

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

کنترل تعامل دینامیکی غیرخطی بازوهای ماهر رباتیک

محمدعلی دانش پژوه

استاد راهنما:

پروفسور محمدمهدی فاتح

شهریور ۱۳۹۴



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره: ۱۳۱۸/آ.ت.ب
تاریخ: ۹۴/۰۶/۳۰
ویرایش: -----

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای:

محمد علی دانش پژوه رشته: مهندسی برق گرایش: کنترل

تحت عنوان: کنترل تعامل دینامیکی غیر خطی بازوهای ماهر رباتیک

که در تاریخ ۹۴/۰۶/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه) ۱۸/۹۹/۹۹ امتیاز برگزیده دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر محمد مهدی کاظمی	استاد	
۲- استاد مشاور	---	---	---
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر حمزه زارعی	استاد	
۴- استاد ممتحن	دکتر حبیب احمدی	استاد	
۵- استاد ممتحن	دکتر علی زارعی	دانشیار	

رئیس دانشکده:

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مرا آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بگو شتم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانیان را پاس توانم بگویم .

امروز، هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشت رضای شما

را آوردی کران سگ ترا این ارزان ندانم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم کوزه غبار خشکیان را

بزولید .

بوسه بر دستان پر مهرتان

استاد گرامی جناب آقای پروفور محمد مهدی فلاح:

دلسوزی، تلاش و کوشش حضرتعالی در تعلیم و تربیت و انتقال معلومات و تجربیات ارزشمند دکنار
برقراری رابطه صمیمی و دوستانه برای کسب علم و دانش حقیقتاً قابل ستایش است. اینجانب بر خود وظیفه
میدانم در کسوت ساگردی از زحمات و خدمات ارزشمند شما استاد گرانقدر تقدیر و تشکر نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **محمدعلی دانش پژوه** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق دانشکده برق و رباتیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه **کنترل تعامل دینامیکی غیرخطی بازوهای ماهر رباتیک** تحت راهنمایی **پروفسور محمدمهدی فاتح** 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 شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » 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 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.

چکیده:

در این پایان نامه روش جدید کنترل تعامل دینامیکی غیرخطی برای بازوهای ماهر رباتیک ارائه می شود. مزیت این روش کنترلی در مقایسه با روش کنترل امپدانس مرسوم کاهش حجم محاسبات قانون کنترل است که می تواند پیاده سازی عملی، سرعت اجرا و وابستگی کمتر به مدل ربات را نتیجه دهد ضمن آنکه اهداف کنترلی در تعامل ربات با محیط نیز محقق می شود. در اهداف کنترلی همانند کنترل امپدانس مرسوم چنانچه ربات درگیر با محیط نباشد ردگیری مطلوب نقطه نهایی بدست می آید و در صورت درگیری با محیط آسیبی به ربات یا محیط نمی رسد و رابطه دینامیکی بین سرعت نقطه انتهایی و نیروی وارد به محیط بصورت دلخواه تنظیم می گردد. سه روش کنترل امپدانس، کنترل امپدانس ترکیبی و کنترل تعامل دینامیکی غیرخطی با یکدیگر مقایسه می شوند و روی ربات اسکارا شبیه سازی می گردند. روش امپدانس مرسوم یک رابطه خطی بین نیروی وارده بر محیط و جابجایی نقطه انتهایی برقرار می کند ولی امکان تنظیم نیرو در حین درگیری را ندارد. در روش امپدانس ترکیبی امکان تنظیم نیرو نیز وجود دارد. روش تعامل دینامیکی غیرخطی تعمیم روش کنترل امپدانس مرسوم از معادله دیفرانسیل خطی به معادله دیفرانسیل غیرخطی است.

کلمات کلیدی: کنترل امپدانس، کنترل امپدانس ترکیبی، تعامل دینامیکی، کنترل غیرخطی

فهرست مطالب:

فصل ۱ مقدمه.....	۱
۱-۱ کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت.....	۲
۲-۱ کنترل امپدانس:.....	۴
۳-۱ کنترل امپدانس ترکیبی.....	۵
۴-۱ کنترل امپدانس با راهبرد کنترل ولتاژ.....	۷
۵-۱ اهداف تحقیق.....	۸
۶-۱ طرح کلی پایان نامه.....	۸
فصل ۲ مدلسازی بازوی ماهر اسکارا:.....	۱۱
۱-۲ سینماتیک مستقیم.....	۱۱
۱-۱-۲ ماتریس دوران.....	۱۲
۲-۱-۲ بردار انتقال.....	۱۴
۳-۱-۲ الگوریتم دناویت هارتنبرگ.....	۱۵
۲-۲ سینماتیک وارون.....	۱۷
۳-۲ ماتریس ژاکوبین.....	۱۷
۴-۲ مدلسازی دینامیکی.....	۱۸
۱-۴-۲ انرژی جنبشی.....	۱۸
۲-۴-۲ انرژی پتانسیل.....	۱۹
۳-۴-۲ لاگرانژین.....	۲۰

۲۰	..... معادله اویلر - لاگرانژ
۲۱	..... مدلسازی ربات اسکارا
۲۵	..... فصل ۳ کنترل امپدانس مرسوم
۲۵	..... ۱-۳ مفهوم امپدانس
۲۷	..... ۲-۳ بکارگیری کنترل امپدانس
۲۹	..... ۳-۳ مدلسازی محیط
۳۰	..... ۴-۳ کنترل کننده امپدانس با راهبرد کنترل گشتاور
۳۲	..... ۵-۳ شبیه سازی
۳۷	..... فصل ۴ کنترل امپدانس ترکیبی
۳۷	..... ۱-۴ اصل دوگانی
۳۹	..... ۱-۱-۴ تنظیم نیرو در محیط خازنی
۳۹	..... ۲-۱-۴ تنظیم موقعیت در محیط جرمی
۴۰	..... ۲-۴ حلقه کنترل خارجی
۴۱	..... ۱-۲-۴ زیرفضای کنترل موقعیت
۴۲	..... ۲-۲-۴ زیرفضای کنترل نیرو
۴۳	..... ۳-۲-۴ ماتریس انتخاب
۴۳	..... ۳-۴ حلقه کنترل داخلی
۴۴	..... ۴-۴ شبیه سازی
۴۷	..... فصل ۵ کنترل تعامل دینامیکی غیرخطی

۴۸	..... ۱-۵ تعامل دینامیک غیرخطی
۴۸	..... ۲-۵ کنترل کننده تعامل دینامیکی غیرخطی
۵۶	..... ۳-۵ شبیه‌سازی
۵۹	..... فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادات:
۵۹	..... ۱-۶ نتیجه گیری
۶۰	..... ۲-۶ پیشنهادات

فهرست شکل‌ها:

- شکل ۱-۱: کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت ۳
- شکل ۲-۱: کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت با استفاده از سینماتیک وارون ۴
- شکل ۳-۱: بکارگیری کنترل امیدانس ترکیبی ۶
- شکل ۴-۱: بکارگیری کنترل امیدانس با راهبرد کنترل ولتاژ ۸
- شکل ۱-۲: دستگاه مختصات دوران یافته ۱۳
- شکل ۲-۲: انتقال دستگاه مختصات ۱۴
- شکل ۳-۲: پیکربندی ربات اسکارا ۲۱
- شکل ۱-۳: نمایش شبکه‌ای امیدانس الکتریکی ۲۶
- شکل ۲-۳: نمایش معادل شبکه‌ای برای سیستم مکانیکی ۲۶
- شکل ۳-۳: سیستم جرم-فنر-دمپر ۲۷
- شکل ۴-۳: امیدانس مطلوب ربات ۲۸
- شکل ۵-۳: مدل امیدانس محیط ۲۸
- شکل ۶-۳: تعامل ربات با محیط ۲۸
- شکل ۷-۳: مسیر مطلوب در فضای کار ۳۳
- شکل ۸-۳: خطای ردیابی موقعیت مطلوب در فضای کار ۳۴
- شکل ۹-۳: نیروی تماسی بین ربات و محیط ۳۵
- شکل ۱۰-۳: گشتاور اعمالی به مفاصل ربات ۳۶
- شکل ۱-۴: محیط خازنی و ربات جرمی ۳۸
- شکل ۲-۴: محیط جرمی و ربات خازنی ۳۸
- شکل ۳-۴: خطای ردیابی در فضای کار ۴۴

- شکل ۴-۴: تنظیم نیروی مطلوب تماسی بین ربات و محیط ۴۵
- شکل ۵-۴: گشتاور ورودی به ربات ۴۶
- شکل ۱-۵: تعامل دینامیکی غیرخطی ۴۸
- شکل ۲-۵: خطای ردیابی مسیر مطلوب ۵۷
- شکل ۳-۵: نیروی تماسی بین ربات و محیط ۵۷
- شکل ۴-۵: گشتاور اعمالی به مفاصل ربات ۵۸

فهرست جدول‌ها:

جدول ۱-۲: پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات اسکارا ۲۱

جدول ۲-۲: پارامترهای ربات اسکارا ۲۲

فصل ۱

مقدمه

امروزه گسترش و به کارگیری ربات‌ها در عرصه‌های مختلف مانند پزشکی، عملیات جست‌وجو و نجات و خدمات و غیره بر کسی پوشیده نیست. ربات‌ها می‌توانند اعمال تکراری را با دقت و سرعت بالایی انجام دهند و جایگزین مناسبی برای انسان‌ها در انجام امور مختلف هستند. هم‌اکنون ربات‌ها در حوزه‌های مختلفی مانند صنایع خودروسازی، عمل جراحی از راه دور، تحقیقات فضایی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان کارهای انجام شده توسط ربات را به دو دسته کارهای غیر تماسی و کارهای تماسی تقسیم کرد [۱]. ربات در کارهای غیر تماسی مانند پاشیدن رنگ، با محیط تماس فیزیکی ندارد. در این‌گونه کارها هدف کنترل موقعیت نقطه انتهایی ربات در یک مسیر مطلوب است. از طرف دیگر در بسیاری از کارها مانند به هم پیوستن قطعات، سمباده کاری، جراحی و غیره ربات نیازمند تعامل با محیط است. این حوزه از کارکرد ربات یکی از جذاب‌ترین حوزه‌های تحقیقاتی در زمینه‌ی رباتیک بوده است. در حالتی که ربات با محیط تماس و تعامل دارد با کنترل موقعیت نقطه انتهایی نمی‌توان وظیفه مورد نظر را به درستی انجام داد، زیرا خطاهای کوچک در ردیابی موقعیت باعث ایجاد نیروهای بزرگ بین ربات و محیط می‌شود و نتایج نامطلوبی را به همراه

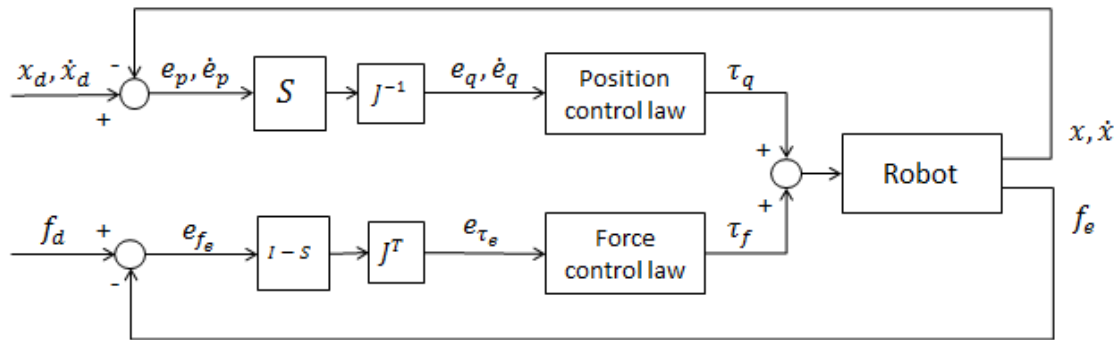
دارد [۲]. بنابراین، کنترل تعامل ربات با محیط هدفی بنیادی است که باعث می‌شود ربات رفتاری انعطاف‌پذیر و سازگار با محیط از خود نشان دهد [۳].

کنترل انعطاف‌پذیری ربات در مقابل محیط از دو طریق امکان‌پذیر است. در روش اول می‌توان ساختار مکانیکی نقطه انتهایی ربات را به‌گونه‌ای تنظیم کرد که رفتار مناسب در تعامل با محیط را از خود نشان دهد. برای روشن شدن مسئله فرض کنید ربات می‌خواهد شیشه پنجره را با اسفنج بشوید. در این حالت به دلیل انعطاف‌پذیری اسفنج می‌توان با کنترل مکان مجری نهایی نسبت به شیشه نیروی اعمال‌شده به پنجره را تنظیم کرد. در این حالت اگر نرمی اسفنج بسیار بالا باشد و کنترل موقعیت با دقت بالایی انجام شود. کنترل مکان به‌تنهایی رضایت‌بخش است. روش دوم استفاده از روش‌های نرم-افزاری است. در روش اول برای انجام کارهای مختلف نیاز است ساختار مکانیکی نقطه انتهایی ربات هر بار تنظیم شود، ولی در روش دوم که به روش فعال معروف است، توانایی ربات در تعامل با محیط به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد [۴]. در ادامه روش‌های فعال را بررسی می‌کنیم.

۱-۱ کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت

این روش را می‌توان از نخستین روش‌های کنترل تعامل ربات با محیط به شمار آورد [۵]. از آنجاکه کنترل همزمان نیرو و موقعیت در یک راستا امکان‌پذیر نیست، فضای کار در هر راستا به دو زیرفضای نیرو و موقعیت تقسیم می‌شود و کنترل‌کننده در هر لحظه با توجه به کنترل نیرو و یا کنترل موقعیت سوئیچ لازم را انجام می‌دهد. در راستاهایی که ربات با محیط تماس ندارد کنترل موقعیت و در راستاهایی که ربات با محیط در تماس است کنترل نیرو انجام می‌شود. توجه داریم که محرکه‌های ربات موتورهای الکتریکی هستند که گشتاور موردنیاز مفاصل را ایجاد می‌کنند. از طرفی کنترل موقعیت و کنترل نیرو نقطه انتهایی ربات در فضای کار انجام می‌شود، بنابراین یک انتقال بین فضای مفصلی (فضای گشتاور ایجادشده توسط محرکه‌های ربات) و فضای کار یا فضای کارترین موردنیاز

است که این ارتباط توسط ماتریس ژاکوبین ربات انجام می‌شود. ساختار کلی کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

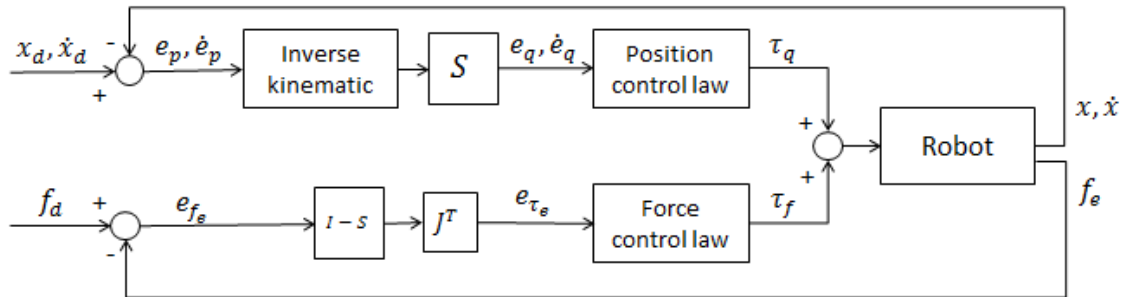


شکل ۱-۱: کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت [۵]

همان‌طور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است سیستم کنترل برای اجرا نیازمند مقادیر x ، \dot{x} و f_e است که همگی قابل اندازه‌گیری و در دسترس هستند. برای اجرای قانون کنترل از ماتریس قطری انتخاب (S) استفاده می‌شود. در راستاهایی که جهت کنترل نیرو در نظر گرفته می‌شوند، فرمان‌های موقعیت فیلتر می‌شود و در زیر فضاهایی که جهت کنترل موقعیت در نظر گرفته می‌شوند، فرمان‌های نیرو فیلتر می‌شوند. طراحی در این روش نیازمند دو حلقه کنترلی داخلی و خارجی است. حلقه داخلی وظیفه حذف دینامیک‌های غیرخطی ربات را با استفاده از خطی سازی فیدبکی یا روش دینامیک معکوس بر عهده دارد. در این حلقه ورودی از جنس شتاب و خروجی از جنس گشتاورهای اعمالی به مفاصل ربات است. حلقه خارجی وظیفه ایجاد شتاب مطلوب به ربات جهت ردیابی مسیر طراحی شده را بر عهده دارد.

