_{Ri}(s)s + B_{Ri}(s) + \frac{K_{Ri}(s)}{s} \tag{۱۷-۶}$$

که در آن $M_{Ri}(s)$، $B_{Ri}(s)$ و $K_{Ri}(s)$ به ترتیب ضریب اینرسی، اصطکاک و سختی مطلوب نام دارند که پارامترهای امپدانس قابل طراحی هستند. امپدانس مطلوب ربات را به کمک روابط (۶-۱۵)، (۶-۱۶) و (۶-۱۷) به صورت زیر می‌توان بیان نمود:

$$F_{Ri}(s) - F_{ei}(s) = (M_{Ri}(s)s^2 + B_{Ri}(s)s + K_{Ri}(\mathrm{s}))x_i(s) \tag{۱۸-۶}$$

نیروی مطلوب $F_{Ri}(s)$ در کنترل امپدانس نقش مهمی دارد. پس رابطه زیر را تعریف می‌کنیم[۴۴].

$$F_{Ri}(s) = Z_{Ri}(s)v_{di}(s) \tag{۱۹-۶}$$

که $v_{di}(s)$ سرعت مطلوب نامیده می‌شود. به کمک روابط (۶-۱۷) و (۶-۱۹) در حوزه لاپلاس داریم:

$$F_{Ri}(s) = (M_{Ri}(s)s^2 + B_{Ri}(s)s + K_{Ri}(\mathrm{s}))x_{di}(s) \tag{۲۰-۶}$$

رابطه بالا از حوزه لاپلاس به حوزه زمان، به صورت زیر انتقال می‌یابد.

$$F_{Ri} = M_{Ri}(t)\ddot{x}_{di} + B_{Ri}(t)\dot{x}_{di} + K_{Ri}(t)x_{di} \tag{۲۱-۶}$$

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

$$F_R = M_R(t)\ddot{x}_d + B_R(t)\dot{x}_d + K_R(t)x_d \tag{۲۲-۶}$$

که در آن $M_R(t)$، $B_R(t)$ و $K_R(t)$ به ترتیب ضریب اینرسی، اصطکاک و سختی مطلوب نام دارند. این ماتریس‌های قطری، پارامترهای امپدانس متغیر با زمان‌اند که قابل طراحی می‌باشند.

مدل امپدانس مطلوب بر طبق رابطه (۶-۱۸) درحالتی‌که $M_{Ri}(t)=0$ [۴۴] منظور گردد، به صورت زیر خواهد بود.

$$F_{Ri}(s)-F_{ei}(s)=(B_{Ri}(s)s+K_{Ri}(\mathrm{s}))x_i(s) \tag{۶-۲۳}$$

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

$$\dot{x}_i=-B_{Ri}^{-1}(t)K_{Ri}(t)x_i-B_{Ri}^{-1}(t)F_{ei}+B_{Ri}^{-1}(t)F_{Ri} \tag{۶-۲۴}$$

با استفاده از معادلات اسکالر برای $i=1,...,n$ معادله ماتریسی به صورت زیر خواهد بود.

$$\dot{x}=-B_R^{-1}(t)K_R(t)x-B_R^{-1}(t)F_e+B_R^{-1}(t)F_R \tag{۶-۲۵}$$

با جایگذاری رابطه (۶-۲۲) برای $M_R(t)=0$ [۴۴] در رابطه (۶-۲۵) داریم:

$$\dot{x}=\dot{x}_d+B_R^{-1}(t)K_R(\mathrm{t})(x_d-x)-B_R^{-1}(t)F_e \tag{۶-۲۶}$$

قانون کنترل‌کننده امپدانس که بر پایه قانون امپدانس (۶-۲۲) پایه‌گزاری شده است، با جایگذاری رابطه (۶-۲۶) در رابطه (۶-۱۴) به صورت زیر خواهد بود. بر طبق این رابطه به کنترل امپدانس ربات با استفاده از راهبرد ولتاژ موتورها، پرداخته می‌شود.

$$RI_a+L\dot{I}_a+K_b r^{-1}J^{-1}(q)(\dot{x}_d+B_R^{-1}(t)K_R(\mathrm{t})(x_d-x)-B_R^{-1}(t)F_e)+\phi=u \tag{۶-۲۷}$$

قانون کنترل (۶-۲۷) به دلیل شناخته نبودن اغتشاش‌های خارجی ϕ و مشخص نبودن مقادیر دقیق آن، قابل محاسبه نمی‌باشد. برای جبران نامعینی‌ها، قانون کنترل مقاوم زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$\hat{R}I_a+\hat{K}_b\hat{r}^{-1}\hat{J}^{-1}(q)(\dot{x}_d+B_R^{-1}(t)K_R(\mathrm{t})(x_d-x)-B_R^{-1}(t)F_e+\mathrm{u}_c)=u \tag{۶-۲۸}$$

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 (۶-۲۸) در سیستم (۶-۹) به صورت زیر خواهد بود:

$$RI_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1}\dot{q} + \phi = \hat{R}I_a + \hat{K}_b \hat{r}^{-1}\hat{J}^{-1}(q)(\dot{x}_d + B_R^{-1}(t)K_R(\mathrm{t})(x_d - x) - B_R^{-1}(t)F_e + \mathrm{u}_c) \qquad (۶-۲۹)$$

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

$$-F_e + B_R(t)(\dot{\mathrm{x}}_d - \dot{x}) + K_R(t)(\mathrm{x}_d - \mathrm{x}) = \mathrm{B}_R(t)\hat{J}(q)\hat{r}\hat{K}_b^{-1}((R-\hat{R})I_a + L\dot{I}_a + K_b r^{-1}\dot{q} + \phi)\_B_R(t)\dot{x} - B_R(t)u_c \qquad (۶-۳۰)$$

هم‌چنین این رابطه را به صورت زیر، می‌توان بیان نمود.

$$B_R^{-1}(t)(-\mathrm{F}_e + \mathrm{B}_R(\mathrm{t})(\dot{\mathrm{x}}_d - \dot{\mathrm{x}}) + \mathrm{K}_R(\mathrm{t})(\mathrm{x}_d - \mathrm{x})) = \eta - \mathrm{u}_c \qquad (۶-۳۱)$$

که در این رابطه η مجموع نامعینی‌هاست، به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\eta = \hat{J}(q)\hat{r}\hat{K}_b^{-1}((\mathrm{R}-\hat{\mathrm{R}})\,\mathrm{I}_a + \mathrm{L}\dot{\mathrm{I}}_a + \mathrm{K}_b \mathrm{r}^{-1}\dot{\mathrm{q}} + \phi) - \mathrm{J(q)}\,\dot{\mathrm{q}} \qquad (۶-۳۲)$$

مجموع نامعینی‌ها که η نام دارد، محدود است.

$$\|\eta\| \le \rho \qquad (۶-۳۳)$$

حد بالای نامعینی‌ها را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\rho = \alpha_u \|\dot{q}\| + \beta_u + \gamma_u \|I_a\| \qquad (۶-۳۴)$$

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

$$\left\|\hat{J}(q)\hat{r}\hat{K}_b^{-1}K_b r^{-1} - J(q)\right\| \le \alpha_u,\ \left\|\hat{J}(q)\hat{r}\hat{K}_b^{-1}\right\|.\left\|L\dot{I}_a + \phi\right\| \le \beta_u,\ \left\|\hat{J}(q)\hat{r}\hat{K}_b^{-1}(\mathrm{R}-\hat{\mathrm{R}})\right\| \le \gamma_u \qquad (۶-۳۵)$$

نکته لازم برای قبولی معادله (۶-۳۵) این است که؛ $\hat{J}(q)$ و $J(q)$ محدود هستند. همچنین $\hat{K}$، K، $\hat{R}$، R و L ماتریس‌های ثابت هستند. با استفاده از معادلات (۶-۳۱) تا (۶-۳۴) قانون کنترل را به صورت زیر پیشنهاد می‌کنیم.

$$u_c = \alpha(t)\dot{q} + \beta(t)\mathrm{d} + \gamma(t)\mathrm{I}_a \quad (۶-۳۶)$$

که در رابطه بالا $\alpha(t)$، $\beta(t)$ و $\gamma(t)$ پارامترهای طراحی کنترل‌کننده و $d \in R^n$ بردار واحد است. حال برای آنکه کنترل امپدانس رابطه (۶-۲۲) فراهم گردد، بایستی ترم مقاوم u_c به گونه‌ای طراحی شود که u_c به سمت η میل کند ($u_c \to \eta$). به منظور تحقق این هدف یک تابع اسکالر مثبت معین لیاپانوف $V(t)$ [۵۷] ، به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

$$V(t) = 0.5E^T E \quad (۶-۳۷)$$

که در رابطه بالا E به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$E = \eta - u_c \quad (۶-۳۸)$$

به منظور تحقق این مسئله که u_c به سمت η میل کند ($u_c \to \eta$)، پارامترهای طراحی کنترل‌کننده باید به گونه‌ای به‌روز گردند تا $V(t) \to 0$. برای این هدف بایستی $\dot{V}(t) < 0$. جایگذاری رابطه (۶-۳۱) در رابطه (۶-۳۸) نتیجه زیر حاصل می‌شود.