نکته‌ای که در اینجا قابل ذکر است استفاده از وارون ماتریس ژاکوبین در تبدیل از فضای کار یا همان فضای کارترین به فضای مفصلی است در اینجا باید دقت داشت مسیر طراحی شده در فضای کار چگونه‌ای باشد که حالت تکین در ژاکوبین اتفاق نیفتد. همچنین برای حل این مشکل می‌توان از روابط سینماتیک وارون نیز استفاده کرد [۶]. شکل (۲-۱) ساختار کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت را با

استفاده از سینماتیک وارون نشان می‌دهد. در این حالت انتقال از فضای کارترین به فضای مفصلی را می‌توان بدون نگرانی از تکین شدن ماتریس ژاکوبین انجام داد.



شکل ۲-۱: کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت با استفاده از سینماتیک وارون [۶]

استفاده از سینماتیک وارون در قانون کنترل نیازمند محاسبات پیچیده تر نسبت به ماتریس ژاکوبین است. همچنین هر چقدر تعداد رابط‌های ربات افزایش یابد محاسبه سینماتیک وارون دشوارتر می‌شود. این در حالی است که ماتریس ژاکوبین ربات بصورت تحلیلی قابل محاسبه است. در هر دو ساختار کنترلی شکل‌های (۱-۱) و (۲-۱) به علت وجود سوئیچ در لحظه تعامل با محیط ناپیوستگی در سیگنال کنترل قابل پیش‌بینی است که باعث محدودیت در پیاده‌سازی عملی می‌شود. همچنین طراحی کنترل کننده بر اساس مدل دقیق انجام می‌شود که برای حل این مشکل در [۷] و [۸] از روش کنترل مقاوم ترکیبی نیرو و موقعیت استفاده شده است.

۲-۱ کنترل امپدانس:

در این روش، هدف کنترل رفتار ربات بر اساس یک رابطه دینامیکی بین نیروهای تماس و موقعیت می‌باشد. بنابراین کنترل نیرو و کنترل موقعیت بطور مستقیم انجام نمی‌شود. رابطه دینامیکی بین نیرو و موقعیت امپدانس مکانیکی نامیده می‌شود. کنترل امپدانس بدون نیاز به سوئیچ و کلیدزنی رفتار ربات را در حرکت‌های مقید و غیر مقید کنترل می‌کند [۹].

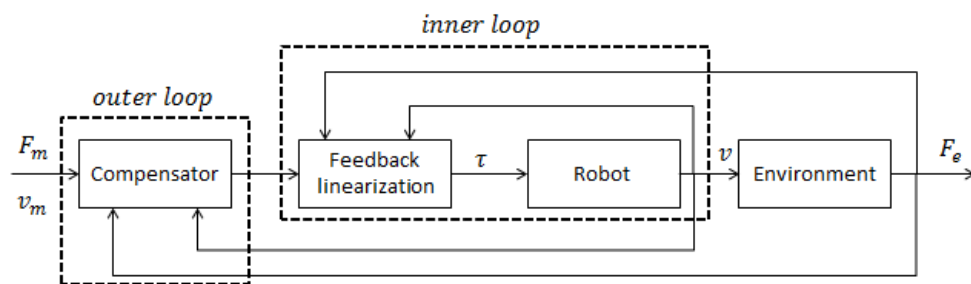
کنترل امپدانس اولین بار در سال ۱۹۸۵ میلادی توسط هوگان مطرح شد [۲]. مفهوم امپدانس ریشه در نظریه عمومی شبکه‌ها دارد. رفتار یک شبکه تک‌قطبی می‌تواند توسط دو متغیر تلاش و جریان توصیف شود [۹]. رابطه بین متغیر تلاش و جریان بصورت امپدانس تعریف می‌شود. هوگان با بهره‌گیری از مفهوم امپدانس اهمیت آن را در تعامل ربات و محیط نشان داد [۲]. با در نظر گرفتن مفهوم امپدانس می‌توان نشان داد که کنترل موقعیت حالت خاصی از کنترل امپدانس است که در آن امپدانس محیط صفر است.

کنترل امپدانس کارایی خود را در تعامل ربات و محیط بخوبی نشان داده است. انتخاب امپدانس مناسب علاوه بر پایداری، در عملکرد سیستم نیز تاثیر بسزایی دارد. مدل امپدانس مطلوب که در [۱۰] ارائه شده است گرچه پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین می‌کند اما در تعامل با محیط‌های سخت رفتار نوسانی از خود نشان می‌دهد و باعث ایجاد خستگی در ربات و محیط می‌شود. بنابراین در [۱۱] امپدانس تعمیم یافته ارائه شده است که عملکرد حلقه بسته مطلوب را ایجاد می‌کند اما برای اجرا نیاز به مشتق نیروهای تماسی دارد. روش کنترل امپدانس با ارائه قانون کنترل واحد نسبت به روش کنترل ترکیبی نیرو و موقعیت دارای مزیت است. مشکل اساسی در کنترل امپدانس وجود قانون کنترل پیچیده و وابسته به مدل سیستم است که برای حل این مشکل در [۱۲]، [۱۳] و [۱۴] از روش‌های کنترل امپدانس مقاوم و کنترل امپدانس تطبیقی استفاده شده است. کاربردهای کنترل امپدانس فقط به حوزه رباتیک محدود نمی‌شود، در [۱۵]، [۱۶] و [۱۷] روش کنترل امپدانس برای سیستم‌های تعلیق هیدرولیکی و سیستم‌های تعلیق فعال بررسی شده است.

۳-۱ کنترل امپدانس ترکیبی

در بخش‌های قبل دیدیم که هر چند کنترل موقعیت و نیرو بطور همزمان قابل اجرا نیست، اما با کنترل اندازه امپدانس مکانیکی در ربات می‌توان به تنظیم نیرو پرداخت [۹]. سوالی که در اینجا مطرح

می‌شود این است که آیا می‌توان در روش کنترل امپدانس نیروی دلخواه را به محیط وارد کرد؟ روش کنترل امپدانس ترکیبی به بررسی این موضوع می‌پردازد. هر چند که روش کنترل امپدانس در کارهای نیازمند انعطاف خوب عمل می‌کند اما در کارهای نیازمند نیروی دقیق دارای ضعف است. اسپانگ و اندرسون در [۹] محیط را بر اساس مدل امپدانس به سه دسته جرمی، خازنی و مقاومتی تقسیم نمودند. سپس با استفاده از این دسته‌بندی و با استفاده از اصل دوگانی نشان دادند که با انتخاب امپدانس ربات بصورت دوگان امپدانس محیط می‌توان کنترل موثرتری را ارائه داد. بر این اساس کنترل امپدانس ترکیبی معرفی شد تا از ادغام کنترل ترکیبی نیرو - موقعیت و کنترل امپدانس، کنترل نیرو نیز محقق شود [۱۸].



شکل ۱-۳: بکارگیری کنترل امپدانس ترکیبی

روش کنترل امپدانس ترکیبی با تکیه بر ویژگی تفکیک زیرفضاها و همچنین کاربرد مفهوم امپدانس توانست بخوبی معایب هردو روش فوق را برطرف نماید. الگوریتم کار در اینجا بدین صورت است که ابتدا زیرفضاهای نیرو و موقعیت با توجه به فضاهای مقید از همدیگر تفکیک شده، سپس کنترل ترکیبی بر مبنای مفاهیم تئوری مدار در حالت دائمی، با انتخاب امپدانس مناسب در هر زیرفضا هدف مطلوب را محقق می‌سازد، ردیابی موقعیت مطلوب در زیرفضای کنترل موقعیت و ردیابی نیروی مطلوب در زیرفضای کنترل نیرو اجرا می‌شود.

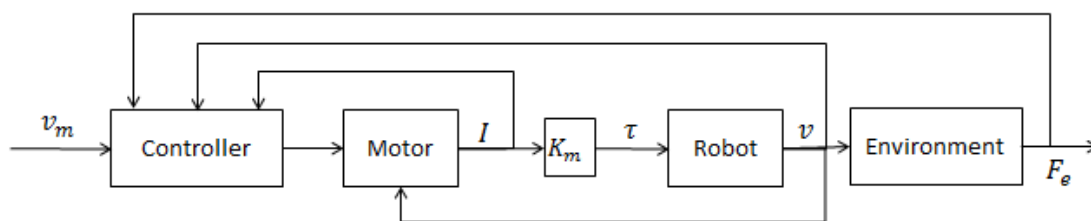
برای اجرای قانون کنترل امپدانس ترکیبی، دو حلقه کنترل نیاز است. ابتدا یک حلقه داخلی ایجاد می‌شود که خطی سازی فیدبکی را انجام می‌دهد سپس حلقه کنترل بیرونی وظیفه ایجاد امپدانس

مطلوب را بر عهده دارد (شکل (۱-۳)). مانند آنچه در کنترل ترکیبی نیرو - موقعیت بیان شد کنترل در هر راستا به دو زیر فضای کنترل امپدانس نیرو و کنترل امپدانس سرعت تقسیم می‌شود و کنترل کننده با یک سوئیچ بین دو زیر فضا ارتباط ایجاد می‌کند.

۴-۱ کنترل امپدانس با راهبرد کنترل ولتاژ

روش‌های کنترل بر پایه گشتاور که تا کنون بررسی شدند به علت درگیر شدن با معادلات دینامیکی ربات همواره دارای پیچیدگی است و برای اجرا نیاز به محاسبات زیادی دارد. همچنین روش‌های کنترل بر پایه گشتاور برای اجرای عملی نمی‌توانند بطور مستقیم به محرکه‌های ربات اعمال شوند. بنابراین حلقه کنترل دیگری لازم است تا گشتاور محاسبه شده توسط قانون کنترل، بوسیله محرکه‌ها ایجاد شود [۱۹]. علاوه بر مشکلات ذکر شده محدودیت‌های عملی و دینامیک محرکه‌ها را نیز باید اضافه نمود. راهبرد کنترل ولتاژ بطور موثری به حل مشکلات فوق می‌انجامد. برای ربات با محرکه‌های موتورهای الکتریکی جریان مستقیم، می‌توان با کنترل جریان موتور به کنترل گشتاور پرداخت و کنترل جریان موتور با کنترل ولتاژ محقق می‌شود. بنابراین مسئله کنترل گشتاور به مسئله کنترل موتور و کنترل موتور به کنترل ولتاژ تبدیل می‌شود. با مطرح شدن راهبرد کنترل ولتاژ محاسبات قانون کنترل به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد. ایده اصلی بر این حقیقت گماشته شده است که گشتاور ناشی از دینامیک‌های مکانیکی در جریان موتور نمایان می‌شود. بنابراین گشتاورهای ناشی از دینامیک ربات را می‌توان به عنوان بار برای موتور در نظر گرفت [۲۰]. شکل (۱-۴) شمای کلی کنترل امپدانس با راهبرد کنترل ولتاژ را نشان می‌دهد.

تا کنون کنترل کننده‌های متنوعی با راهبرد کنترل ولتاژ ارائه شده‌اند که می‌توان به کنترل مقاوم با تقریب فازی تطبیقی عدم قطعیت [۲۱]، کنترل فازی ریز تنظیم [۲۲]، کنترل فازی مقاوم دقیق [۲۳]، کنترل فازی تطبیقی مستقیم غیر متمرکز [۲۴] اشاره کرد.



شکل ۴-۱: بکارگیری کنترل امپدانس با راهبرد کنترل ولتاژ

۵-۱ اهداف تحقیق

می‌توان گفت که تمام روش‌های ارزیابی شده برای کنترل تعامل دینامیکی ربات با محیط با عنوان روش‌های کنترل امپدانس شناخته می‌شوند. در روش کنترل امپدانس سعی می‌شود با ارزیابی قانون کنترل مناسب، دینامیک خطی مطلوب بین نیرو و موقعیت برقرار شود [۲]، [۲۵] و [۲۶]. در این پایان‌نامه با ایجاد دینامیک غیر خطی مناسب، بین نیرو و موقعیت در مقایسه با کنترل امپدانس علاوه بر کاهش محاسبات مربوط به قانون کنترل می‌توان به انعطاف بیشتری در رابطه دینامیکی بین موقعیت و نیرو دست یافت. روش پیشنهادی کنترل تعامل دینامیکی غیرخطی ربات با روش کنترل امپدانس مقایسه و تحلیل پایداری سیستم کنترل نیز ارزیابی خواهد شد. روش کنترل پیشنهادی روی ربات اسکارا شبیه‌سازی می‌گردد.

۶-۱ مروری بر پایان‌نامه

در فصل دوم مدل‌سازی ربات اسکارا ارائه می‌شود.

در فصل سوم روش کنترل امپدانس مرسوم به همراه مفاهیم پایه‌ای امپدانس مطرح می‌شود و نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود.

در فصل چهارم کنترل امپدانس ترکیبی بررسی می‌گردد و نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود.

در فصل پنجم کنترل تعامل دینامیک غیرخطی به همراه اثبات پایداری و قضایای مرتبط با آن ارائه می‌شود و در نهایت نتایج شبیه‌سازی را با روش کنترل امیدانس مرسوم مقایسه می‌گردد.

در فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای کارهای آینده ارائه می‌شود.

فصل ۲

مدل سازی بازوی ماهر اسکارا:

در این فصل چگونگی بدست آوردن مدل ریاضی بازوی ماهر مکانیکی را بیان می‌کنیم و مدل سازی ربات‌ها بصورت سینماتیک و دینامیکی تشریح می‌گردد. با بکارگیری جدول دناویت هارتنبرگ روش منظمی برای انجام سینماتیک مستقیم ارائه می‌دهیم. در مدل سازی دینامیکی ربات انرژی جنبشی و پتانسیل را بدست می‌آوریم و در پایان مدل ریاضی ربات را ارائه می‌کنیم [۳].

۱-۲ سینماتیک مستقیم

سینماتیک مستقیم بیانگر ارتباط میان مفاصل بازوهای ربات با موقعیت و جهت مجری نهایی است. در واقع سینماتیک مستقیم تعیین کننده جهت و موقعیت مجری نهایی با توجه به مقادیر متغیرهای مفصلی می‌باشد. یک بازوی رباتیک مجموعه‌ای از رباط‌ها است که توسط مفاصل مختلف به یکدیگر متصل گردیده‌اند. یک بازوی ربات با تعداد n مفصل همواره $n+1$ رباط را در بر دارد. مفاصل ربات به دو نوع کشویی و لولایی تقسیم می‌شوند. مفاصل لولایی که با R نشان داده می‌شود امکان چرخش نسبی بین دو رباط را فراهم می‌کند. مفاصل کشویی که با P نشان داده می‌شود اجازه حرکت نسبی

طولی را بین دو رابط می دهد. متغیرهای مفصلی در نوع لولایی زاویه بین دو رابط و در مفاصل کشویی طول رابط می باشد. پیکربندی های مختلفی با توجه به چگونگی ترکیب مفاصل ربات وجود دارد. از جمله می توان به هنرمند، استوانه ای، اسکارا، استنفورد و ... اشاره کرد. در این پایان نامه به طور خاص به ترکیب اسکارا می پردازیم. در ادامه برای بدست آوردن سینماتیک مستقیم، ماتریس دوران و بردار انتقال را تعریف می کنیم و سپس روش دناویت هارتنبرگ را برای بدست آوردن سینماتیک مستقیم بکار می بریم.