$$E = B_R^{-1}(t)(-\mathrm{F}_e + \mathrm{B}_R(\mathrm{t})(\dot{\mathrm{x}}_d - \dot{\mathrm{x}}) + \mathrm{K}_R(\mathrm{t})(\mathrm{x}_d - \mathrm{x})) \quad (۶-۳۹)$$

به کمک روابط (۶-۳۶)، (۶-۳۷) و (۶-۳۸) 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 $\dot{V} < 0$، به منظور تحقق کاهش V و رسیدن به هدف $E \to 0$ نتایج زیر حاصل می‌گردد.

$$\dot{\alpha} = -\lambda_\alpha \frac{\partial V}{\partial \alpha} \quad (۶-۴۰)$$

$$\dot{\beta} = -\lambda_\beta \frac{\partial V}{\partial \beta} \quad (۶-۴۱)$$

$$\dot{\gamma} = -\lambda_{\gamma} \frac{\partial V}{\partial \gamma} \qquad (۴۲-۶)$$

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 $\|E\| \leq \|E(0)\|$. حال به این نتیجه می‌توان رسید که:

نتیجه۱: E محدود است. با استفاده از روابط (۶-۳۶)، (۶-۳۷) و (۶-۳۸) می‌توان به نتایج زیر رسید.

$$\frac{\partial V}{\partial \alpha} = -\dot{q}^T E \qquad (۴۳-۶)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \beta} = -d^T E \qquad (۴۴-۶)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \gamma} = -I_a^{\,T} E \qquad (۴۵-۶)$$

با جایگذاری رابطه (۶-۴۳) در (۶-۴۰)، رابطه (۶-۴۴) در (۶-۴۱) و رابطه (۶-۴۵) در (۶-۴۲) نتایج زیر حاصل می‌گردد.

$$\alpha(t) = \int_0^t \lambda_{\alpha} \dot{q}^T E dt + \alpha(0) \qquad (۴۶-۶)$$

$$\beta(t) = \int_0^t \lambda_{\beta} d^T E dt + \beta(0) \qquad (۴۷-۶)$$

$$\gamma(t) = \int_0^t \lambda_{\gamma} I_a^{\,T} E dt + \gamma(0) \qquad (۴۸-۶)$$

۶-۳-۲ طراحی ضرایب امپدانس ربات با سیستم فازی

در این قسمت یک سیستم دقیق و هوشمند فازی طراحی می‌شود، تا بتواند به خوبی ضرایب امپدانس ربات را تنظیم کند. در این طراحی دو سیستم فازی جداگانه منظور می‌گردد، که به طراحی دو ضریب

امپدانس ربات $B_R(t)$ و $K_R(t)$ به ترتیب ضریب اصطکاک و سختی می‌پردازد. سیستم اول که مختص تعیین ضریب اصطکاک $B_R(t)$ است، دارای دو ورودی x_{1B} و x_{2B} می‌باشد:

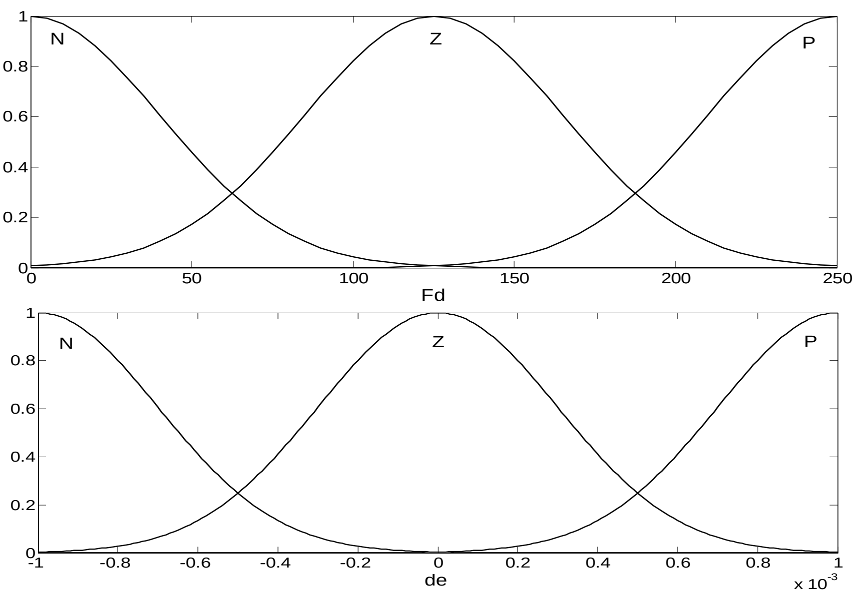
$$x_{1B} = F_R - F_e \tag{۶-۴۹}$$

$$x_{2B} = \dot{e} \tag{۶-۵۰}$$

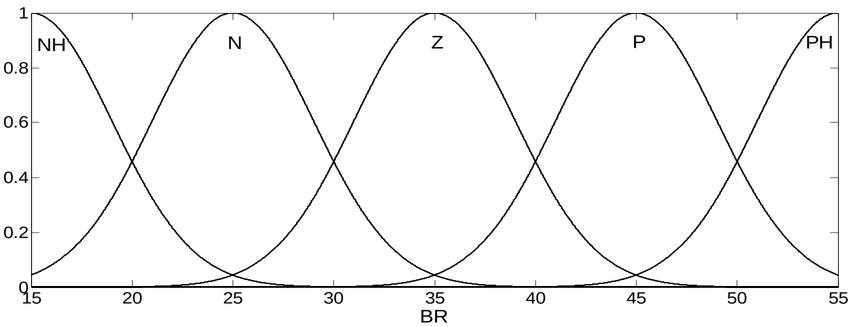
در رابطه بالا e خطای ردگیری در طول مسیر است، که به صورت زیر قابل بیان می‌باشد.

$$e = x_d - x \tag{۶-۵۱}$$

که در آن x_d موقعیت مطلوب و x موقعیت واقعی نوک ربات است. برای هریک از ورودی‌های سیستم فازی، سه گروه عضویت در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب تمام فضای سیستم فازی، توسط ۹ قانون پوشش داده می‌شود. شکل (۶-۱) گروه‌های عضویت فازی برای دو ورودی را نشان می‌دهد و در شکل (۶-۲) نیز گروه‌های عضویت خروجی سیستم فازی، قابل مشاهده است.



شکل (۶-۱) توابع عضویت دو ورودی در سیستم فازی تعیین ضریب امپدانس B_R



شکل (۶-۲) توابع عضویت خروجی در سیستم فازی تعیین ضریب امپدانس B_R

برای تعریف قوانین سیستم فازی، از الگوی ممدانی[۷۰] به صورت زیر، استفاده می‌شود.

$$Rule\ l:\ If\ \ x_1\ is\ A_l\ and\ \ x_2\ is\ B_l\ Then\ \ y\ \ is\ C_l \qquad (۵۲\text{-}۶)$$

درصورتی‌که $Rule\ l$ اولین قانون از ۹ قانون تعریف شده برای $l=1,2,...,9$ می‌باشد و در اولین قانون A_l، B_l و C_l به ترتیب، توابع عضویت برای متغیرهای x_1، x_2 و u هستند. در جدول (۶-۱) قوانین فازی تعریف شده برای سیستم فازی، آورده شده است.

جدول (۶-۱) قوانین فازی تعریف شده برای سیستم فازی

B_R		F_d		
		N	Z	P
$\dot{e}$	N	NH	N	Z
	Z	N	Z	P
	P	Z	P	PH

K_R		F_d		
		N	Z	P
e	N	NH	N	Z
	Z	N	Z	P
	P	Z	P	PH

در طراحی این سیستم فازی از موتور جستجوی ممدانی، فازی‌ساز منفرد و غیرفازی‌ساز میانگین مراکز، استفاده شده است و خروجی سیستم u به صورت زیر، قابل محاسبه است.

$$u=\sum_{l=1}^{9} y_l \psi_l(x_1,x_2)=y^T \psi(x_1,x_2) \tag{۶-۵۳}$$

در رابطه بالا y_l مرکز گروه عضویت خروجی و $\psi=[\psi_1 \quad \dots \quad \psi_9]^T$ که دارای مقداری مثبت است، به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\psi_l(x_1,x_2)=\frac{\mu_{A_l}(x_1)\mu_{B_l}(x_2)}{\sum_{l=1}^{9}\mu_{A_l}(x_1)\mu_{B_l}(x_2)} \tag{۶-۵۴}$$

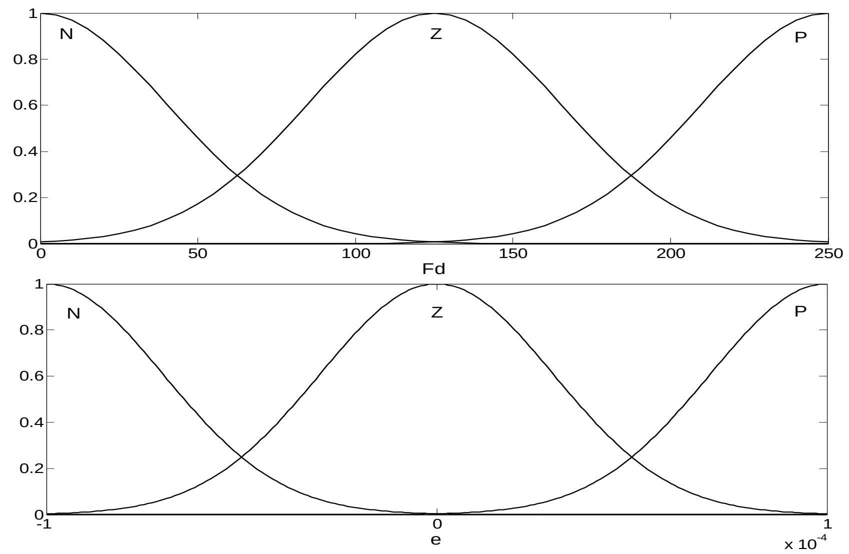
که در رابطه بالا $\mu_{A_l},\mu_{B_l}\in[0,1]$. همچنین برای تعیین ضریب امپدانس K_R ربات، از یک سیستم فازی مشابه با ورودی‌های زیر استفاده شده است.