۱-۱-۲ ماتریس دوران

شکل (۱-۲) را در نظر بگیرید. فرض کنید که P_0 نمایش نقطه P در مختصات دستگاه $ox_0y_0z_0$ و P_1 نمایش نقطه P در دستگاه $ox_1y_1z_1$ باشد. همانطور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است مبدا در این دستگاه نقطه o می باشد اما محورهای آن ها نسبت به هم دوران یافته است. می خواهیم با یک ماتریس دوران مناسب نقطه P_0 را به نقطه P_1 مرتبط کنیم. برای نقطه P_1 می توان نوشت:

$$P_1 = p_{1x}i_1 + p_{1y}j_1 + p_{1z}k_1 \quad (۱-۲)$$

چون P_0 و P_1 نمایش یکسان بردار P می باشند ارتباط بین مولفه های P در دو دستگاه مختصات بصورت زیر است:

$$p_{0x} = P_0i_0 = P_1i_0 = p_{1x}i_1 \cdot i_0 + p_{1y}j_1 \cdot i_0 + p_{1z}k_1 \cdot i_0 \quad (۲-۲)$$

فرمول های مشابهی برای p_{0y} و p_{0z} داریم یعنی:

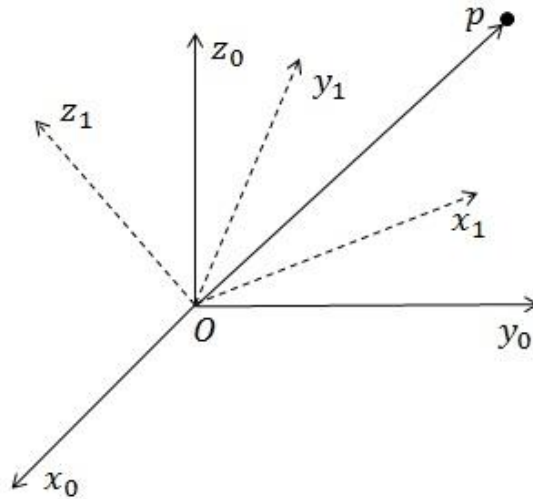
$$p_{0y} = p_{1x}i_1 \cdot j_0 + p_{1y}j_1 \cdot j_0 + p_{1z}k_1 \cdot j_0 \quad (۳-۲)$$

$$p_{0z} = p_{1x}i_1 \cdot k_0 + p_{1y}j_1 \cdot k_0 + p_{1z}k_1 \cdot k_0 \quad (۴-۲)$$

معادلات (۲-۲)، (۲-۳) و (۲-۴) را بصورت (۲-۵) می‌نویسیم.

$$P_0 = \begin{bmatrix} i_1 \cdot j_0 & j_1 \cdot j_0 & k_1 \cdot j_0 \\ i_1 \cdot k_0 & j_1 \cdot k_0 & k_1 \cdot k_0 \end{bmatrix} P_1 = R_0^1 P_1 \quad (۲-۵)$$

بنابراین اگر یک نقطه معلوم در مختصات $ox_1y_1z_1$ بعنوان P_1 بیان شود پس همان بردار را در دستگاه $ox_0y_0z_0$ بیان می‌کند.



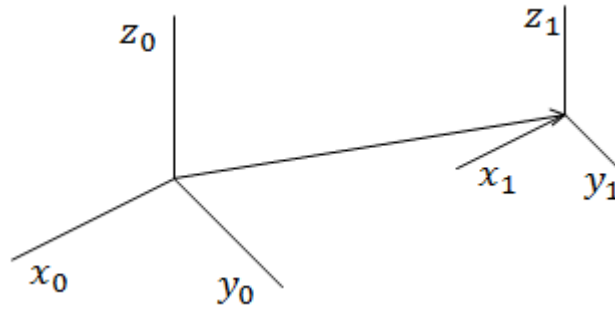
شکل ۲-۱: دستگاه مختصات دوران یافته

بعنوان مثال اگر مختصات $ox_1y_1z_1$ از دوران مختصات $ox_0y_0z_0$ حول محور z_0 به اندازه زاویه θ بوجود آمده باشد خواهیم داشت:

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۲-۶)$$

۲-۱-۲ بردار انتقال

فرض کنید در شکل (۲-۲) محورهای مختصات $ox_1y_1z_1$ و $ox_0y_0z_0$ موازی باشند. بردار d_0^1 را می-توان بنحوی انتخاب نمود که مختصات $ox_0y_0z_0$ را به مختصات $ox_1y_1z_1$ تبدیل کند.



شکل ۲-۲: انتقال دستگاه مختصات

مانند حالت قبل هر نقطه مانند P_0 در دستگاه $ox_1y_1z_1$ را می-توان طبق رابطه (۷-۲) بصورت نقطه P_1 در دستگاه $ox_0y_0z_0$ تعریف نمود.

$$P_0 = P_1 + d_0^1 \quad (۷-۲)$$

رابطه کلی بین دو دستگاه مختصات را می-توان بصورت ترکیب دوران خالص و انتقال خالص تعریف کرد که بعنوان حرکت صلب شناخته می-شود [۶]. دو حرکت صلب بصورت زیر در نظر می-گیریم:

$$P_0 = R_0^1 P_1 + d_0^1 \quad (۸-۲)$$

$$P_1 = R_1^2 P_2 + d_1^2 \quad (۹-۲)$$

با جایگذاری رابطه (۹-۲) در (۸-۲) حرکت صلب دیگری حاصل می-شود که بصورت رابطه (۱۰-۲) می-باشد.

$$P_0 = R_0^1 R_1^2 P_2 + R_0^1 d_1^2 + d_0^1 \quad (۱۰-۲)$$

رابطه بین P_0 و P_2 یک حرکت صلب است و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_0 = R_0^2 P_2 + d_0^2 \quad (۱۱-۲)$$

که:

$$R_0^2 = R_0^1 R_1^2 \quad (۱۲-۲)$$

$$d_0^2 = R_0^1 d_1^2 + d_0^1$$

تساوی ماتریسی زیر از روابط (۱۲-۲) بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} R_0^1 & d_0^1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1^2 & d_1^2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0^1 R_1^2 & R_0^1 d_1^2 + d_0^1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۳-۲)$$

که نشان می‌دهد حرکت‌های صلب بوسیله مجموعه ماتریس‌های به فرم زیر می‌تواند نشان داده شود:

$$T_0^n = A_1 A_2 \dots A_{n-1} A_n = \begin{bmatrix} R_0^n & d_0^n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۴-۲)$$

که به آن ماتریس همگن گفته می‌شود. ماتریس‌های A_i توصیف دستگاه مختصات i در دستگاه مختصات $i+1$ است.

۳-۱-۲ الگوریتم دناویت هارتنبرگ

در ربات‌هایی با $n+1$ رابط، ابتدا رابط‌ها را از صفر تا n شماره‌گذاری می‌کنیم. پایه ربات را بعنوان رابط صفر و مفاصل را از یک تا n شماره‌گذاری می‌شوند. به انتهای هر رابط یک دستگاه مختصات متصل می‌کنیم. با این مقدمه دستورالعمل دناویت هارتنبرگ بصورت زیر بیان می‌شود:

مرحله ۱: محورهای مفاصل را z_0, z_1, \dots, z_{n-1} قرار داده و نامگذاری کنید.

مرحله ۲: دستگاه پایه را نصب کنید، مبدا را هر جای دلخواه روی محور z_0 تنظیم کنید. محورهای x_0 و y_0 را با در نظر گرفتن دستگاه راست گرد بطور مناسب انتخاب کنید. برای $i=1, \dots, n-1$ مرحله سه تا پنج را اجرا کنید.

مرحله ۳: مبدا o_i را جایی که عمود مشترک z_i و z_{i-1} ، را قطع می کند قرار دهید. اگر z_i و z_{i-1} موازی هستند o_i را در محل مفصل i قرار دهید.

مرحله ۴: x_i را در امتداد عمود مشترک بین z_i و z_{i-1} و در عمود از o_i قرار دهید. وقتی z_i و z_{i-1} متقاطع هستند در جهت عمود بر صفحه z_i و z_{i-1} قرار دهید.

مرحله ۵: y_i را با تکمیل دستگاه راست گرد مشخص کنید.

مرحله ۶: دستگاه مختصات قسمت پایانی $x_n y_n z_n$ را تعیین کنید.

مرحله ۷: یک جدول از پارامترهای رابط $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$ درست کنید. پارامترهای ذکر شده بصورت زیر هستند:

a_i : طول امتداد x_i از o_i تا محل تقاطع محورهای x_i و z_{i-1} می باشد.

d_i : طول امتداد z_{i-1} از o_{i-1} تا محل تقاطع محورهای x_i و z_{i-1} است. هرگاه مفصل i کشویی باشد d_i متغیر است.

α_i : زاویه بین z_i و z_{i-1} که حول x_i اندازه گیری می شود.

θ_i : زاویه بین x_i و x_{i-1} که حول z_{i-1} اندازه گیری می شود. هرگاه مفصل i لولایی باشد θ_i متغیر است.

مرحله ۸: ماتریس تبدیل همگن زیر را با جایگذاری پارامترهای بالا بدست آورید.

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15-2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

مرحله ۹: $T_0^n = A_1 A_2 \dots A_n$ را تشکیل دهید. این ماتریس تبدیل موقعیت و جهت آخرین دستگاه را در دستگاه مبنا نشان می‌دهد.

۲-۲ سینماتیک وارون

سینماتیک وارون بیانگر متغیرهای مفصلی بر حسب مختصات مجری نهایی ربات است. برای سینماتیک وارون الگوریتم مشخصی ارائه نشده است و با استفاده از روابط هندسی و مثلثاتی و پیکربندی ربات بطور خاص بررسی می‌شود. همچنین در [۲۷] با استفاده از شبکه عصبی سینماتیک وارون ربات بررسی شده است.

۳-۲ ماتریس ژاکوبین

هنگامی که ربات حرکت می‌کند، متغیرهای مفصلی و موقعیت و جهت مجری نهایی تابعی از زمان است. ماتریس ژاکوبین بخوبی ارتباط بین سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای مجری نهایی با متغیرهای مفصلی را نشان می‌دهد. رابطه سرعت در فضای مفصلی و سرعت در فضای کار بصورت زیر است:

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (16-2)$$

در رابطه (۱۶-۲) \dot{X} ، $J(q)$ و \dot{q} به ترتیب بردار مختصات نقطه انتهایی ربات، ماتریس ژاکوبین و بردار موقعیت مفاصل ربات است. روابط بدست آوردن ژاکوبین بصورت زیر خلاصه می‌شود [۳]:

محاسبه ماتریس ژاکوبین برای مفاصل کشویی:

$$J_i = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۱۷-۲)$$

محاسبه ماتریس ژاکوبین برای مفاصل لولایی:

$$J_i = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (o_n - o_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (۱۸-۲)$$

۴-۲ مدل‌سازی دینامیکی

برای بدست آوردن مدل دینامیکی ربات انرژی جنبشی و پتانسیل ربات را محاسبه می‌کنیم. سپس لاگرانژین سیستم را تشکیل می‌دهیم. آنگاه با استفاده از معادلات اویلر لاگرانژ معادله دینامیکی ربات بدست می‌آوریم [۳].

۱-۴-۲ انرژی جنبشی

انرژی جنبشی ربات از مجموع انرژی‌های جنبشی رابط‌های آن بدست می‌آیند و انرژی جنبشی هر رابط از مجموع انرژی‌های جنبشی تمام نقاط آن بدست می‌آید. می‌توان نشان داد که انرژی جنبشی یک ربات با n رابط از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T \left(\sum_{i=1}^n (m_i J_v^T J_v + J_\omega^T R_i I_i R_i^T J_\omega) \right) \dot{q} \quad (۱۹-۲)$$

J_v و J_ω از روابط (۱۷-۲) و (۱۸-۲) با توجه به نوع مفصل i ام محاسبه می‌شوند و R_i ماتریس دوران دستگاه مختصات i ام در دستگاه مبنا می‌باشد. m_i جرم رابط i ام است. در رابطه بالا I_i تانسور لختی می‌باشد که بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\int \begin{bmatrix} -(p_z^2 + p_y^2) & p_x p_y & p_x p_z \\ p_x p_y & -(p_x^2 + p_z^2) & p_x p_y \\ p_x p_z & p_x p_y & -(p_x^2 + p_y^2) \end{bmatrix} dm \quad (20-2)$$

اگر تعریف کنیم:

$$D(q) = \left(\sum_{i=1}^n (m_i J_v^T J_v + J_\omega^T R_i I_i R_i^T J_\omega) \right) \quad (21-2)$$

خواهیم داشت:

$$K = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (22-2)$$

$D(q)$ ماتریس اینرسی ربات نام دارد.

۲-۴-۲ انرژی پتانسیل

انرژی پتانسیل گرانشی ربات با قرار دادن مبدا دستگاه مختصات رابط در مرکز جرم آن و استفاده از رابطه نیروی گرانشی بصورت زیر محاسبه می‌شود. r_{c_i} مختصات مرکز جرم می‌باشد.

$$P = g^T r_{c_i} m_i \quad (23-2)$$

$$P = g^T \left(\sum_{i=1}^n (m_i d_0^{c_i}) \right) \quad (24-2)$$

$$g^T = [0 \quad 0 \quad 9.81] \quad (25-2)$$

۲-۴-۳ لاگرانژین

لاگرانژین بصورت اختلاف انرژی جنبشی و پتانسیل تعریف می‌شود. داریم:

$$L = K - P \quad (۲۶-۲)$$

$$L = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} - P \quad (۲۷-۲)$$

۲-۴-۴ معادله اویلر - لاگرانژ

معادله دینامیکی ربات با قرار دادن لاگرانژین از رابطه (۲۷-۲) در معادله اویلر - لاگرانژ که بصورت زیر تعریف می‌شود بدست می‌آید.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (۲۸-۲)$$

با جایگذاری لاگرانژین در رابطه فوق و انجام محاسبات لازم، معادلات دینامیکی ربات بصورت زیر بدست می‌آید:

$$D(q)\ddot{q} + \dot{D}(q)\dot{q} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q} (\dot{q}^T D(q) \dot{q}) + \frac{\partial}{\partial q} P = \tau \quad (۲۹-۲)$$

رابطه بالا را می‌توان بصورت زیر ساده نمود:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (۳۰-۲)$$

در رابطه (۳۰-۲) $q \in R^n$ بردار موقعیت مفاصل، $D(q) \in R^{n \times n}$ ماتریس اینرسی بازو، $C(q, \dot{q}) \in R^n$ بردار گشتاورهای گریز از مرکز و کریولیس، $G(q) \in R^n$ بردار گشتاورهای گرانشی و در نهایت $\tau \in R^n$ بردار گشتاورهای ورودی می‌باشد.