$$x_{1K}=F_R-F_e \tag{۶-۵۵}$$

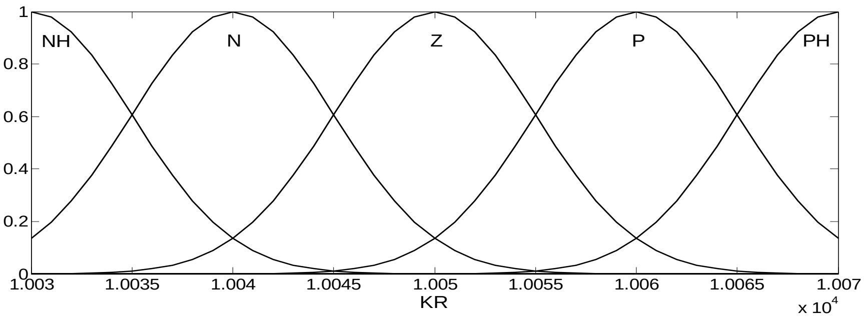
$$x_{2K}=e \tag{۶-۵۶}$$

در رابطه بالا، e در رابطه (۶-۵۱) آورده شده است. برای هریک از ورودی‌های سیستم فازی، سه گروه عضویت در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب تمام فضای سیستم فازی، توسط ۹ قانون پوشش داده

می‌شود. شکل (۶-۳) گروه‌های عضویت فازی برای دو ورودی را نشان می‌دهد و در شکل (۶-۴) نیز گروه‌های عضویت خروجی سیستم فازی، قابل مشاهده است.



شکل (۶-۳) توابع عضویت دو ورودی در سیستم فازی تعیین ضریب امپدانس K_R



شکل (۶-۴) توابع عضویت خروجی در سیستم فازی تعیین ضریب امپدانس K_R

لازم به تذکر است که تمامی موارد طراحی در این قسمت نیز، همانند سیستم توضیح داده شده است.

۶-۳-۳ تحلیل پایداری

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

فرض اول: مسیر مطلوب x_dدر 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 (۶-۹) محدود است.

$$\|\phi(t)\| \le \phi_{\max} \qquad (۵۷-۶)$$

برای آن که نقطه تکینی 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 $\det(\mathrm{J(q)}) \ne 0$.

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

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

در معادله (۶-۵۴) که $\mu_{A_l}, \mu_{B_l} \in [0,1]$ برقرار است، بنابراین

نتیجه ۲: $\psi_l(\mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2)$ محدود است.

فرض پنجم:در معادله (۶-۵۳)، y_l مرکز توابع عضویت خروجی محدود در نظر گرفته شده است. با استفاده از نتیجه ۲ و فرض ۵ می‌توان به این نتیجه رسید که:

نتیجه ۳: ضرایب امپدانس ربات B_R و K_R محدود اند. در رابطه (۶-۲۲) با اعمال $M_{Ri} = 0$ [۴۴] ، می‌توان نوشت:

$$B_R(t)\dot{x}_d + K_R(t)x_d = W \qquad (۵۸-۶)$$

که در رابطه بالا W به صورت زیر توصیف می‌گردد.

$$W = B_R(t)E + F_e + B_R(t)\dot{x} + K_R(t)x \tag{۵۹-۶}$$

در معادله (۶-۵۸) باتوجه به فرض اول و این نکته که ماتریس‌های $B_R(t)$ و $K_R(t)$ که خروجی سیستم‌های فازی اند، ماتریس‌های قطری مثبت هستند و طبق نتیجه ۳ محدودند، رابطه (۶-۵۸) یک معادله مرتبه اول خطی با ورودی محدود است. در رابطه (۶-۵۹)، مقدار E بر طبق نتیجه ۱ محدود است و نیروی اعمالی توسط سلول در نقطه تماس F_e، نیز محدود است. پس این نتیجه حاصل می‌گردد که سیستم خطی (۶-۵۹)، به دلیل محدود بودن ورودی، برطبق قضیه راث-هرویتس محدود است.

نتیجه۴: متغیرهای x، $\dot{x}$ و $\ddot{x}$ محدودند. ربات اسکارای مورد استفاده، به علت محدود بودن فضای کار تزریق سلولی و نوع مفاصل ربات، دارای ماتریس ژاکوبین $J(q)$ شامل توابع سینوسی و محدود است. محدود بودن نقطه انتهایی ربات، به محدود بودن متغیرهای مفاصل بازوی ربات منجر می‌گردد.

نتیجه ۵: ماتریس ژاکوبین $J(q)$ محدود است. به کمک فرض ۳ و نتیجه ۵ می‌توان گفت:

نتیجه ۶: ماتریس معکوس $J(q)$، به معنای دیگر ماتریس $J(q)^{-1}$ محدود است.

در رابطه (۶-۱۳) با استفاده از نتیجه ۴ و نتیجه ۶، می‌توان به نتیجه زیر دست یافت.

نتیجه ۷: متغیر حالت $\dot{q}$ محدود است. از طرفین رابطه (۶-۱۳) انتگرال‌گیری کرده و رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$q = \int_{x_0}^{x} J(q)^{-1} d\delta \tag{۶۰-۶}$$

نتیجه ۸: متغیر حالت q، محدود است.

با استفاده از رابطه (۶-۴) و محدود بودن $\ddot{x}$، $\dot{q}$ و $J(q)^{-1}$ به ترتیب در نتایج ۴، ۷ و۶ و به دلیل مشتق‌پذیر بودن $J(q)$، نتیجه زیر حاصل می‌شود.

نتیجه ۹: متغیر حالت $\ddot{q}$، محدود است.

در رابطه (۶-۱) با استفاده از محدود بودن q، $\dot{q}$، $\ddot{q}$ و F_e می‌توان به نتیجه زیر دست یافت.

نتیجه ۱۰: بردار گشتاور مفاصل ربات τ_r، محدود است.

با استفاده از ویژگی‌های دینامیک ربات و محدود بودن متغیر q نتیجه می‌دهد، ماتریس $D(q)$ و $g(q)$ محدود است. هم‌چنین محدود بودن $\dot{q}$ نیز، منجر به محدود بودن $C(q,\dot{q})$ می‌شود.

در معادله (۶-۷) بردارهای $\dot{q}$، $\ddot{q}$ و τ_r محدودند و ماتریس‌های J_m، B_m و r ثابتند. بنابراین

نتیجه ۱۱: بردار گشتاور موتور τ_m، محدود است. از معادله (۶-۱۰) می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$I_a = K_m^{-1}\tau_m \tag{۶-۶۱}$$

که در رابطه بالا K_m یک ماتریس ثابت و باتوجه به نتیجه ۱۱، τ_m محدود است، نتیجه زیر قابل احتساب است.

نتیجه ۱۲: بردار جریان موتور I_a، محدود است.

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

۶–۴ مدل‌سازی محیط به شکل سلول تحت تزریق

این شیوه از مدل‌سازی محیط به شکل سلول که روشی ساده است، را به صورت زیر می‌توان مطرح نمود[۲۸].

$$F_e = K_e(x - x_e) \tag{۶-۶۲}$$

که در این رابطه K_e سختی محیط، x_e موقعیت پوسته سلول که تغییر شکل نداده و x موقعیت نقطه انتهایی تزریق‌کننده که در این حالت سلول، تغییر شکل یافته می‌باشد[۴۰]. مدل پیشنهادی دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت محیط، به صورت زیر است[۱].

$$F_e = Ax^2 + Bx \tag{۶-۶۳}$$

در این رابطه F_e نیروی تماس و A و Bضرایب عبارت درجه دو و عبارت خطی هستند. تابع هزینه J که بایستی مقدار آن را کمینه کرد، به صورت زیر تعیین می‌گردد[۱].

$$J = \int_0^t e^{-\lambda(t-r)} [y(r) - w(r)\hat{a}(t)]^2 dr \tag{۶-۶۴}$$

در این حالت $w^T = \begin{bmatrix} x^2 \\ x \end{bmatrix}$ ، $y = F_e$ و $\hat{a} = \begin{bmatrix} \hat{A} \\ \hat{B} \end{bmatrix}$ است که $\hat{A}$ و $\hat{B}$ مقادیر تخمین زده از A و B می‌باشند. در این محاسبات، $\lambda = 0.9$ یک مقدار ثابت به نام فاکتور فراموشی است. قانون به‌روزرسانی از طریق رابطه زیر، قابل محاسبه می‌باشد[۱].

$$\dot{\hat{a}}(t) = -p(t) w^T e(t) \tag{۶-۶۵}$$

که در این رابطه داریم:

$$e(t) = \hat{a}^T(t) w^T - y(t) \tag{۶-۶۶}$$

قانون به‌روزرسانی بهره به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{d}{dt}[p] = -\lambda p - p w^T w p \tag{۶-۶۷}$$

$$p(0) = \begin{bmatrix} \kappa & 0 \\ 0 & \kappa \end{bmatrix} \tag{۶-۶۸}$$

در این روابط، مقادیر اولیه باتوجه به شرایط سیستم تعیین می‌گردد[۱].

۶–۵ شبیه‌سازی سیستم کنترلی

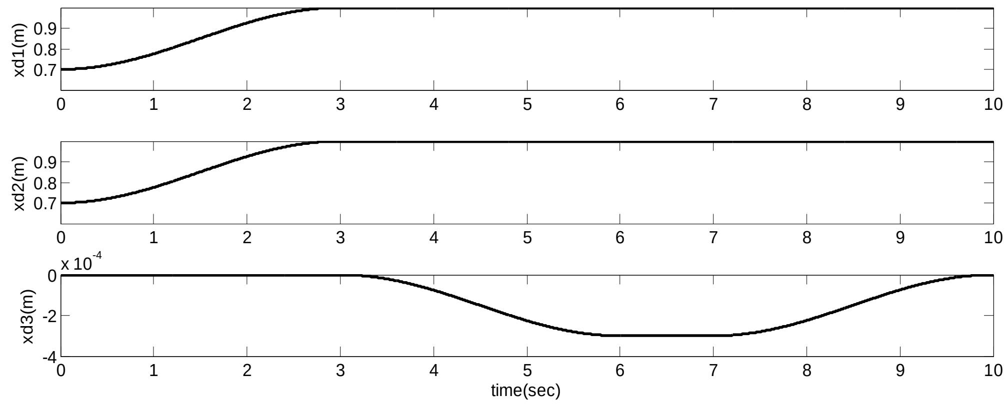
در این قسمت به شبیه‌سازی قانون کنترل امپدانس ولتاژ (۶-۲۸)، برای بازوی سه رابطی ربات اسکارا می‌پردازیم. هر رابط به وسیله یک موتور DC مغناطیس دائم، تحریک می‌شود. این شبیه‌سازی با طول گام ۰,۰۰۱ در مدت زمان ۱۰ ثانیه انجام شده است. مدل ربات توسط رابطه (۶-۵) به دست می‌آید. با توجه به کاربرد ربات اسکارا در این تحقیق، مسیر مطلوب موقعیت که $x_d = \begin{bmatrix} x_{d1} & x_{d2} & x_{d3} \end{bmatrix}^T$ نام دارد، در شکل (۶-۵) قابل مشاهده است. این مسیر نرم و حداقل تا درجه دو مشتق‌پذیر را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

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

$$x_{d2} = x_{d1} \tag{۶-۶۹}$$

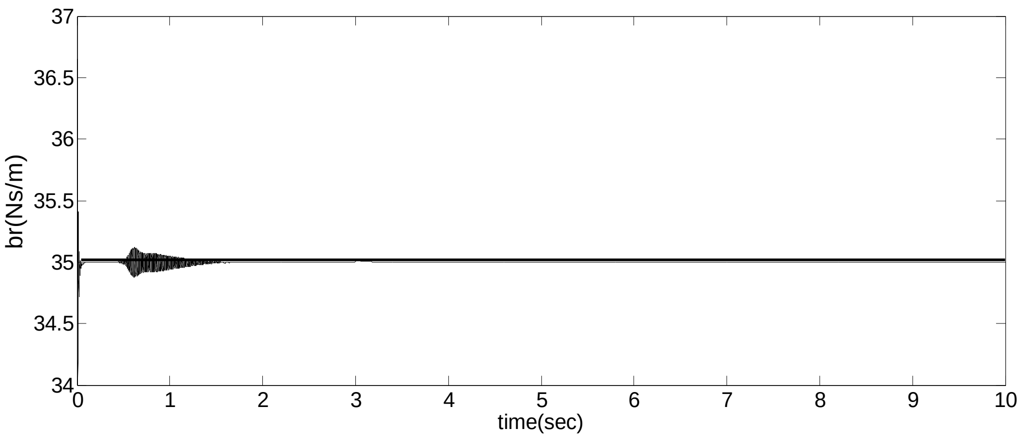
$$x_{d3} = \begin{cases} 0 & 0 \le t < 3 \\ 0.001(-0.15)(1+\cos(\pi t/3)) & 3 \le t < 6 \\ 0.001(-0.3) & 6 \le t < 7 \\ 0.001(-0.15)(1-\cos(\pi t/3)) & 7 \le t < 10 \end{cases}$$

ابتدا مسیر ردگیری مطلوب را به گونه‌ای برای ربات در نظر می‌گیریم، که در قبل از زمان ۴ ثانیه از موقعیت ابتدایی بر روی سلول قرار گرفته و از زمان ۴ ثانیه، فرآیند تزریق سلولی آغاز شود. در محور x و y کنترل موقعیت و در محور z کنترل نیرو اعمال می‌گردد. به دلیل کوچک بودن ابعاد قطر سلول که حدود ۵۰۰ میکرومتر است[۱]، جابجایی درمحور z متناسب سایز سلول تعیین می‌شود. در این شرایط مختصات نقطه برخورد ربات با محیط در زمان ۴ ثانیه به صورت $x_e = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -7.49\times10^{-5} \end{bmatrix}^T$ قابل بیان است.

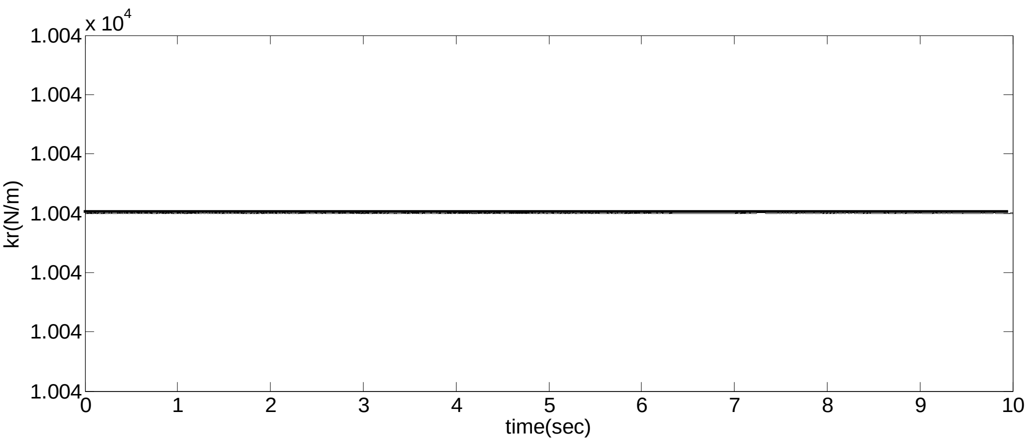


شکل (۶-۵) مسیر مطلوب موقعیت

نقطه اولیه ربات به مختصات $x_0 = [0.7 \quad 0.7 \quad 0]^T \; m$ است. مدل امپدانس اسکارا با رابطه (۶-۲۲) به دست می‌آید و باتوجه به کاربرد ربات در تزریق سلولی، $M_{Ri} = 0$ است. پارامترهای امپدانس B_{Ri} و K_{Ri} برای $i = 1,2,3$ قابل طراحی می‌باشند. این پارامترها، به کمک دو سیستم فازی دو ورودی جداگانه به‌روز می‌شوند. شکل (۶-۶) و (۶-۷) تنظیم پارامترهای امپدانس ربات را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۶) تنظیم پارامتر ضریب اصطکاک

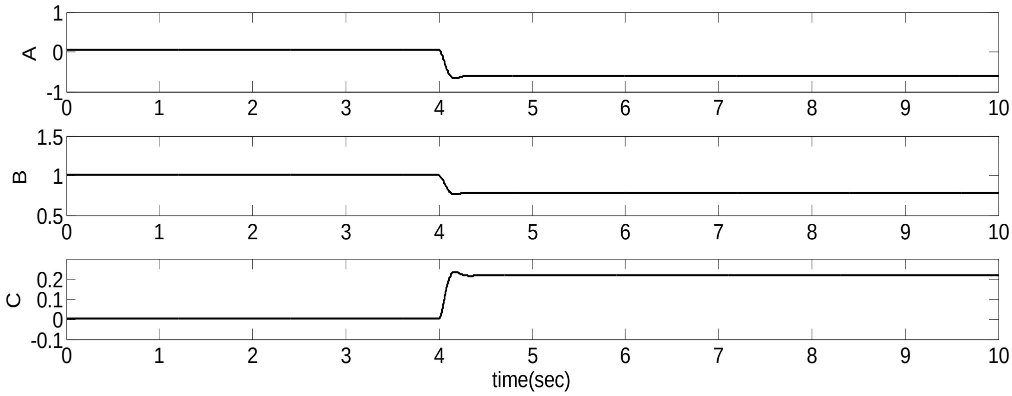


شکل (۶-۷) تنظیم پارامتر ضریب سختی

مدل‌سازی محیط به کمک رابطه (۶-۶۳)، به صورت معادله چندجمله‌ای درجه دو دارای دقت مناسبی است، اما اگر مدل غیرخطی آن تغییر یابد، نتایج حاصل از آن به مدل واقعی نزدیک‌تر است[۱]. در این پایان‌نامه محیط را به کمک معادله غیرخطی زیر، پیشنهاد می‌کنیم.