۵-۲ مدل‌سازی ربات اسکارا

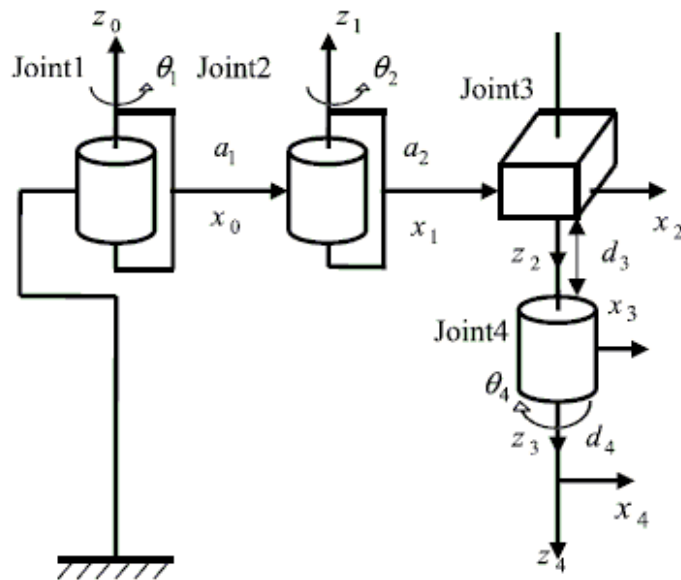
برای مدل‌سازی طبق دستور دناویت هارتنبرگ و قرار دادن دستگاه مختصات مطابق دستوالعمل

مذکور شکل (۳-۲) جدول دناویت هارتنبرگ را بصورت زیر تشکیل می‌دهیم:

جدول ۱-۲: پارامترهای دناویت هارتنبرگ ربات اسکارا

رابط	θ_i	d_i	a_i	α_i
۱	θ_1	•	$a_1 = 0.621$	•
۲	θ_2	•	$a_2 = 1.064$	α_2
۳	•	d_3	•	•
۴	θ_4	$d_4 = 0.05$	•	•

متغیرهای مفصلی θ_1 ، θ_2 و d_3 هستند و رابط چهارم به رابط سوم قفل شده است.



شکل ۳-۲: پیگردندی ربات اسکارا [۲۰]

در قدم بعد ماتریس ژاکوبین را با استفاده از روابط (۱۷-۲) و (۱۸-۲) بدست می‌آوریم:

$$J(q) = \begin{bmatrix} -a_1 \sin(\theta_1) - a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ a_1 \cos(\theta_1) + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31-2)$$

جدول پارامترهای ربات اسکارا بصورت زیر است:

جدول ۲-۲: پارامترهای ربات اسکارا

رابط	x_i	y_i	z_i	m_i	I_{xxi}	I_{yyi}	I_{zz_i}	I_{xyi}	I_{xzi}	I_{yzi}
۱	-۰.۳۸۰۳	-۰.۰۰۰۱۴	-۰.۱۴۴۶	۹۵.۲۳۱۵	۱.۶۲۱۶	۷.۳۱۰۷	۷.۶۰۰۶	۰.۰۲۷	-۰.۰۰۲۶	۰.۰۰۰۱
۲	-۰.۶۷۳۹	۰.۰۰۱۱	-۰.۱۹۵۶	۱۵۸.۰۸۶۶	۳.۷۴۵۲	۲۲.۶۴۳۶	۲۱.۶۸۲۵	۰.۰۱۴	۲۰.۹۹۶	-۰.۰۰۱۵
۳	۰	۰	-۰.۵۴۰۳	۱۶.۶۱۷۱	۱.۶۳۳۹	۱.۶۳۳۹	۰.۰۴۰۷	۰	-۰.۰۰۰۴	۰
۴	۰	۰	-۰.۰۲۵	۰.۱۰۶	۰.۰۰۰۳	۰.۰۰۰۲۶۴	۰.۰۰۰۴۸۳۸	۰	۰	۰

در جدول (۲-۲) بردار $[x_i \ y_i \ z_i]$ ، m_i و I_i به ترتیب بردار مرکز جرم بر حسب متر، جرم بر حسب کیلوگرم و تانسور لختی بر حسب کیلوگرم متر مربع رابط i ام هستند. در قدم بعد انرژی جنبشی و پتانسیل را با استفاده از روابط (۲-۱۹) و (۲-۲۳) محاسبه می‌شوند و در نهایت با استفاده از رابطه (۲-۲۸) ماتریس‌های $D(q)$ و $C(q, \dot{q})$ و بردار $G(q)$ بصورت زیر حاصل می‌شود:

$$D(q) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \quad (32-2)$$

که در رابطه (۲-۳۲):

$$D_{11} = I_{zz1} + I_{zz2} + I_{zz3} + I_{zz4} + m_1(a_1 + x_{c1})^2 + m_2[(a_2 + x_{c2})^2 + a_1^2] + (m_3 + m_4)(a_1^2 + a_2^2) + \cos(\theta_2)[2a_1m_2(a_2 + x_{c2}) + 2a_1a_2(m_3 + m_4)]$$

$$D_{22} = I_{zz2} + I_{zz3} + I_{zz4} + m_2(a_2 + x_{c2})^2 + a_2^2(m_3 + m_4)$$

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

$$D_{12} = D_{21} = I_{zz2} + I_{zz3} + I_{zz4} + m_2(a_2 + x_{c2})^2 + a_2^2(m_3 + m_4) + \cos(\theta_2)[a_1 m_2(a_2 + x_{c2}) + a_1 a_2(m_3 + m_4)]$$

$$D_{13} = D_{31} = D_{23} = D_{32} = D_{34} = D_{43} = 0$$

$$D_{14} = D_{41} = D_{42} = D_{24} = -I_{zz4}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \quad (۳۳-۲)$$

که در رابطه (۳۳-۲):

$$C_{11} = -[a_1 m_2(a_2 + x_{c2}) + a_1 a_2(m_3 + m_4)] \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2$$

$$C_{12} = -[a_1 m_2(a_2 + x_{c2}) + a_1 a_2(m_3 + m_4)] \sin(\theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)$$

$$C_{21} = [a_1 m_2(a_2 + x_{c2}) + a_1 a_2(m_3 + m_4)] \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1$$

$$C_{13} = C_{14} = C_{22} = C_{23} = C_{24} = C_{31} = C_{32} = C_{33} = C_{34} = C_{41} = C_{42} = C_{43} = C_{44} = 0$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \end{bmatrix} \quad (۳۴-۲)$$

که ۲ در رابطه (۲-۳۴):

$$G_1 = G_2 = G_4 = 0$$

$$G_3 = -9.81(m_3 + m_4)$$

با توجه به اینکه مفصل چهارم به مفصل سوم قفل شده است، ماتریس های $D(q)$ ، $C(q, \dot{q})$ و

$G(q)$ بصورت زیر تعریف می شوند:

$$D(q) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \quad (۲-۳۵)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (۲-۳۶)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad (۲-۳۷)$$

از روابط (۲-۳۵)، (۲-۳۶) و (۲-۳۷) جهت شبیه سازی در فصل های سوم و چهارم و پنجم استفاده می شود.

فصل ۳

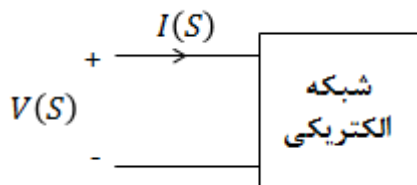
کنترل امپدانس مرسوم

همانطور که در فصل اول بیان شد کنترل امپدانس ، بین نیرو و موقعیت یک رابطه دینامیکی ایجاد می کند. در این فصل کنترل امپدانس مرسوم بررسی می شود. ابتدا مفاهیم پایه امپدانس بررسی می شود، سپس مدل سازی محیط را بیان می شود و در ادامه طراحی کنترل کننده با رویکرد کنترل گشتاور ارائه می شود. در نهایت نتایج شبیه سازی بر روی مدل ربات اسکارا نشان داده می شود.

۳-۱ مفهوم امپدانس

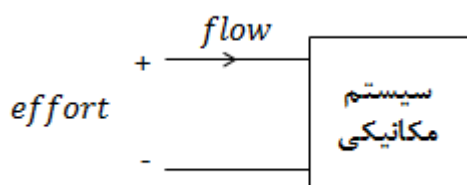
در تحلیل مدارهای الکتریکی امپدانس نگاشتی است از فضای جریان به فضای ولتاژ، که میزان مقاومت شبکه الکتریکی را در برابر جریان عبوری از خود نشان می دهد و بصورت نسبت تبدیل لاپلاس ولتاژ به تبدیل لاپلاس جریان در رابطه (۳-۱) تعریف می شود. شکل (۳-۱) نمایش شبکه ای از امپدانس الکتریکی را نشان می دهد. توجه داریم که در اینجا المان های الکتریکی بکار رفته در شبکه بصورت خطی و تغییرناپذیر با زمان هستند.

$$Z(s) = \frac{V(s)}{I(s)} \quad (1-3)$$



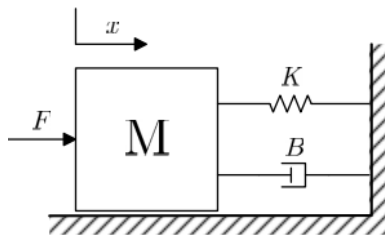
شکل ۱-۳: نمایش شبکه‌ای امیدانس الکتریکی

مانند آنچه در یک شبکه الکتریکی تعریف می‌شود، می‌توان مفهوم امیدانس را برای سیستم‌های مکانیکی تعمیم داد. در یک سیستم مکانیکی با فرض خطی و تغییرناپذیر با زمان بودن روابط المان-های مکانیکی می‌توان رفتار سیستم را بصورت تابعی از دو متغیر جریان و تلاش نشان داد [۲]. شکل (۲-۳) معادل شبکه الکتریکی نشان داده شده در شکل (۱-۳) را برای یک سیستم مکانیکی نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: نمایش معادل شبکه‌ای برای سیستم مکانیکی

در شکل (۲-۳) امیدانس مکانیکی نگاشته است از فضای جریان به فضای تلاش که میزان مقاومت سیستم مکانیکی را در برابر جریان ورودی نشان می‌دهد. برای مشخص‌تر شدن مفهوم امیدانس مکانیکی سیستم جرم-فنر-دمپر شکل (۳-۳) را در نظر می‌گیریم:



شکل ۳-۳: سیستم جرم-فنر-دمپر

معادلات حاکم بر سیستم شکل (۳-۳) بصورت رابطه (۲-۳) می باشد.

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F \quad (۲-۳)$$

از طرفین رابطه (۲-۳) تبدیل لاپلاس می گیریم:

$$SX(S) \left(MS + B + \frac{K}{S} \right) = F(S) \quad (۳-۳)$$

با توجه به رابطه (۳-۳) امپدانس مکانیکی را می توان بصورت رابطه (۴-۳) تعریف نمود:

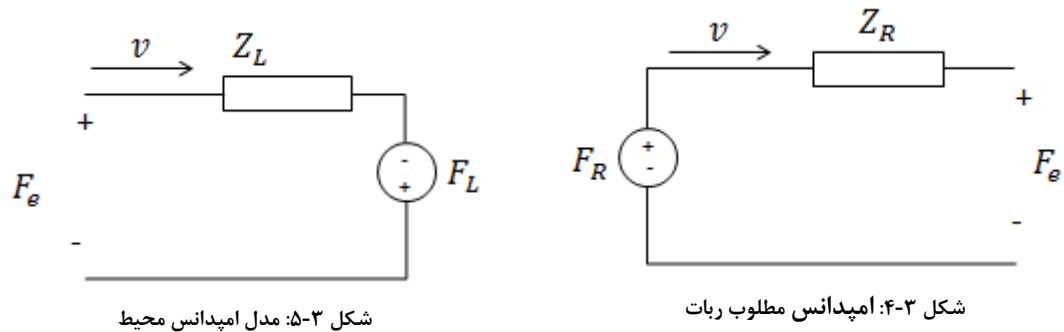
$$\frac{F(S)}{SX(S)} = MS + B + \frac{K}{S} \quad (۴-۳)$$

در رابطه (۴-۳) امپدانس مکانیکی نسبت تبدیل لاپلاس نیرو (متغیر تلاش) به تبدیل لاپلاس سرعت (متغیر جریان) می باشد. بنابراین همانطور که قبلا نیز گفته شد می توان برای یک سیستم مکانیکی همانند یک سیستم الکتریکی امپدانس مکانیکی تعریف نمود.

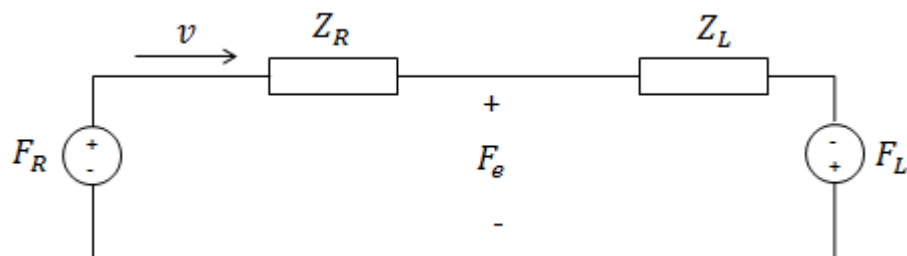
۲-۳ بکارگیری کنترل امپدانس

معادلات دینامیکی ربات غیرخطی، چندمتغیره و همراه با تزویج است. در کنترل امپدانس آنچه اهمیت دارد کنترل موقعیت و نیروی نقطه انتهایی ربات در فضای کارترین است. بنابراین لازم است که معادلات دینامیکی ربات از فضای مفصلی به فضای کار منتقل شود سپس با اعمال قانون کنترل

مناسب دینامیک‌های غیرخطی و چندمتغیره ربات تبدیل به معادلات دکوپله و خطی شود. با توجه به قضایای تونن و نورتن و با فرض خطی بودن رفتار محیط، مدل ربات و مدل محیط را می‌توان بصورت اشکال (۴-۳) و (۵-۳) توصیف کرد [۹].



در شکل (۴-۳) به ترتیب معادل امپدانس و تلاش مکانیکی ربات است، بنابراین معادل تونن ربات بصورت منبع تلاش سری با امپدانس مکانیکی است. همچنین بطور مشابه F_L و Z_L در شکل (۵-۳) به ترتیب بیانگر امپدانس و تلاش مکانیکی محیط است و معادل تونن بصورت امپدانس مکانیکی سری شده با منبع تلاش است. متغیر v در شکل‌های (۴-۳) و (۵-۳) سرعت نقطه انتهایی ربات است. همچنین F_e بیانگر نیرویی تماسی بین ربات و محیط است هنگامی که ربات در تعامل با محیط قرار می‌گیرد. در شرایطی که تعامل بین نقطه انتهایی ربات و محیط برقرار می‌شود مطابق شکل (۶-۳) می‌توان نوشت:



شکل ۶-۳: تعامل ربات با محیط

$$F_e = vZ_L - F_L \quad (۵-۳)$$

$$F_e = F_R - Z_R V \quad (6-3)$$

با حذف F_e از روابط (5-3) و (6-3) داریم:

$$V = \frac{F_R + F_L}{Z_L + Z_R} \quad (7-3)$$

F_R در رابطه (7-3) نقش مهمی ایفا می‌کند، با فرض اینکه قانون کنترل F_R بصورت زیر تعریف شود:

$$F_R = Z_R V_d \quad (8-3)$$

که V_d سرعت مطلوب نقطه انتهایی ربات است. با جایگذاری رابطه (8-3) در رابطه (6-3) خواهیم داشت:

$$Z_R (V_d - V) = F_e \quad (9-3)$$

رابطه (9-3) بیانگر سیستم کنترل حلقه بسته پس از اعمال قانون کنترل (8-3) است. اگر ربات با محیط در تعامل نباشد $F_e = 0$ است، بنابراین با انتخاب مناسب Z_R پایداری مجانبی سیستم کنترل تضمین می‌شود همچنین اگر ربات در تعامل با محیط باشد $F_e \neq 0$ است و در این حالت پایداری از نوع ورودی کراندار و خروجی کراندار حاصل می‌شود. در کنترل امپدانس هدف رساندن دینامیک‌های غیرخطی ربات به دینامیک خطی مطلوب $Z_R (V_d - V) = F_e$ است، تا ربات در تعامل با محیط رفتار مناسب از خود نشان دهد.