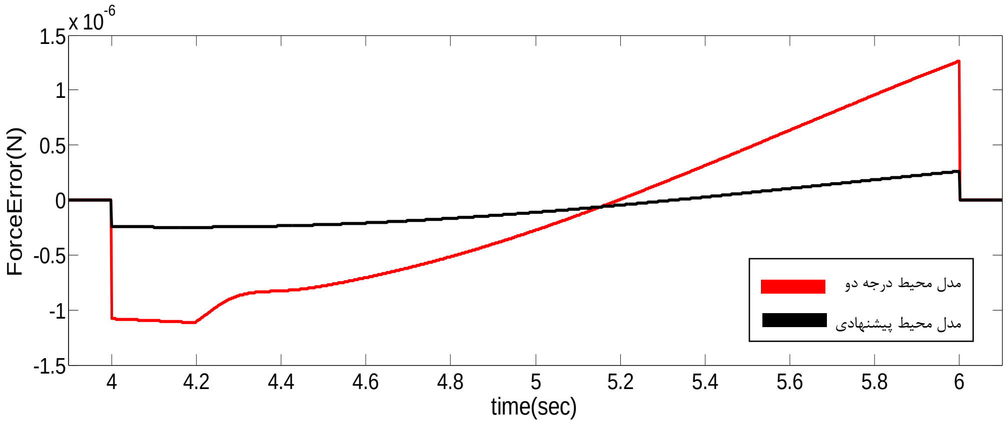
$$F_e = Ax_3^2 + Bx_3 + C\sin(x_3) \tag{۶-۷۰}$$

در این حالت تابع هزینه، همان رابطه (۶-۶۴) است و $y = F_e$ ،$w = [x^2 \quad x \quad \sin(x)]$ و $\hat{a} = \begin{bmatrix}\hat{A} & \hat{B} & \hat{C}\end{bmatrix}^T$، $\hat{A}$، $\hat{B}$ و $\hat{C}$ مقادیر تخمینی A، B و C هستند. فاکتور فراموشی $\lambda = 0.9$، در نظر گرفته شد. قانون به روزرسانی پارامترها بر طبق روابط (۶-۶۵)، (۶-۶۶) و (۶-۶۷) لحاظ می‌شود. به دلیل شروع فرایند تزریق از لحظه ۴ به بعد، تخمین پارامترها هم از این لحظه به روز می‌شود. شکل (۶-۸) تخمین پارامترهای مدل محیط را، نشان می‌دهد.



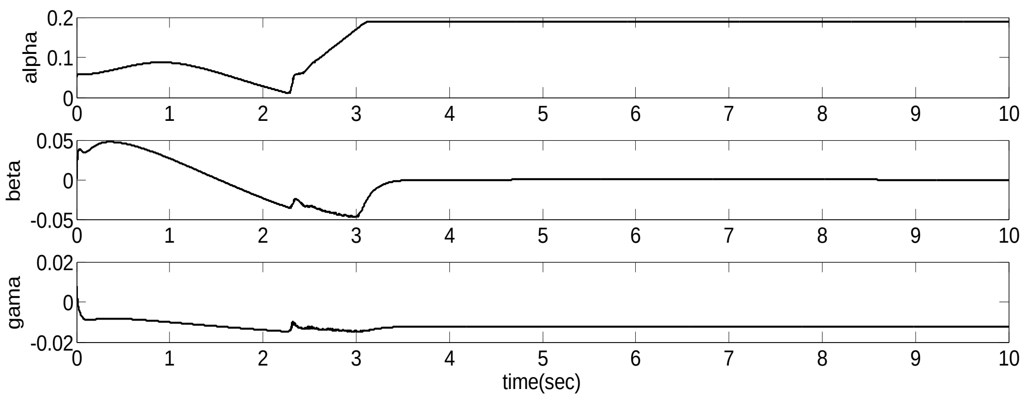
شکل (۶-۸) تخمین پارامترهای A، Bو C

به دلیل برخورد ربات با محیط،در نقطه تماس نوسان کمی ایجاد می‌شود. با توجه با اینکه ابعاد سلول در حد میکرون است، استفاده از یک تابع سینوسی باعث کاهش خطای نیرو و نزدیک‌تر شدن مدل پیشنهادی به مدل واقعی می‌گردد. کارایی مدل محیط پیشنهادی در کاهش خطای نیروی وارده از سوی ربات به محیط، در شکل (۶-۹) قابل مشاهده است. میزان خطای نیرو در قبل از زمان ۴ ثانیه و بعد از زمان ۶ ثانیه، در هر دو نمودار صفر است.



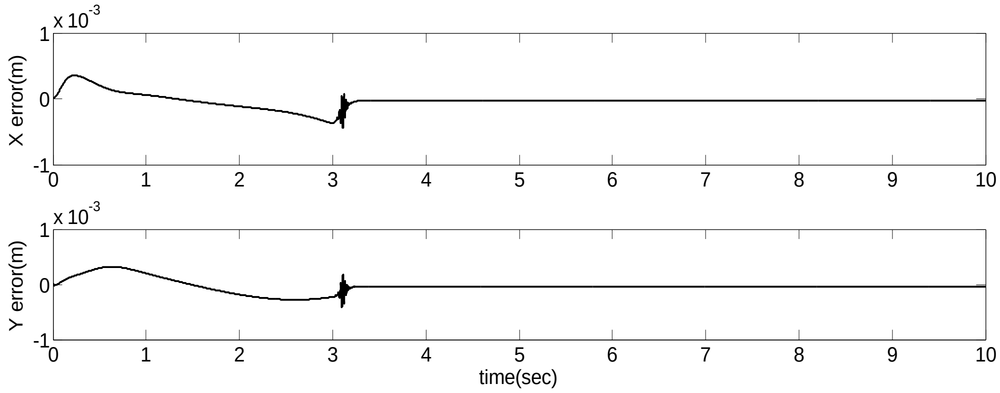
شکل (۶-۹) کاهش خطای نیرو در مدل محیط پیشنهادی

در این قسمت طراحی، کنترل‌کننده با استفاده از روش مقاوم در حضور نامعینی‌های احتمالی موجود در رابطه (۶-۲۸) بیان شده است. پارامترهای نامعینی $\hat{R}$، $\hat{K}_b$ و $\hat{r}$ هریک به اندازه ۹۰٪ مقدار واقعی خودشان فرض شده‌اند. همچنین نرخ همگرایی‌ها به ترتیب $\lambda_\alpha = 10$، $\lambda_\beta = 10$ و $\lambda_\gamma = 10$ منظور می‌گردند. پارامترهای طراحی کنترل‌کننده $\alpha(t)$، $\beta(t)$ و $\gamma(t)$ برطبق روابط (۶-۴۶)، (۶-۴۷) و (۶-۴۸) مطابق با شکل (۶-۱۰)، تنظیم می‌شوند.



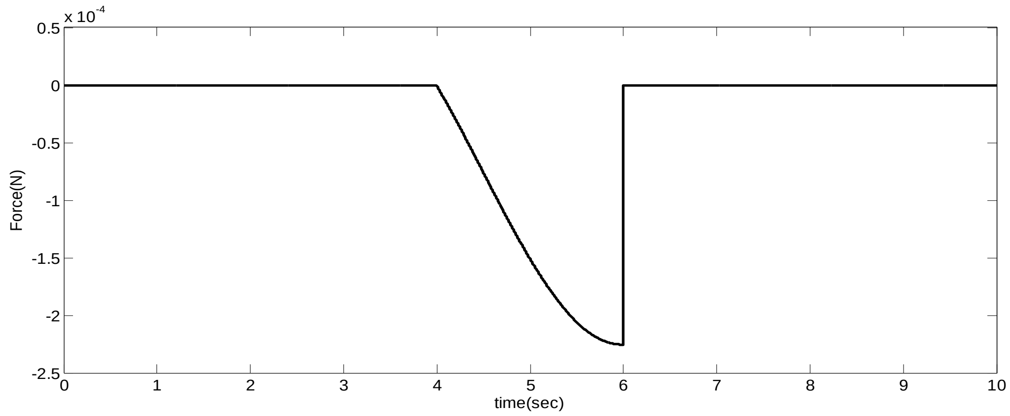
شکل (۶-۱۰) تنظیم پارامترهای طراحی کنترل‌کننده

با توجه به کاربرد اسکارا در تزریق سلولی، در محور x و y کنترل موقعیت داریم. همانطور که در شکل (۶-۱۱) مشاهده می‌شود، ردگیری به خوبی محقق شده است و خطای موقعیت در این دو محور، حداکثر $\left[3.5\times10^{-4} \quad 3\times10^{-4}\right]^T m$ می‌باشد.



شکل (۶-۱۱) خطای ردگیری موقعیت

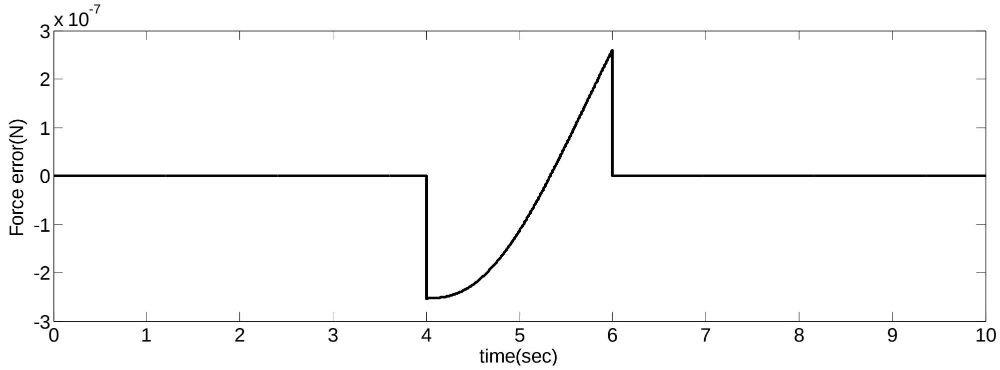
ربات اسکارا در تزریق سلولی، قبل از برخورد هیچ نیرویی به محیط اعمال نمی‌کند. پس از برخورد، نیروی F_e، از سوی محیط به ربات وارد می‌شود. مدت زمان تزریق، بین ۴ تا ۶ ثانیه است. این نیرو متناسب با زمان به طور آهسته، افزایش می‌یابد تا وارد سلول شود و سلول، سالم و زنده باقی بماند. پس از آن ماده شیمیایی توسط ابزار تزریق، در زمان ۶ تا ۷ 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 (۶-۱۲) آورده شده است.



شکل (۶-۱۲) نیروی اعمالی در نقطه برخورد

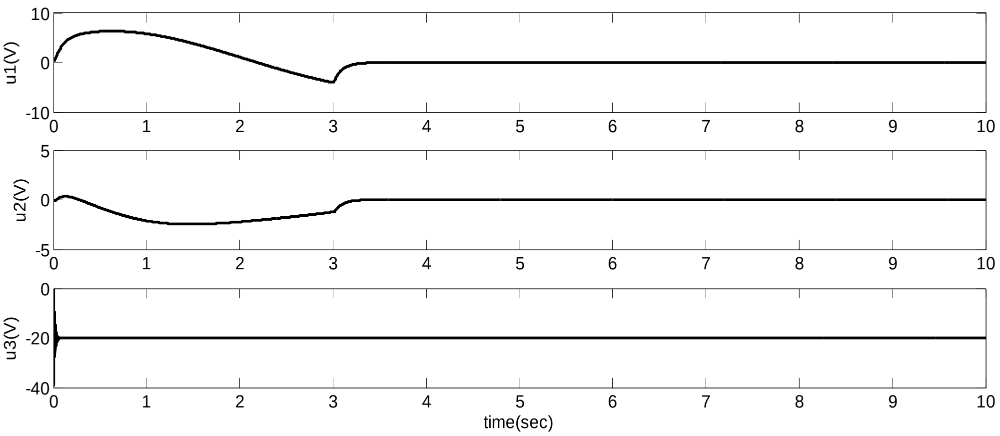
در حالت کنترل امپدانس، نیروی F_R که ربات در نقطه تماس به محیط وارد می‌کند، به عنوان نیروی مطلوب شناخته می‌شود. هدف این است که؛ با توجه به مدل پیشنهادی امپدانس ربات و محیط، نیروی F_e تا حدامکان به نیروی مطلوب ربات نزدیک باشد. بر طبق مطالعاتی که در زمینه تزریق

سلولی انجام شده، حداکثر خطای این طرح پیشنهادی کمتر از 26×10^{-8} نیوتون است که مقدار مطلوبی می‌باشد. خطای نیروی اعمالی در محور z در شکل (۶-۱۳)، قابل مشاهده است.



شکل (۶-۱۳) خطای نیروی اعمالی

ولتاژ موتورها در مقدارهای اسمی، رفتار بسیار مطلوبی دارند. موتور ۳ دارای ولتاژ ۲۰- ولت برای اعمال به نقطه برخورد است. در حالی‌که موتور ۱ و ۲ در زمان شروع فرآیند تزریق، تقریبا ولتاژی ندارند، زیرا باری بر روی مفاصل آن‌ها نیست. نمودار ولتاژ موتورها در شکل (۶-۱۴)، قابل مشاهده است.

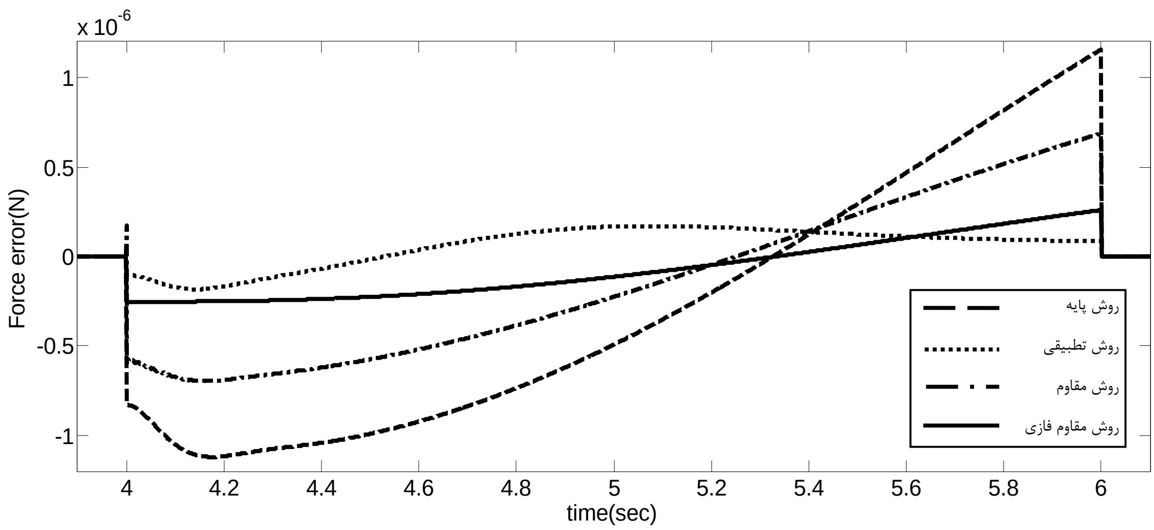


شکل (۶-۱۴) ولتاژ موتورها

۶-۶ نتیجه‌گیری و مقایسه روش‌های کنترلی مختلف

در این فصل به طراحی کنترل‌کننده امپدانس مقاوم فازی با راهبرد کنترل ولتاژ برای سیستم تزریق سلولی، پرداخته شد. سیستم کنترل مقاوم طراحی شده، بایستی بر نامعینی‌ها غلبه کند و تحلیل پایداری روش کنترلی پیشنهادی، نشان می‌دهد که سیستم پایدار می‌باشد. یک چالش اساسی در کنترل امپدانس، ثابت بودن ضرایب امپدانس است که در این فصل نیز روش کنترل امپدانس با ضریب متغیر ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نیز کارایی مطلوب روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

در این پایان‌نامه در روش پایه به طراحی کنترل‌کننده امپدانس با روش تونن پرداخته شد. به منظور حل چالش ثابت بودن ضرایب امپدانس، روش تطبیقی ارائه گردید و پارامترهای امپدانس ربات توسط قانون تطبیق پیشنهادی به‌روزرسانی شد. روش مقاوم نیز برای مقابله با نامعینی‌ها و اغتشاشات خارجی مطرح گردید و به تحلیل پایداری سیستم پرداخته شد. همچنین در روش مقاوم فازی از کاربرد سیستم فازی در تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده استفاده می‌شود و نتایج خروجی بهتری دارد. در شکل (۶-۱۵) خطای نیرو در روش‌های مختلف، مقایسه شده است. در کلیه این روش‌های کنترلی، نیروی اعمالی به سلول‌ها مقداری مطلوب می‌باشد و سلول‌ها پس از تزریق، سالم باقی می‌مانند.



شکل (۶-۱۵) مقایسه خطای نیرو در روش‌های کنترلی مختلف

فصل ۷: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

پیامبر اکرم (ص) فرموده‌اند: هر کس در حال جستجوی علم و دانش مرگش فرا رسد، میان جایگاه او و پیامبران یک درجه تفاوت است.
مجمع البیان ۹، میزان الحکمهٔ ۳۹۸

۷–۱ نتیجه‌گیری

استفاده از کنترل‌کننده امپدانس، در سیستم تزریق سلولی موفقیت آمیز بوده است. در این حالت متناسب با سایز سلول و موقعیت صفحه سلولی، در راستای x و y کنترل موقعیت و در راستای z، کنترل نیرو محقق می‌گردد. کنترل امپدانس تا لحظه قبل از برخورد ربات با محیط، کنترل موقعیت را به خوبی انجام می‌دهد. این کنترل‌کننده پس از برخورد ربات با محیط نیز، وظیفه کنترل نیرو در راستای سوم را بر عهده دارد.