۳-۳ مدل‌سازی محیط

هدف از مدل‌سازی محیط تعیین رفتار فرکانس پایین امپدانس آن است. دانش تقریبی از امپدانس محیط که ربات در آن وظیفه مشخصی را انجام می‌دهد، به طراحی قانون کنترل دقیق‌تری برای

سیستم منجر می‌شود. محیط‌های مختلف در حالت کلی به دو صورت فعال و غیرفعال دسته‌بندی می‌شوند. اگر محیط مولد نیرو یا جابجایی باشد از نوع فعال است و در مدل‌سازی بصورت یک منبع جریان موازی با امپدانس محیط یا بصورت یک منبع تلاش سری با امپدانس محیط مدل می‌شود. محیط‌های غیرفعال مولد نیرو یا جابجایی نیستند و برای مدل کردن آن‌ها تنها امپدانس محیط کافی است. در این پایان‌نامه محیط‌های غیر فعال مد نظر هستند. همچنین جنس محیط را سخت در نظر می‌گیریم که می‌تواند بصورت یک فنر با ضریب سختی بالا مدل شود.

۳-۴ کنترل‌کننده امپدانس با راهبرد کنترل گشتاور

در روش کنترل امپدانس در حوزه گشتاور دو حلقه داخلی و خارجی ایجاد می‌شود. حلقه داخلی وظیفه حذف تمامی دینامیک‌های غیرخطی بازوی ربات را بر عهده دارد و حلقه خارجی نیز وظیفه تعیین ورودی مناسب برای حلقه داخلی از جنس شتاب را بر عهده دارد. یک بازوی ماهر رباتیک با n رابط و مفاصل صلب در تماس با محیط با رابطه ریاضی زیر بیان می‌شود:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + J^T(q)F_e = \tau \quad (10-3)$$

در رابطه بالا $q \in R^n$ بردار موقعیت مفاصل ربات، $D(q) \in R^{m \times n}$ ماتریس اینرسی ربات، $C(q, \dot{q})\dot{q} \in R^n$ بردار گشتاورهای کوریولیس و گریز از مرکز، $G(q)$ بردار گشتاور ثقلی، $\tau \in R^n$ بردار گشتاور ورودی ربات، $F_e \in R^m$ بردار نیروهای تعاملی ربات با محیط و $J(q) \in R^{m \times n}$ ماتریس ژاکوبین ربات است که فضای مفصلی را به فضای کار منتقل می‌کند. روش کنترل امپدانس در فضای کار محقق می‌شود بنابراین ابتدا معادلات را از فضای مفصلی به فضای کار منتقل می‌کنیم:

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (11-3)$$

در رابطه بالا \dot{X} بردار سرعت مجری نهایی ربات است. از رابطه (۳-۱۱) نسبت به زمان مشتق می-گیریم:

$$\ddot{X} = \dot{J}(q)\dot{q} + J(q)\ddot{q} \quad (۳-۱۲)$$

$$\ddot{q} = J^{-1}(q)(\ddot{X} - \dot{J}(q)\dot{q}) \quad (۳-۱۳)$$

با توجه به رابطه بالا برای انتقال از فضای مفصلی به فضای کار محاسبه $J^{-1}(q)$ نیاز است. در ارتباط با $J^{-1}(q)$ به دو نکته زیر باید توجه داشت:

نکته اول: $J(q)$ باید همواره ناتکین باشد. برای حل این مسئله مسیر مطلوب در فضای کار بگونه‌ای طراحی می‌شود که حالت تکین در ماتریس ژاکوبین اتفاق نیفتد.

نکته دوم: با توجه به ابعاد ماتریس ژاکوبین در حالت کلی بصورت $m \times n$ اگر $m \neq n$ باشد به جای محاسبه $J^{-1}(q)$ از ماتریس معکوس مجازی استفاده می‌کنیم [۲۸]، که بصورت زیر بیان می‌شود:

$$J^* = (J^T(q)J(q))^{-1} J^T(q) \quad (۳-۱۴)$$

با جایگذاری رابطه (۳-۱۳) در رابطه (۳-۱۰) معادلات فضای کار ربات بصورت زیر بدست می‌آید:

$$D(q)J^{-1}(q)(\ddot{X} - \dot{J}\dot{q}) + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + J^T(q)F_e = \tau \quad (۳-۱۵)$$

$$D(q)J^{-1}(q)\ddot{X} + h(q, \dot{q}) + J^T(q)F_e = \tau \quad (۳-۱۶)$$

که $h(q, \dot{q})$ بصورت زیر است:

$$h(q, \dot{q}) = -D(q)J^{-1}(q)\dot{J}(q)\dot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (۳-۱۷)$$

امپدانس مطلوب مجری نهایی ربات در تعامل با محیط را بصورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$M_d(\ddot{X} - \ddot{X}_d) + B_d(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_d(X - X_d) = -F_e \quad (18-3)$$

در رابطه بالا X_d ، \dot{X}_d و \ddot{X}_d بترتیب بردار موقعیت، سرعت و شتاب مطلوب مجری انتهایی است. M_d ، B_d و K_d پارامترهای امپدانس مطلوب هستند و دارای ابعاد مربعی از مرتبه m می‌باشند. از رابطه (18-3) داریم:

$$\ddot{X} = M_d^{-1}(-B_d(\dot{X} - \dot{X}_d) - K_d(X - X_d) - F_e + M_d\ddot{X}_d) \quad (19-3)$$

با جایگذاری رابطه (19-3) در رابطه (16-3) قانون کنترل امپدانس بصورت زیر بدست می‌آید:

$$D(q)J^{-1}(q)M_d^{-1}(-B_d(\dot{X} - \dot{X}_d) - K_d(X - X_d) - F_e + M_d\ddot{X}_d) + h(q, \dot{q}) + J^T(q)F_e = \tau \quad (20-3)$$

قانون کنترل (20-3) نیازمند فیدبک‌هایی از موقعیت X ، سرعت مجری نهایی \dot{X} ، نیروی تماسی بین مجری نهایی و محیط F_e ، موقعیت مفاصل q و سرعت مفاصل \dot{q} است. علاوه بر این قانون کنترل نیازمند مدل دقیقی از دینامیک بازوی ربات می‌باشد. با توجه به رابطه (20-3) پیچیدگی قانون کنترل قابل مشاهده است.

۳-۵ شبیه‌سازی

شبیه‌سازی به این صورت است که ربات در فضای آزاد حرکت خود را بر طبق مسیر مطلوب موقعیت آغاز و دنبال نماید. سپس با برخورد به محیط در راستای z امپدانس مطلوب بین ربات و محیط برقرار می‌شود.

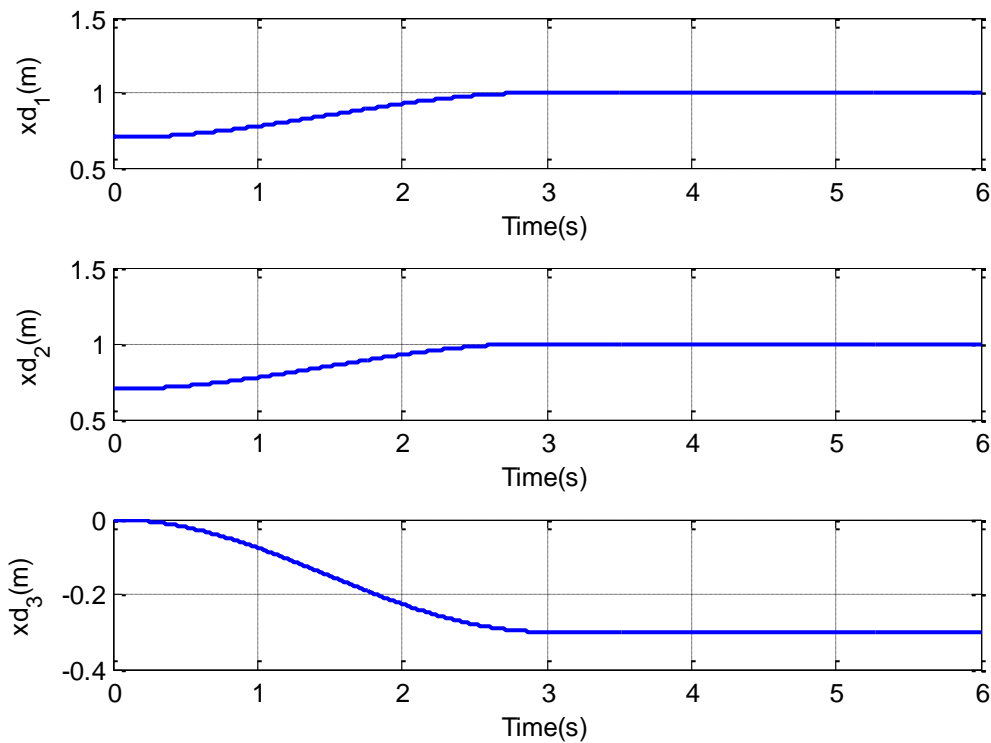
پارامترهای دناویت- هارتنبرگ و دینامیک ربات اسکارا در جدول‌های ۲-۱ و ۲-۲ ارائه گردیده است. همچنین دیاگرام ربات در شکل (۳-۲) قرار دارد. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب در مدت شش ثانیه انجام شده است. در شبیه‌سازی از سه رابط اول برای تحقق امپدانس مطلوب استفاده شده

است و رابط چهارم به رابط سوم قفل شده است. بردار موقعیت مطلوب $X_d = [x_{d1} \quad x_{d2} \quad x_{d3}]$ مانند آنچه در شکل (۷-۳) نشان داده شده است بصورت زیر است:

$$x_{d1} = \begin{cases} 0.85 - 0.15 \cos\left(\frac{\pi t}{3}\right) & 0 \leq t \leq 3 \\ 1 & 3 < t \leq 6 \end{cases} \quad (۲۱-۳)$$

$$x_{d2} = x_{d1} \quad (۲۲-۳)$$

$$x_{d3} = \begin{cases} -0.15 + 0.15 \cos\left(\frac{\pi t}{3}\right) & 0 \leq t \leq 3 \\ -0.3 & 3 < t \leq 6 \end{cases} \quad (۲۳-۳)$$



شکل ۷-۳: مسیر مطلوب در فضای کار

مدل محیط بصورت فنر خطی با سختی $k_{e3} = 150000 \frac{N}{m}$ در راستای z در نظر گرفته می‌شود.

$$F_{e3} = k_{e3}(x_3 - x_{e3}) \quad (۲۴-۳)$$

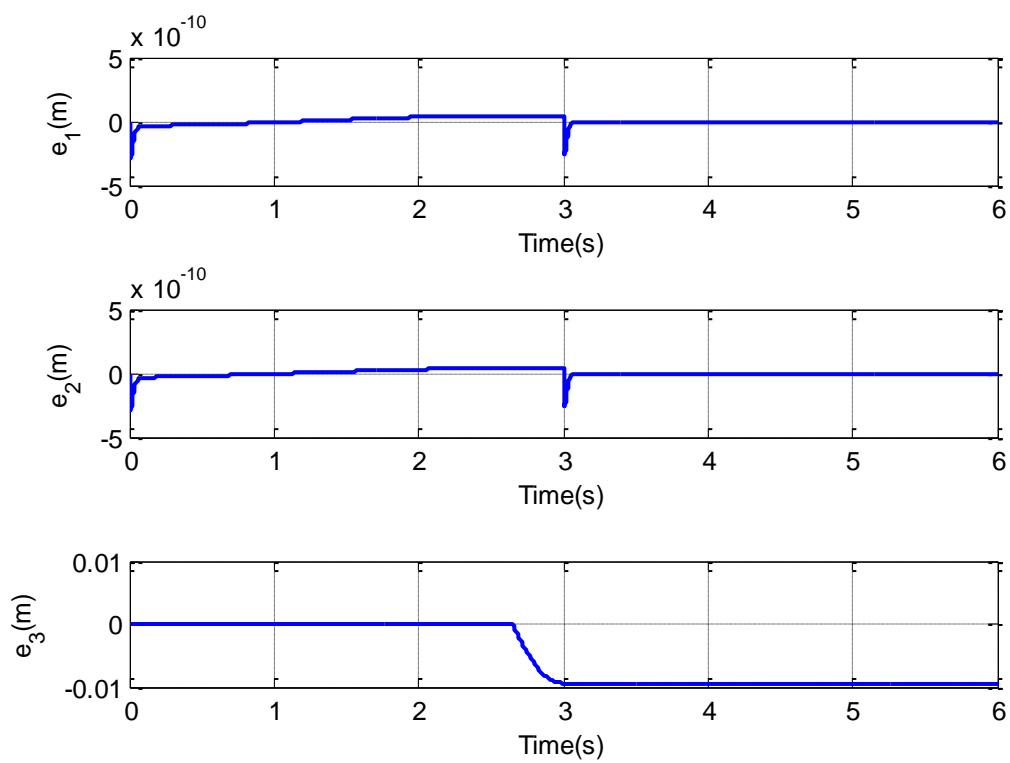
x_{e3} مختصات نقطه برخورد در راستای z است که برابر با $x_{e3} = -0.29m$ قرار می‌دهیم. پارامترهای

و

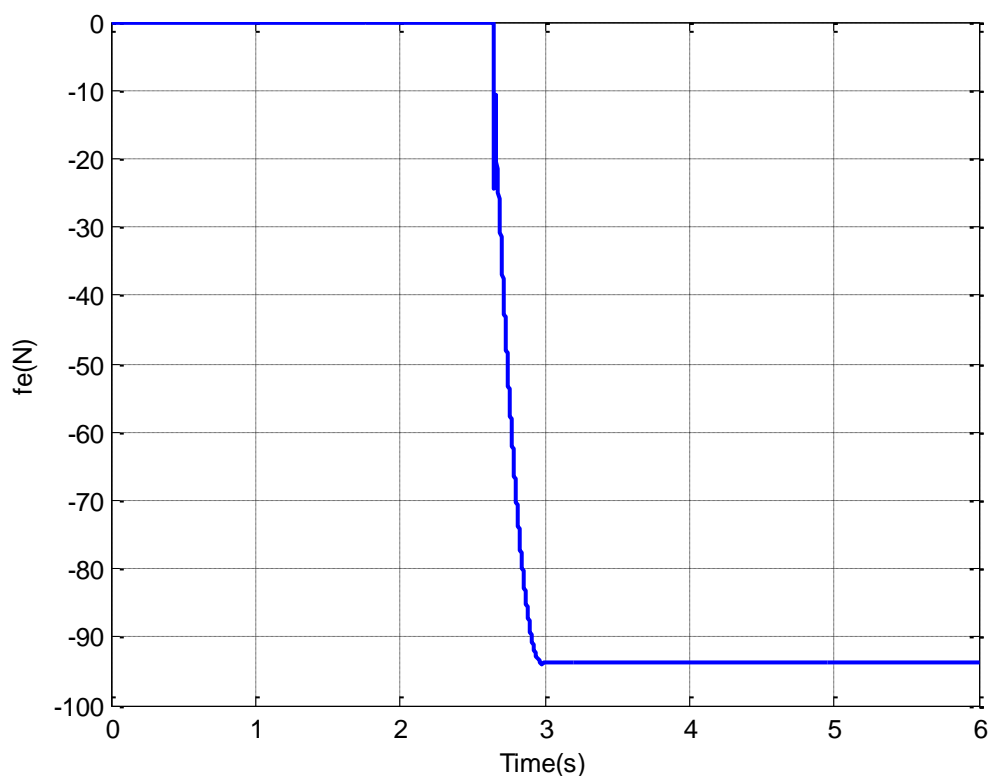
$$B_d = \begin{bmatrix} 200 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 200 \end{bmatrix}, \quad M_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