در سیستم تزریقی این پایان‌نامه، صفحه سلولی ثابت است و به منظور افزایش میزان موفقیت، بازوی ربات اسکارا کنترل می‌شود. در مقایسه روش رباتیکی با روش متداول دستی، سلول‌های بیشتری زنده می‌مانند و در معرض آسیب کمتری هستند. ربات اسکارا توانایی ردگیری موقعیت مطلوب و اعمال نیروی متغیر با زمان، را دارد. مطالعات پیشین در زمینه کنترل امپدانس بر پایه کنترل گشتاور ارائه شده‌اند، اما در این رساله کنترل امپدانس مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ است. مشکل 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، مستقل از دینامیک ربات است، بنابراین ساده‌تر، با محاسبات کمتر و موثرتر می‌باشد. در فصل سوم مدل امپدانس ربات، بر اساس روش تونن پایه‌گزاری شد و پارامترهای مدل محیط، توسط معادله غیرخطی پیشنهادی، تخمین زده می‌شود و به کمک روش بازگشتی کمترین مربعات خطا، بهینه می‌گردد.

در فصل چهارم به منظور غلبه بر چالش اساسی کنترل امپدانس، یعنی تعیین ضرایب امپدانس متغیر با زمان، روش تطبیقی ارائه گردید. در این حالت، ضرایب امپدانس ربات بر اساس الگوریتم گرادیان نزولی قانون تطبیق، محاسبه و به‌روز می‌شود.

هنگامی‌که سلول تحت تزریق با دینامیک ربات برخورد دارد، پیچیدگی و نامعینی‌ها افزایش می‌یابد. در فصل پنجم برای حل این مشکل، به طراحی کنترل‌کننده مقاوم پرداخته شد. هم‌چنین

ضرایب امپدانس بازوی ربات، به وسیله الگوریتم گرادیان نزولی تنظیم می‌شوند. روش کنترل مقاوم پیشنهادی، بر نامعینی‌ها و اغتشاشات خارجی، به خوبی غلبه می‌کند و تحلیل پایداری نیز، تأییدکننده این مطلب است.

امروزه روش فازی به دلیل توانایی مقابله با سیستم‌های غیرخطی و همراه با نامعینی، مورد توجه است. در فصل ششم نیز از توانایی سیستم‌های فازی، در تعیین پارامترهای امپدانس ربات استفاده می‌شود. به این منظور، دو سیستم فازی جداگانه برای تعیین ضرایب امپدانس ربات محقق گردید. این ضرایب، در هر لحظه برای دستیابی به نتایج مطلوب‌تر، توسط قانون تطبیق فازی به‌روز می‌شوند.

هدف این روش‌های کنترلی مختلف، رسیدن به نیروی مطلوب و دقیق برای تزریق به سلول‌هاست تا پس از آزمایش، سلول‌ها زنده و سالم باقی بمانند و میزان موفقیت سیستم تزریقی رباتیکی، افزایش یابد.

۷-۲ پیشنهادات

در ادامه روند این تحقیق پیشنهاد می‌شود با توجه به نیاز و پیشرفت کشور در زمینه تزریق سلولی، امکان تزریق به سلول‌های بافتی و زیستی انسان در آزمایشگاه‌ها فراهم گردد. طراحی ربات‌های دیگر با درجات آزادی بیشتر، می‌تواند به سلامتی بیماران تحت درمان کمک‌رسان باشد و نیاز پزشکان را به خوبی برآورده سازد. این مدل را متناسب با نوع بافت تزریق می‌توان در جنبه‌های درمانی و پزشکی دیگر بررسی نمود. توجه به اهداف دیگر کنترلی همانند کاهش همزمان خطای موقعیت، نیرو و توابع هدف می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. تاکنون کنترل امپدانس ربات با استفاده از سیستم عصبی مورد بررسی قرار داده نشده که بهتر است از این روش نیز استفاده گردد و کارایی و پایداری آن مورد بررسی قرار گیرد.

فهرست منابع و مراجع

[۱] Xie Y., Sun D., (2009), "A Force Control Based Cell Injection Approach in a Bio-Robotics System", IEEE international Conference on Robotics and Automation, pp. 3443- 3448, Japan.

[۲] Lacal J.C., Perona R., Feramisco J., (1999), "*Microinjection*", Vol.1, Birkhauser, Berlin, pp. 12-79.

[۳] Kobayashi K., Kato K., (1992), "Subzonal insemination of a single mouse spermatozoon with a personal computer-controlled micromanipulation system", *J. of Molecular Reproduction and Development*, Vol. 33, pp. 81-88.

[۴] Huang T., Kimura Y., (1996), "The Use of Piezo Micromanipulation for Intracytoplasm Sperm Injection of Human oocytes", *J. of Assisted Reproduction and Genetics*, Vol. 13, No.4, pp. 320-328.

[۵] Huang H., Sun D., (2006), "A visual impedance force control of a robotic cell injection system", IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp. 233-238.

[۶] Kuncova J., Kallio P., (2004), "Challenges in capillary pressure microinjection", In Proc. IEEE International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 4998-5001.

[۷] Huang H.B., Sun D., (2007), "Visual-based Impedance Force Control of Three-dimensional Cell injection System", IEEE International Conference of Robotics and Automation, pp. 4196-4201, Italy.

[۸] Xie Y., Sun D., (2008), "An Adaptive Impedance Force Control Approach for Robotic Cell Microinjection", IEEE international conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 907-912, France.

[۹] Tan Y., Sun D., (2008), "Mechanical Modeling of Biological Cells in Microinjection", IEEE Transaction on Nanobioscience, Vol. 7, No. 4, pp. 257-266.

[۱۰] Huang H., Sun D., (2008), "Integrated vision and force control in suspended cell injection system: Towards automatic batch biomanipulation", IEEE International Conference of Robotics and Automation, pp. 3413-3419.

[۱۱] Zeng G., Hemami A., (1997), "An overview of robot force control", *Journal of Robotica*, Vol. 15, No.5, pp. 473-482.

[۱۲] Jung S., Hsia T.C., (2004), "Force tracking impedance control of robot manipulators under Unknown Environment", IEEE Transaction on Control System Technology, vol. 12, no. 3, pp. 474-483.

[۱۳] Huang H.B., (2008), PhD. Thesis, "Toward automatic batch biomanipulation: study on robotic suspended cell injection", City University of Hong Kong.

[۱۴] Huang H., Sun D., (2009), "Robotic Cell Injection System with Position and Force Control: Toward Automatic Batch Biomanipulation", IEEE Transaction on Robotics, pp. 727-737.

[۱۵] Kumar R., Kapoor A., (2003), "Preliminary experiments in robot/human cooperative microinjection", IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligence Robots Systems, pp. 3186-3191.

[۱۶] Li X.D., Zong G., (2001), "Development of Global Vision System for Biological automatic Micromanipulation system", IEEE int. Conf. Robot Automation, pp. 127-132.

[۱۷] Zhang X.J., Scott M.P., (2006), "Microoptical characterization of piezoelectric vibratory microinjection in drosophila embryos for genome-wide RNAi screen", *J. Micro Electromechanic Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 1-10, USA.

[۱۸] Wang W.H., Liu X.Y., (2007), "A fully Automated Robotic system for Microinjection of zebrafish embryos", *Journal Pone Plos*, vol. 2, no. 9, Canada.

[۱۹] Sun D., Liu Y., (1997), "Modeling and Impedance Control of a two Manipulator System handling a flexible beam", IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, vol. 2, no. 4, pp. 1787-1792.

[۲۰] Huang H., Sun D., (2009), "Visual-Based Impedance Control of out-of-plane Cell Injection Systems", IEEE Trans. on Automatic Science and Engineering, vol. 6, no. 3, pp. 565-571.

[۲۱] Li G.Y., Xi N., (2002), "Calibration of a micromanipulation system", Int. Conference Intelligence Robots and System, vol. 2, pp. 1742-1747.

[۲۲] Kim H., (2004), "Mechanical property characterization of the zebrafish embryo chorion", IEEE Int. Conf. the Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 5061-5064.

[۲۳] Sun Y., Wan K.T., (2003), "Mechanical property characterization of mouse zona pellucid", IEEE Transaction on nanobioscience, vol. 2, no. 4, pp. 279-286.

[۲۴] Hogan. N., (1985), "Impedance Control: An Approach to Manipulation, Parts 1,2,3", *J. of Dynamic System, Meas. And Control*, Vol. 1, pp. 1-54.

[۲۵] Raibert M.H., Craig J.J., (1981), "Hybrid position/force control of manipulator", *J. of Dynamical systems, Measurment and Control*, vol. 102, pp. 126-133.

[۲۶] Roy J., Whitcomb J., (2002), "Adaptive force control of position/velocity controlled robots: Theory and experiment", IEEE Trns. on Robotics and Automation, vol. 18, pp. 121-137.

[۲۷] Seraji H., Colbaugh R., (1993), "Force tracking in impedance control", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 499-506, Atlanta.

[۲۸] Hanmei W., Wenkang X., (2012), "Adaptive Impedance Control in Robotic Cell Injection System", IEEE Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 268-275.

[۲۹] Traoumine O., Ott A., (1999), "Microplates: a new tool for manipulation and mechanical perturbation of individual cells", *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, vol. 39, pp. 47-62.

[۳۰] Seraji H., (1994), "Adaptive Admittance Control: An Approach to Explicit Force Control in Compliant Motion", IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 2705-2712, USA.

[۳۱] Salisbury K.J., Craig J.J., (1982), "Articulated Hands: Force Control and Kinematics Issues", *Int. Journal of Robotics Reaserch*, vol.1, no. 1, pp. 4-17.