امپدانس مطلوب بصورت

$$K_d = \begin{bmatrix} 10000 & 0 & 0 \\ 0 & 10000 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 \end{bmatrix} \text{ هستند.}$$

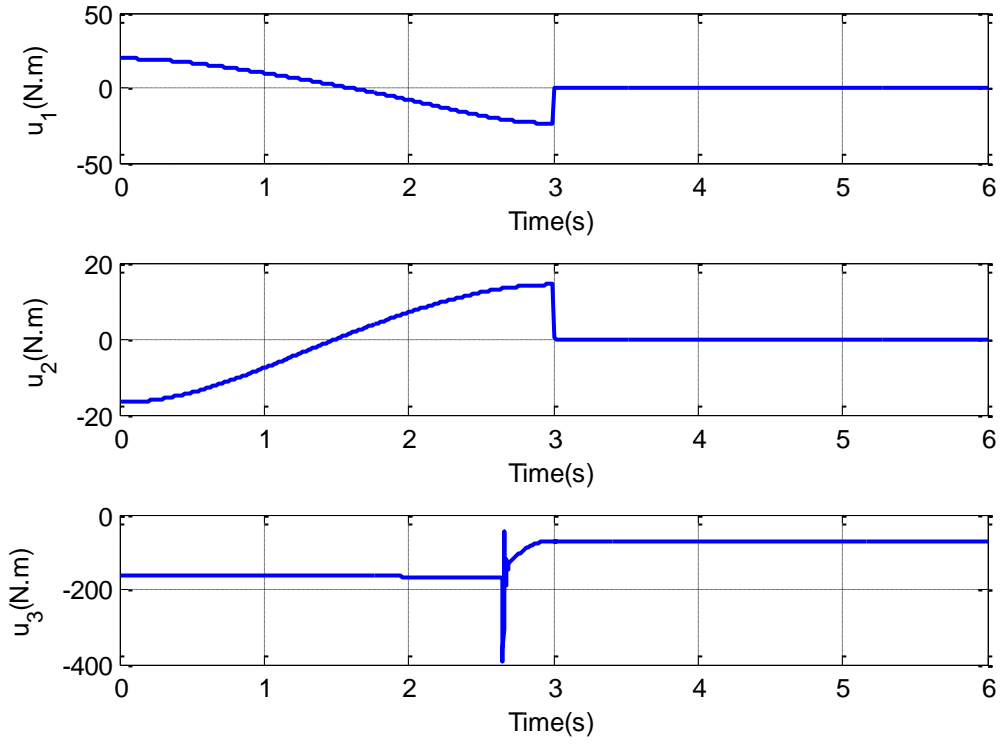


شکل ۳-۸: خطای ردیابی موقعیت مطلوب در فضای کار



شکل ۳-۹: نیروی تماسی بین ربات و محیط

شکل (۳-۸) عملکرد قانون کنترل در ردیابی موقعیت در فضای کار را نشان می‌دهد. پس از تماس ربات با محیط در راستای z خطای محسوسی در ردیابی موقعیت مطلوب مشاهده می‌شود. شکل (۳-۹) نیروی تماسی بین ربات و محیط در راستای z را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۳-۷) و (۳-۸) می‌توان نتیجه گرفت که تا هنگامی که ربات بصورت آزاد در محیط حرکت می‌کند ردیابی مجانبی موقعیت انجام می‌شود و هنگامی که در تعامل با محیط قرار می‌گیرد می‌توان با کنترل امپدانس بین نیرو و موقعیت تعادل برقرار نمود. شکل (۳-۱۰) گشتاور اعمالی به مفاصل ربات را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان فهمید که گشتاور اعمالی محدود و قابل اعمال و پیاده‌سازی است.



شکل ۳-۱۰: گشتاور اعمالی به مفاصل ربات

فصل ۴

کنترل امپدانس ترکیبی

روش کنترل امپدانس ترکیبی با در نظر گرفتن امپدانس محیط تنظیم دقیق نیرو محقق می‌شود. در این روش هر راستای فضای کار به زیرمجموعه‌های مجزا تقسیم می‌شود. در هر زیرفضا با توجه به اهداف کنترلی (کنترل نیرو یا کنترل موقعیت) قانون کنترل مطلوب را به ربات وارد می‌کند. برای اجرای کنترل امپدانس ترکیبی دو حلقه کنترل داخلی و خارجی برای حذف دینامیک‌های ربات و ایجاد ورودی مناسب از جنس شتاب بر اساس اهداف کنترلی نیاز است. در این فصل ابتدا اصل دوگانی در امپدانس ربات و محیط را بیان می‌کنیم و بر اساس آن کنترل دقیق نیرو و موقعیت را در محیط‌های مختلف بررسی می‌کنیم.

۴-۱ اصل دوگانی

در حالت کلی می‌توان امپدانس محیط را بصورت زیر در نظر گرفت:

$$Z(\omega) = R(\omega) + jX(\omega) \quad (4-1)$$

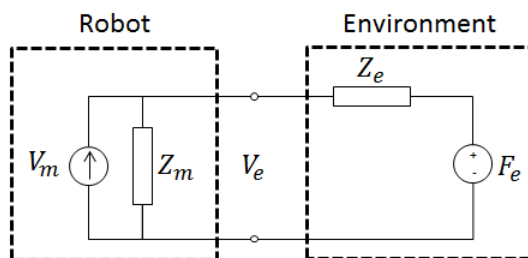
با توجه به رابطه (۴-۱) و با در نظر گرفتن اندازه امپدانس در فرکانس صفر سه نوع امپدانس مطابق زیر معرفی می‌شود [۹].

✓ اگر اندازه امپدانس در فرکانس صفر برابر صفر باشد، امپدانس از نوع جرمی است.
 $(Z(0) = 0)$

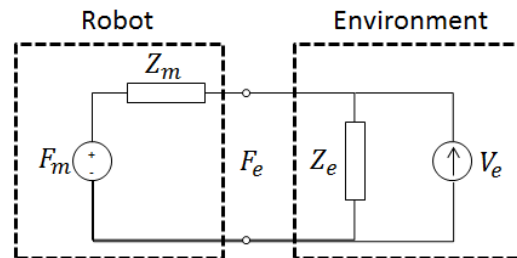
✓ اگر اندازه امپدانس در فرکانس صفر محدود و مخالف صفر باشد، امپدانس از نوع مقاومتی است.
 $(Z(0) = c, 0 < c < \infty)$

✓ اگر اندازه امپدانس در فرکانس صفر بی‌نهایت باشد، امپدانس از نوع خازنی است.
 $(Z(0) = \infty)$

اصل دوگانی بیان می‌کند که امپدانس‌های خازنی و جرمی دوگان یکدیگر هستند [۹]. اگر امپدانس ربات بصورت دوگان امپدانس محیط باشد با توجه به نوع امپدانس محیط می‌توان نیرو یا سرعت نقطه انتهایی ربات را در تعامل با محیط تنظیم نمود. هنگامی که محیط خازنی است، محیط می‌تواند بصورت یک امپدانس موازی با منبع جریان مدل شود و ربات بصورت دوگان آن یعنی یک امپدانس سری با منبع تلاش مدل شود، در این حالت مانند شکل (۴-۱) می‌توان نیروی نقطه انتهایی ربات را تنظیم نمود. اگر امپدانس محیط بصورت جرمی باشد، محیط با یک منبع تلاش سری با امپدانس مدل می‌شود و ربات بصورت دوگان آن یعنی یک امپدانس موازی با منبع جریان قرار می‌گیرد، در این حالت مانند شکل (۴-۲) می‌توان سرعت نقطه انتهایی ربات را در تعامل با محیط تنظیم نمود.



شکل ۴-۲: محیط جرمی و ربات خازنی



شکل ۴-۱: محیط خازنی و ربات جرمی

۱-۱-۴ تنظیم نیرو در محیط خازنی

محیط با امپدانس خازنی و ربات با امپدانس جرمی که مطابق شکل (۱-۴) در تعامل با یکدیگر هستند

را در نظر می‌گیریم. با فرض اینکه $V_e = 0$ می‌توان نوشت [۹]:

$$F_e = \frac{Z_e}{Z_e + Z_m} F_m \quad (۲-۴)$$

با فرض اینکه F_m تابع پله با دامنه f_m باشد، خواهیم داشت:

$$F_e = \frac{Z_e}{Z_e + Z_m} \frac{f_m}{S} \quad (۳-۴)$$

با استفاده از قضیه مقدار نهایی و با توجه به رابطه (۳-۴) داریم:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F_e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s F_e(S) = \frac{Z_e(0)}{Z_e(0) + Z_m(0)} f_m \quad (۴-۴)$$

با توجه به خازنی بودن امپدانس محیط و جرمی بودن امپدانس ربات، رابطه (۴-۴) بصورت

$F_e(\infty) = f_m$ حاصل می‌شود. بدین ترتیب تنظیم نیرو انجام می‌شود.

۲-۱-۴ تنظیم سرعت در محیط جرمی

مانند حالت قبل شکل (۲-۴) را در نظر می‌گیریم، در این حالت محیط از جنس امپدانس جرمی و

ربات از جنس امپدانس خازنی است، با فرض $F_e = 0$ داریم [۹]:

$$V_e = \frac{Z_m}{Z_m + Z_e} V_m \quad (۵-۴)$$

با فرض ثابت بودن V_m با دامنه v_m خواهیم داشت:

$$V_e = \frac{Z_m}{Z_m + Z_e} \frac{v_m}{S} \quad (6-4)$$

با استفاده از قضیه مقدار نهایی و با توجه به رابطه (۶-۴) داریم:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V_e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sV_e(S) = \frac{Z_m(0)}{Z_e(0) + Z_m(0)} v_m \quad (7-4)$$

با توجه به جرمی بودن امیدانس محیط و خازنی بودن امیدانس ربات و با توجه به رابطه (۷-۴) می-توان نتیجه گرفت در حالت ماندگار $V_e(\infty) = v_m$ و تنظیم سرعت نقطه انتهایی ربات انجام شده است.

۴-۲ حلقه کنترل خارجی

در حلقه کنترل خارجی مسیرهای مطلوب از جنس موقعیت و نیرو به عنوان ورودی دریافت می‌شوند و به عنوان خروجی در اختیار حلقه داخلی قرار می‌گیرند. برای حلقه خارجی سه وضعیت مختلف وجود دارد. وضعیت اول مربوط به زمانی است که ربات بطور آزادانه در حرکت است و مسیر مطلوب موقعیت را دنبال می‌کند. در این حالت حلقه کنترل خارجی از جنس کنترل موقعیت است و اگر ربات در مسیر مطلوب خود با هرگونه قیدی مواجه شود امیدانس مطلوب بین ربات و قید برقرار می‌شود. وضعیت دوم مربوط به زمانی است که ربات می‌خواهد نیروی مطلوب را به محیط وارد کند، در این وضعیت ربات در یک محیط مقید قرار دارد و متاثر از قیود موقعیت حرکت آزادانه در هر راستا ندارد. وضعیت سوم مربوط به انتقال از وضعیت اول به دوم و بالعکس است. در این حالت کنترل کننده از امیدانس به نیرو یا بالعکس تغییر وضعیت می‌دهد. به عبارت دیگر کلیدزنی بین الگوریتم‌های کنترل اتفاق می‌افتد.

۴-۲-۱ زیرفضای کنترل موقعیت

هدف کنترلی در این زیرفضا تحقق ردیابی مسیر مطلوب توسط ربات در فضای کار است [۹]. مطابق با شکل (۲-۴) هنگامی که ربات با محیط تماس ندارد امپدانس محیط از نوع جرمی است پس طبق اصل دوگانی برای تحقق ردیابی مسیر مطلوب، امپدانس ربات از نوع غیر جرمی در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر امپدانس ربات در فرکانس صفر، مخالف صفر است. امپدانس مطلوب را در زیرفضای کنترل موقعیت بصورت زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$Z_m(s) = M_d s + B_d + \frac{K_d}{s} \quad (۸-۴)$$

در رابطه فوق اگر تعداد مفاصل ربات برابر با n باشد در اینصورت M_d ، B_d و K_d به ترتیب ماتریس‌های قطری $R^{n \times n}$ اینرسی، میرایی و سختی مطلوب هستند. کنترل‌کننده به همراه ربات به عنوان یک سیستم یکپارچه باید در قالب امپدانس مطلوب در نقطه تماس ظاهر شود. با استفاده از تعریف امپدانس مکانیکی و با توجه به شکل (۲-۴)، زیر سیستم حلقه بسته کنترل موقعیت بصورت زیر حاصل می‌شود:

$$(M_d s^2 + B_d s + K_d)(x - x_d) = -f_e \quad (۹-۴)$$

هنگامی که ربات آزادانه در محیط حرکت می‌کند نیرویی از طرف محیط بر ربات وارد نمی‌شود بنابراین با شرط مثبت معین بودن ماتریس‌های M_d ، B_d و K_d پایداری نمایی مجانبی موقعیت مطلوب انجام می‌شود. معادله (۹-۴) در حوزه زمان بصورت زیر است:

$$M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + B_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + K_d(x - x_d) = -f_e \quad (۱۰-۴)$$

از رابطه (۱۰-۴) داریم:

$$a_p = \ddot{x} = M_d^{-1}(-f_e - B_d(\dot{x} - \dot{x}_d) - K_d(x - x_d)) + \ddot{x}_d \quad (11-4)$$

بنابراین شتاب مناسب برای حلقه داخلی در زیرفضای کنترل موقعیت بصورت رابطه (11-4) حاصل می‌شود.

۴-۲-۲ زیرفضای کنترل نیرو

هدف کنترل در این زیرفضا تحقق نیروی مطلوب در تماس با محیط است [۹]. جهت حصول به این هدف باید امپدانس مناسب را برای ربات بر اساس رفتار امپدانسی محیط بدست آوریم. همانطور که در فصل قبل بیان شد مدل محیط بصورت فنر خطی با سختی بالا در نظر گرفته می‌شود که دارای رفتار خازنی است. بنابراین مطابق شکل (4-1) برای تنظیم نیروی مطلوب، ربات به همراه کنترل-کننده باید رفتار غیر خازنی از خود نشان دهند. امپدانس مطلوب ربات را بصورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$Z_m(s) = M_d s + B_d \quad (12-4)$$

در رابطه بالا M_d و B_d به ترتیب ماتریس‌های مثبت و معین و قطری $R^{n \times n}$ اینرسی و میرایی در مدل امپدانس مطلوب هستند. با انتقال رابطه (12-4) به حوزه زمان و با توجه به شکل (4-1) خواهیم داشت:

$$f_m = M_d \ddot{x} + B_d \dot{x} + f_e = f_d \quad (13-4)$$

در رابطه (13-4) f_d نیروی مطلوب تماسی بین ربات و محیط است. از رابطه (13-4) داریم:

$$a_f = \ddot{x} = M_R^{-1}(f_d - f_e - B_d \dot{x}) \quad (14-4)$$

رابطه (14-4) بیانگر شتاب لازم برای حلقه داخلی در زیرفضای کنترل نیرو است.

۴-۲-۳ ماتریس انتخاب

در صورت تغییر در محیطی که ربات در آن قرار دارد ممکن است هدف کنترلی نیز دستخوش تغییر شود. برای مثال می‌توان رباتی را در فضای آزاد در نظر گرفت که بدون قید حرکتی مسیر مطلوب خود را طی می‌کند که ناگهان با یک جسم سخت برخورد می‌کند. در این حالت ربات به دلیل حفظ مسیر مطلوب چه در طول زمان برخورد و چه بعد از آن نیازمند تغییر الگوریتم کنترلی از موقعیت به نیرو در آن راستای مشخص است. این تغییر وضعیت توسط ماتریس انتخاب (S) انجام می‌شود. ماتریس انتخاب قطری و بعد آن برابر بعد فضای کار است و درایه‌های قطر اصلی برای زیرفضای کنترل موقعیت برابر واحد و برای زیرفضاهای کنترل نیرو برابر صفر است. پس ربات در هر لحظه با توجه به اهداف کنترلی در هر راستای فضای کار در یک زیرفضای مشخص قرار دارد که در صورت لزوم بین زیرفضاها توسط ماتریس انتخاب سوئیچ لازم برقرار می‌شود. بنابراین شتاب لازم برای حلقه داخلی بصورت زیر بدست می‌آید [۹]:

$$a = \ddot{x} = Sa_p + (I - S)a_f \quad (۴-۱۵)$$

این شتاب همانطور که گفته شد به عنوان خروجی برای حلقه خارجی کنترل کننده و ورودی برای حلقه داخلی می‌باشد.

۴-۳ حلقه کنترل داخلی

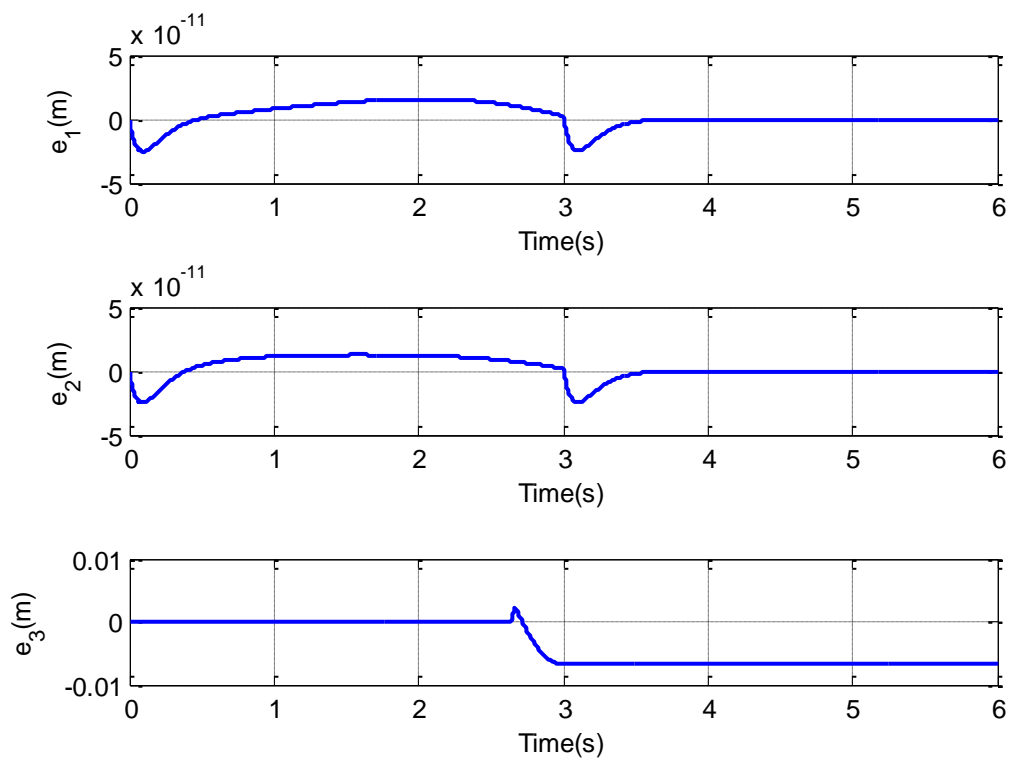
برای اعمال گشتاور مناسب برای اجرای قانون کنترل امپدانس ترکیبی حلقه داخلی وظیفه حذف دینامیک‌های ربات را بر عهده دارد. رابطه (۳-۱۶) که بیانگر معادلات ربات در فضای کار است را در نظر می‌گیریم و قانون کنترل گشتاور را بصورت زیر پیشنهاد میشود [۹]:

$$\tau = D(q)J^{-1}(q)a + h(q, \dot{q}) + J^T(q)F_e \quad (۴-۱۶)$$

که a در رابطه (۴-۱۵) تعریف شده است. با اعمال قانون کنترل فوق سیستم حلقه بسته در زیر فضای موقعیت و نیرو ردیابی و تنظیم را انجام می‌دهد.

۴-۴ شبیه‌سازی

شبیه‌سازی مانند فصل قبل به این صورت است که ربات مسیر مطلوب در فضای کار را دنبال می‌کند سپس با برخورد به محیط در راستای z قانون کنترل نیرو فعال شده و نیروی مطلوب معادل پانصد نیوتن را به محیط وارد می‌کند. مسیر مطلوب ربات در فضای کار بصورت روابط (۳-۲۱)، (۳-۲۲) و (۳-۲۳) است. مدل محیط بصورت رابطه (۳-۲۴) بیان می‌شود.



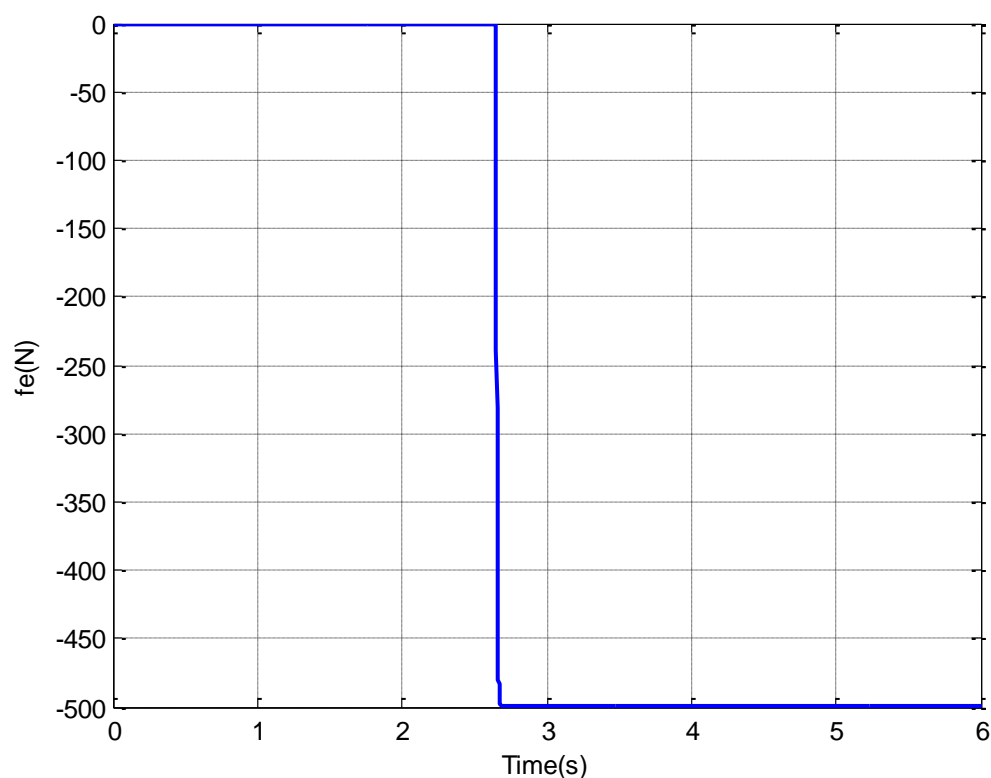
شکل ۴-۳: خطای ردیابی در فضای کار

امپدانس در زیرفضای کنترل موقعیت بصورت $M_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ و $B_d = \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 20 \end{bmatrix}$

همچنین پارامترهای امیدانس در زیرفضای کنترل نیرو نیز $K_d = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}$ هستند.

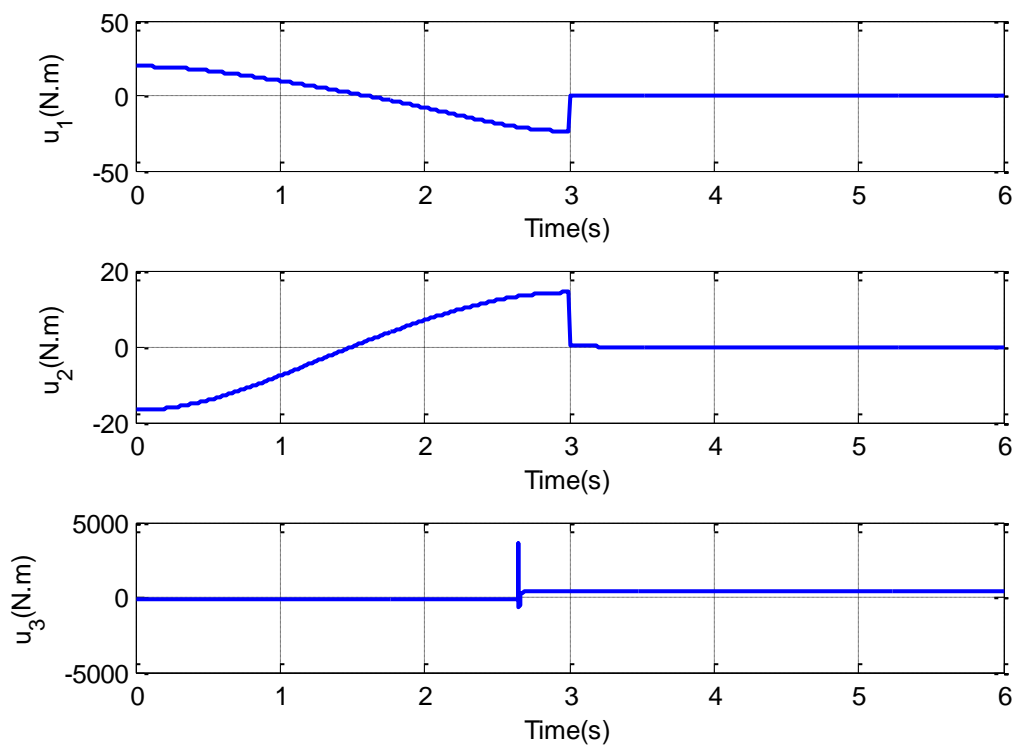
بصورت $M_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ و $B_d = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix}$ است. شکل (۳-۴) عملکرد قانون

کنترل در ردیابی مسیر مطلوب در فضای کار را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پس از دو ثانیه و نیم در راستای سوم خطای محسوسی وجود دارد که ناشی از تماس ربات با محیط است و ربات سعی می‌کند تا نیروی مطلوب را به محیط وارد کند.



شکل ۴-۴: تنظیم نیروی مطلوب تماسی بین ربات و محیط

در شکل (۴-۴) مشاهده می‌کنیم که نیروی مطلوب به محیط وارد شده است. همزمان با وارد شدن نیروی مطلوب خطای ردیابی در زیرفضای سوم افزایش می‌یابد. شکل (۵-۴) گشتاور اعمالی به ربات را نشان می‌دهد. مطابق شکل گشتاور اعمالی در لحظه تماس با محیط بصورت ناگهانی افزایش می‌یابد که ناشی از اعمال سوئیچ ایده‌آل بین کنترل نیرو و کنترل موقعیت در لحظه تماس ربات با محیط است.



شکل ۵-۴: گشتاور ورودی به ربات

فصل ۵

کنترل تعامل دینامیکی غیرخطی

در این فصل به جای قانون امیدانس که رابطه‌ای خطی است با ایجاد رابطه دینامیکی غیرخطی بین متغیر جریان و متغیر تلاش در سیستم حلقه بسته نشان خواهیم داد که حجم محاسبات مربوط به قانون کنترل کاهش می‌یابد. به دلیل غیرخطی بودن رابطه دینامیکی مذکور نمی‌توان از روش‌های پایداری در سیستم‌های خطی استفاده کرد. بنابراین برای اثبات پایداری سیستم حلقه بسته از روش مستقیم لیاپانوف و قضایای مربوط به پایداری ورودی محدود- حالت محدود در سیستم‌های غیرخطی استفاده می‌کنیم.

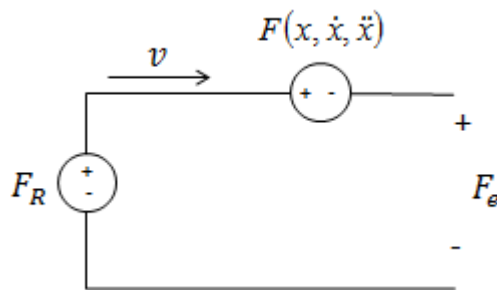
در این فصل ابتدا مفهوم دینامیک غیرخطی را در تعامل ربات با محیط بررسی می‌کنیم، سپس قانون کنترل جهت رسیدن به سیستم حلقه بسته مطلوب را ارائه می‌کنیم. در ادامه به اثبات پایداری می‌پردازیم و نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهیم.

۱-۵ تعامل دینامیک غیر خطی

شکل (۳-۴) را در نظر می‌گیریم. در این شکل Z_R معرف امپدانس مکانیکی ربات است که بصورت نسبت تبدیل لاپلاس متغیر تلاش به متغیر جریان تعریف می‌شود. حال فرض کنیم که بجای Z_R یک معادله دیفرانسیل غیر خطی در حوزه زمان قرار دارد. شکل (۵-۱). از آنجا که سیستم حلقه بسته رفتاری غیر خطی دارد نمی‌توان از تحلیل‌های مربوط به شبکه‌های خطی و تغییرناپذیر با زمان استفاده کرد. با توجه به شکل (۵-۱) می‌توان نوشت:

$$F_R = F(x, \dot{x}, \ddot{x}) + F_e \quad (1-5)$$

همانند کنترل امپدانس مرسوم در اینجا نیز هدف تعیین $F(x, \dot{x}, \ddot{x})$ به گونه‌ای است که ربات در تعامل با محیط انعطاف لازم را از خود نشان دهد.



شکل ۱-۵: تعامل دینامیکی غیر خطی

۲-۵ کنترل کننده تعامل دینامیکی غیر خطی

قانون کنترل تعامل غیر خطی را بصورت زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$\tau = J^T (-K_d \dot{X} - K_p X) + G(q) \quad (2-5)$$

که در آن K_p و K_d ماتریس‌های قطری، مثبت معین، $G(q)$ بردار گشتاور ثقلی و X موقعیت مجری نهایی است. قانون کنترل را به ربات در فضای کار با جایگذاری قانون کنترل (۲-۵) در معادله دینامیکی ربات، رابطه (۳-۳) اعمال می‌کنیم:

$$\begin{aligned} D(q)J^{-1}(q)(\ddot{X} - \dot{J}(q)\dot{q}) + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + J^T(q)F_e \\ = J^T(-K_d\dot{X} - K_p X) + G(q) \end{aligned} \quad (۳-۵)$$

با فرض وجود J^{-T} و بکارگیری $\dot{q} = J^{-1}\dot{X}$ سیستم حلقه بسته بصورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} J^{-T}(q)D(q)J^{-1}(q)\ddot{X} + J^{-T}(C(q, \dot{q}) - D(q)J^{-1}(q)\dot{J}(q))J^{-1}(q)\dot{X} \\ + K_d\dot{X} + K_p X = -F_e \end{aligned} \quad (۴-۵)$$

برای سادگی رابطه (۴-۵) را بصورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$D_x\ddot{X} + C_x\dot{X} + K_d\dot{X} + K_p X = -F_e \quad (۵-۵)$$

که در رابطه (۵-۵):

$$D_x = J^{-T}(q)D(q)J^{-1}(q) \quad (۶-۵)$$

$$C_x = J^{-T}(q)(C(q, \dot{q}) - D(q)J^{-1}(q)\dot{J}(q))J^{-1}(q) \quad (۷-۵)$$

به عنوان مقایسه قانون کنترل تعامل غیرخطی با قانون کنترل امیدانس مرسوم یکبار دیگر قانون امیدانس مرسوم را در نظر می‌گیریم:

$$M_d\ddot{X} + B_d\dot{X} + K_d X = -F_e \quad (۸-۵)$$

با اعمال \ddot{X} از رابطه (۸-۵) در رابطه (۱۵-۳) قانون کنترل امیدانس مرسوم بصورت زیر حاصل می‌شود:

$$\tau = D(q)J^{-1}(q)M_d^{-1}(-B_d\dot{X} - K_dX - F_e) - D(q)J^{-1}(q)\dot{J}(q)\dot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (9-5)$$

بنابراین، محاسبات قانون کنترل تعامل غیرخطی (۲-۵) در مقایسه با قانون کنترل امپدانس مرسوم (۹-۵) بطور چشمگیری کاهش یافته است. در ادامه به بررسی پایداری سیستم حلقه بسته (۵-۵) می‌پردازیم. قبل از اثبات پایداری تعاریف و قضایای مربوطه را بیان می‌کنیم.