[۳۲] Tan K., Ng D. C., (2002), "Optimal intra-cytoplasmic sperm injection with a piezo micromanipulator", 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, pp. 1120-1123.

[۳۳] Sun Y., Nelson B.J., (2002), "Biological cell injection using an autonomous mico robotics system", *International journal of Robotics Research*, vol. 21, pp. 861-868.

[۳۴] Wang W., Lie X., (2007), "Autonomous zebrafish embryo Injection using a Micro Robotic System", IEEE Conf. on Automation Science and Engineering, pp. 363-368 , USA.

[۳۵] Lee R., Kimm J., (2008), "*Cell injury: Mechanism, Responses and Therapeutics*", vol. 1, Wiley-Blackwell, New York Academy of Sciences. pp. 56-312.

[۳۶] Akbar Khayyat A., (2001), PhD. Thesis, "Force Tracking of Hydraulic Manipulators within an Impedance Control Framework", University of Manitoba, Canada.

[۳۷] Lu Z., Chen C.Y., (2007), "A micromanipulation system with dynamic force-feedback for automatic batch microinjection", *Journal of Micromech. and Microeng*. Vol. 17, no. 2, pp. 314-321.

[۳۸] Xie Y., Sun D., (2009), "A flexible force-based cell injection approach in a bio-robotic system", in Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 61-88, Japan.

[۳۹] Matsuoka H., Shimoda S., (2006), "Automatic positioning of a microinjector in mouse ES cells and rice protoplasts", *Journal of Biochemistry*, vol. 69, pp. 187-192.

[۴۰] Xu W., Cai C., (2013), "Time-varying Force Tracking in Impedance Control: A Case Study for Automatic Cell Manipulation", IEEE Int. Conf. on Control and Automation, pp. 1024-1029, China.

[۴۱] Huang H., Sun D., (2007), "Automatic suspended cell injection under vision and force control biomanipulation", IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp. 71-76.

[۴۲] Wenkang X., Chenxiao C., (2011), "PD-based trajectory tracking control in automatic cell injection system", J. of Control Theory Appl., vol. 2, pp. 207-214.

[۴۳] Spong W., Hutchinson S., (2006), "*Robot modeling and control*", John Wiley & Sons, New York, pp. 187-224.

[۴۴] Fateh M.M., Babaghasabha R., (2013), "Impedance control of Robots using voltage control strategy", *Nonlinear Dyn*, vol. 1.

[۴۵] Nourbakhsh R., Siegwart R., (2004), "*Introduction to Autonomous Mobile Robots*", vol. 1, © MIT press Cambridge, England, pp. 89-180.

[۴۶] Jeon D., Tomizuka M., (1993), "Learning Hybrid Force and Position Control of Robot Manipulator" , IEEE Transaction on Robotics and Automation, pp. 423-431.

[۴۷] Lopes A., Almeida F., (2008), "A force-impedance controlled industrial robot using an active robotic auxiliary device", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 1, pp. 299-309.

[۴۸] Garcia A., Feliu V., (2000), "Force control of a single-link flexible robot based on collision detection mechanism", IEEE Proc-Control Theory Appl., vol. 1, pp. 588-595, Spain.

[۴۹] Huang B., Sun D., (2009), "Robotic Cell Injection System With Position and Force Control: Toward Automatic Batch Biomanipulation", IEEE Transaction on Robotics, pp. 727-737, China.

[۵۰] Tanaka Y., Tsuji T., (2004), "On-line learning of robot arm impedance using neural networks", IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp. 941-946, Shenyang.

[۵۱] Carelli R., Kelly R., (1991), "An Adaptive Impedance/Force Controller for Robot Manipulators", IEEE Transaction on Automatic Control, vol. 36, no. 8, pp. 967-971.

[۵۲] Stanisic R.Z, Fernandez A.V, (2012), "Adjusting the parameters of the mechanical impedance for Velocity, Impact nd Force Control", *Journal of Robotica*, vol. 30, no. 4, pp. 583-597.

[۵۳] Kizir S., Bingul Z., (2014), "Fuzzy Impedance and Force Control of a Steward Platform", Turkish J. of Electrical Engineering & Computer Sciences, vol. 22, no. 4, pp. 924-939.

[۵۴] Huanga L., Ge S.S., (2002), "Fuzzy unidirectional force Control of constrained robotic manipulators", Fuzzy Sets and Systems, vol. 134, pp. 135-146.

[۵۵] Surdilovic D., Cojbasic Z., (1999), "Robust robot compliant Motion Control using Intelligent Adaptive Impedance Approach", IEEE Int. Conf. on Rbotics and Automation, vol. 3, pp. 2128-2133, Michigan.

[۵۶] Nagchaudhuri A., Garg D.P., (2001), "Adaptive Control and Impedance Control for Dual Robotic Arms Manipulating a Common Heavy Load", IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics Proceeding, pp. 683-688, Italy.

[۵۷] Molapanah M., Sedaghati A., (2014), "Stability Analysis of a Robust Nonlinear Controller for Flexible Joint robot", Int. J. of Engineering Sciences and Management, pp. 30-39.

[۵۸] Kim S., Ryu J., (2014), "Adaptive Energy-Bounding Approach for Robustly Stable Interaction Control of Impedance-Controlled Industrial Robot With Uncertain Environments", IEEE Trans. on Mechatronics, vol. 19, no. 4, pp. 1195-1205.

[۵۹] Cheah C.C., Kawamura S., (2003), "Stability of hybrid position and force control for robotic manipulator with kinematics and dynamics uncertainties", *Journal of Automatica*, vol. 39, pp. 847-855.

[۶۰] Fateh M.M, (2012), "Robust control of flexible-joint robots using voltage control strategy", *Nonlinear Dyn.*, vol. 67, pp. 1525-1537.

[۶۱] Fateh M.M, Khorashadizadeh S., (2012), "Optimal robust voltage control of electrically driven robot manipulators", *Nonlinear Dyn.*, vol. 4.

[۶۲] Lonnie J., Wayne J., (1995), "Environment Estimation for Enhanced Impedance Control", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol. 6, no. 95, pp. 1854-1859.

[۶۳] Wen T., Murphy S., (1991), "Stability Analysis of Position and Force Control for Robot Arms", IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 36, no. 3, pp. 365-370.

[۶۴] Engelbrecht A.P., (2007), "*Computational intelligence*", vol. 2, John Wiley & Sons, England, pp. 24-68.

[۶۵] Plius M.P., Yilmaz M., (2012), "Fuzzy Controller Scheduling for Robotic Manipulator Force Control", 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, Sarajevo.

[۶۶] Kaynak O., Erbatur K., (2002), "The Fusion of Computationally Intelligent Methodologies and Sliding Mode Control-A Survey", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 48, no. 1, pp. 4-17.

[۶۷] Mikio M., Manabu S., (1995), "Predictive fuzzy control of an autonomous mobile robot with forecast learning function", *J. of Fuzzy Sets and Systems*, vol. 72, pp. 51-60.

[۶۸] Kharmandar N., Khayyat A., (2011), "Force Impedance Control of a Robot Manipulator Using a Neuro-Fuzzy Controller", International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, pp. 559-563, China.

[۶۹] Chen C., Li S., (2009), "EP-based kinematic control and adaptive fuzzy sliding-mode dynamic control for wheeled mobile robots", *J. of Information Sciences*, vol. 179, pp. 180-195.

[۷۰] Wang L.X., (1997), "*A Course in Fuzzy Systems and Control*", vol. 1, Prentice-Hall International inc., pp. 64-98.

Abstract

This thesis discusses about the designing of the Optimal Force-Impedance Controller in SCARA Robot arm with the aim of cell injection using Voltage Control Strategy. In the cell injection system, the Injector via fine needle, injects the materials into the cells. This thesis proposes employing SCARA Robot with injection tool and includes ability for desired tracking and also applying of time-varying force. In recent articles the control injects to the rotating plate of Cells and therefore causes the damaging risk for cells. The purpose of this thesis is the system is fixed plate and to improve the success full, the robot is controlled. This thesis describes the impedance model of the robot based on Thevenin method and the parameters of environmental models are estimated via nonlinear proposed models and by using the recursive method, the minimum of squares errors will be optimal. In all recent studies of cell injection systems, the impedance control are based on torque control method and the purpose of this article is applying the impedance control using voltage control strategy. According to the nonlinear and also multivariate model of robot, to overcome uncertainty subjects the Robust and adaptive controller methods are proposed and because of to be free of robot model, the designing of phase controllers are more efficient. In the proposed method, the stability of the control system is guaranteed and it will be shown. To solve the problem of how to select the coefficients of impedance model to implementation the optimal force in to the tested cells, a fuzzy system included adaptive system is designed. These systems consecutively estimate the parameters for the impedance robot model and also the environmental models. Results of the simulation demonstrate the desired performance of the proposed method.

Keywords: impedance control, voltage control strategy, cell injection robot, fuzzy systems, estimating the parameters of the impedance model

Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Optimal Force-Impedance Control of Robot Manipulator using Voltage Control Strategy

Zeinab Ghassemi Zahan

Supervisors:

Dr. Ali AkbarZadeh Kalat

Dr. Mohamad Mahdi Fateh

Date: 2015