سیستم زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t) \quad (10-5)$$

در رابطه (۱۰-۵)، $g(x, t)$ اغتشاش و x بردار حالت است. هدف ما استنتاج یک شرط کراندار بودن در معادله (۱۰-۵) از روی خواص پایداری سیستم مختل نشده وابسته به آن به شکل زیر است:

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (11-5)$$

تعریف ۱.۵: نقطه تعادل $x=0$ در سیستم مختل نشده (۱۱-۵) بصورت کلی پایدار نامیده می‌شود اگر برای هر $\varepsilon \geq 0$ ، دو عدد δ_1 و δ_2 وجود داشته باشد بگونه‌ای که $\|x(t_0)\| < \delta_1$ و $\|g(x, t)\| < \delta_2$ ایجاب کند که هر جواب $x(t)$ از سیستم مختل شده (۱۰-۵) شرط $\|x(t)\| < \varepsilon$ را برقرار کند [۲۹].

تعریف فوق بدین معنا است که یک نقطه تعادل بصورت کلی پایدار است اگر حالت سیستم مختل شده را بتوان با محدود کردن حالت اولیه و اینکه اختلال به حد کافی کوچک باشد، بصورت دلخواه در نزدیکی صفر باقی نگه داشت. این نوع پایداری یک نوع موضعی از پایداری ورودی محدود- خروجی محدود است [۲۹].

قضیه ۱.۵: اگر نقطه تعادل سیستم (۱۱-۵) بصورت مجانبی و یکنواخت پایدار باشد آنگاه بصورت کلی پایدار است [۲۹].

قضیه فوق بدان معنا است که سیستم‌هایی که بصورت مجانبی و یکنواخت پایدارند، در برابر آشفتگی- های کوچک مقاومت می‌کنند. سیستم حلقه بسته (۵-۵) را در نظر می‌گیریم و F_e را بصورت جمله اختلال فرض می‌کنیم و پایداری سیستم بدون اختلال را اثبات می‌کنیم. قبل از اثبات خواص زیر را بیان می‌کنیم:

خاصیت ۱.۵: ماتریس D_x مثبت، معین و یکنواخت است [۳۰]. برای ماتریس D_x می‌توان نوشت:

$$\underline{d} I_n \leq D_x \leq \bar{d} I_n \quad (۱۲-۵)$$

در رابطه بالا \underline{d} و \bar{d} اسکالرهایی مثبت و ثابت هستند.

خاصیت ۲.۵: $\dot{D}_x - 2C_x$ پادمتقارن است [۳۱].

خاصیت ۳.۵: اگر $\|\dot{X}\|$ محدود باشد، آنگاه $\|\dot{D}_x\| \leq \alpha$ و α مقداری محدود و مثبت است [۳۱].

سیستم حلقه بسته (۵-۵) را بصورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\dot{Z} = f(Z) + g(Z, F_e)$$

$$Z^T = [Z_1^T \quad Z_2^T] = [X^T \quad \dot{X}^T]$$

$$f(Z) = \begin{bmatrix} Z_2 \\ D^{-1}(-C_x Z_2 - K_d Z_2 - K_p Z_1) \end{bmatrix} \quad (۱۳-۵)$$

$$g(Z, F_e) = \begin{bmatrix} 0 \\ -D^{-1} F_e \end{bmatrix}$$

تابع منتخب لیاپانوف را بصورت زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$V(Z) = \frac{1}{2} Z_2^T D_x Z_2 + \frac{1}{2} Z_1^T K_p Z_1 \quad (۱۴-۵)$$

مشتق تابع لیاپانوف نسبت به زمان را روی مسیرهای سیستم حلقه بسته غیر مختل شده

$$\dot{Z} = f(z) \text{ می یابیم:}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(Z) &= \frac{\partial V}{\partial Z} f(Z) = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial Z_1} & \frac{\partial V}{\partial Z_2} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Z_2 \\ D^{-1}(-C_x Z_2 - K_d Z_2 - K_p Z_1) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Z_1^T K_p + \frac{1}{2} Z_2^T \dot{D}_x & Z_2^T D_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_2 \\ D^{-1}(-C_x Z_2 - K_d Z_2 - K_p Z_1) \end{bmatrix} \quad (15-5) \\ &= Z_1^T K_p Z_2 + \frac{1}{2} Z_2^T \dot{D}_x Z_2 + Z_2^T (-C_x Z_2 - K_d Z_2 - K_p Z_1) \end{aligned}$$

با توجه به خاصیت (۲.۵) داریم:

$$\dot{V}(Z) = -Z_2^T K_d Z_2 \quad (16-5)$$

با استفاده از قضیه لاسال [۳۲] و سیستم مختل نشده $\dot{Z} = f(z)$ می توان نتیجه گرفت که سیستم مختل نشده پایدار مجانبی است. در معادلات سیستم مختل نشده چون سیستم نامتغیر با زمان است از پایداری مجانبی می توان پایداری مجانبی یکنواخت را نتیجه گرفت. بنابراین با توجه به قضیه (۱.۵) سیستم حلقه بسته پایدار کلی است پس به ازای ورودی های محدود و به اندازه کافی کوچک پایداری از نوع ورودی محدود- خروجی محدود حاصل می شود.

لم ۱.۵: سیستم ناخودگردان زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = f(t, x, u) \quad (17-5)$$

فرض کنید تابع $f(x, u, t)$ پیوسته، مشتق پذیر و نسبت به (x, u) لیپشیتز جامع و نسبت به t یکنواخت باشد. در این صورت اگر سیستم بدون ورودی (۱۷-۵) دارای نقطه تعادل پایدار نمایی جامع در $x=0$ باشد، آنگاه سیستم (۱۷-۵) پایدار ورودی به حالت است [۳۲].

قضیه ۲.۵: فرض کنید تابع $f(x,t)$ نسبت به t پیوسته قطعه‌ای و نسبت به x لیپ‌شیتز محلی باشد ضمناً فرض کنید نقطه $x=0$ نقطه تعادل معادله $\dot{x} = f(x,t)$ در لحظه $t=0$ باشد. اگر بتوان تابع منتخب لیپانوف را بگونه‌ای یافت که در روابط زیر صدق کند:

$$K_1 \|x\|^C \leq V(x,t) \leq K_2 \|x\|^C, \quad K_1, K_2, C > 0 \quad (18-5)$$

$$\dot{V}(x,t) = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f(x,t) \leq 0 \quad (19-5)$$

$$\int_t^{t+\delta} \dot{V}(t, \varphi(\tau, t, x)) d\tau \leq -\lambda V(t, x), \quad 0 < \lambda < 1, \delta > 0 \quad (20-5)$$

در رابطه (۲۰-۵) $\varphi(\tau, t, x)$ پاسخی از سیستم است که از (t, x) آغاز می‌شود.

آنگاه مبدا پایدار نمایی است [۳۲].

در سیستم‌های خودگردان بیان لم ۱.۵ و قضیه ۲.۵ برای پایداری از نوع ورودی محدود- خروجی محدود بصورت قضیه زیر خلاصه می‌شود:

قضیه ۳.۵: سیستم دینامیکی غیر خطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = F(x, u), \quad x(t_0) = x_0 \quad (21-5)$$

$$y = H(x, u) \quad (22-5)$$

فرض کنید تابع منتخب لیپانوف $V(x)$ و خروجی $H(x, u)$ وجود دارد که تمام شرایط زیر را برآورده می‌سازد:

$$\alpha \|x\|^2 \leq V(x) \leq \beta \|x\|^2, \quad \alpha, \beta > 0 \quad (23-5)$$

$$\dot{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} F(x, 0) \leq -\gamma_1 \|x\|^2, \quad \gamma_1 > 0 \quad (24-5)$$

$$\left\| \frac{\partial V}{\partial x} \right\| \leq \gamma_2 \|x\|, \quad \gamma_2 > 0 \quad (25-5)$$

$$\|F(x, u) - F(x, 0)\| \leq L\|u\|, \quad L > 0 \quad (26-5)$$

$$\|H(x, u)\| \leq \eta_1 \|x\| + \eta_2 \|u\|, \quad \eta_1, \eta_2 > 0 \quad (27-5)$$

آنگاه برای هر x_0 و $p \in [1, \infty]$ سیستم (21-5) و (22-5) پایدار L_p با بهره محدود است [33].

شرایط قضیه (3-5) را برای تابع لیاپانوف (14-5) و سیستم حلقه بسته (5-5) با خروجی‌های زیر

بررسی می‌کنیم:

$$y_1 = Z_1 \quad (28-5)$$

$$y_2 = Z_2 \quad (29-5)$$

شرط معادله (23-5): با استفاده از خاصیت (1-5) می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2} \min(\underline{d}, \lambda_{\min}(K_p)) \|Z\|^2 \leq V(Z) \leq \frac{1}{2} \max(\bar{d}, \lambda_{\max}(K_p)) \|Z\|^2 \quad (30-5)$$

$\lambda_{\min}(\cdot)$ و $\lambda_{\max}(\cdot)$ بیانگر کوچکترین و بزرگترین مقدار ویژه است.

شرط معادله (24-5): از رابطه (16-5) داریم:

$$-Z_2^T K_d Z_2 \leq -\lambda_{\min}(K_d) \|Z\|^2 \quad (31-5)$$

شرط معادله (25-5): از رابطه (15-5)، خاصیت (1-5) و خاصیت (3-5) استفاده می‌کنیم. برای

استفاده از خاصیت (3-5) ابتدا از روش غیرفعال بودن اثبات می‌کنیم $\|\dot{X}\|$ محدود می‌باشد. رابطه (5-5)

(5) را بصورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\dot{X}^T D_x \ddot{X} + \dot{X}^T C_x \dot{X} + \dot{X}^T K_d \dot{X} + \dot{X}^T K_p X = -\dot{X}^T F_e \quad (32-5)$$

رابطه (32-5) را می‌توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \dot{X}^T D_x \dot{X} + \frac{1}{2} X^T K_p X \right) = -\dot{X}^T F_e - \dot{X}^T K_d \dot{X} \quad (33-5)$$

بنابراین نگاشت از $-F_e$ به \dot{X} یک نگاشت غیرفعال اتلافی است. بنابراین شرایط معادله (25-5) بصورت زیر برقرار است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial Z} &= [Z_1^T K_p \quad Z_2^T D_x] + \left[\frac{1}{2} Z_2^T \dot{D}_x \quad 0 \right] \\ \left\| \frac{\partial V}{\partial Z} \right\| &\leq \left\| [Z_1^T K_p \quad Z_2^T D_x] \right\| + \left\| \left[\frac{1}{2} Z_2^T \dot{D}_x \quad 0 \right] \right\| \\ &\leq \max(\lambda_{\max}(K_p), \bar{d}) \|Z\| + \frac{1}{2} \|\dot{D}_x\| \|Z\| \\ &\leq \left(\max(\lambda_{\max}(K_p), \bar{d}) + \frac{1}{2} \alpha \right) \|Z\| \end{aligned} \quad (34-5)$$

شرط معادله (26-5): با استفاده از خاصیت 1.5:

$$\|F(x, u) - F(x, 0)\| = \|D_x^{-1} F_e\| \leq \frac{1}{\underline{d}} \|F_e\| \quad (35-5)$$

شرط معادله (27-5):

$$\|Z_1\| \leq \|Z\| + \|F_e\| \quad (36-5)$$

$$\|Z_2\| \leq \|Z\| + \|F_e\| \quad (37-5)$$

تمامی شرایط قضیه (3-5) برقرار است بنابراین سیستم حلقه بسته (5-5) به ازای ورودی محدود F_e دارای خروجی محدود X و \dot{X} است. پس سیستم حلقه بسته پایدار داخلی است و تمام سیگنال‌های موجود محدودند.

۳-۵ شبیه‌سازی

برای نشان دادن عملکرد سیستم کنترل تعامل دینامیک غیرخطی معادلات (۵-۵) را به فضای خطای ردیابی منتقل می‌کنیم. قانون کنترل بصورت زیر حاصل می‌شود:

$$\tau = J^T (-K_d(\dot{X} - \dot{X}_d) - K_p(X - X_d) + D_x \ddot{X}_d + C\dot{X}_d) + G \quad (۳۸-۵)$$

مسیر مطلوب برای ردیابی توسط ربات در روابط (۲۱-۳)، (۲۲-۳) و (۲۳-۳) بیان شده است.

پارامترهای کنترل کننده بصورت

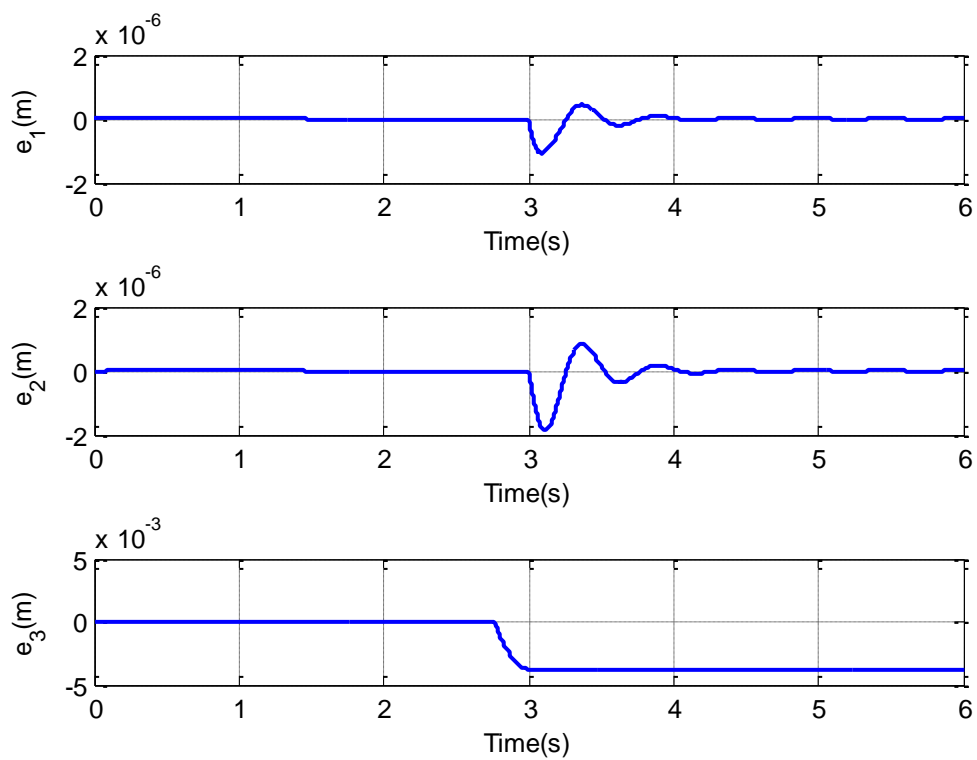
$$K_d = \begin{bmatrix} 2000 & 0 & 0 \\ 0 & 2000 & 0 \\ 0 & 0 & 2000 \end{bmatrix}$$

و

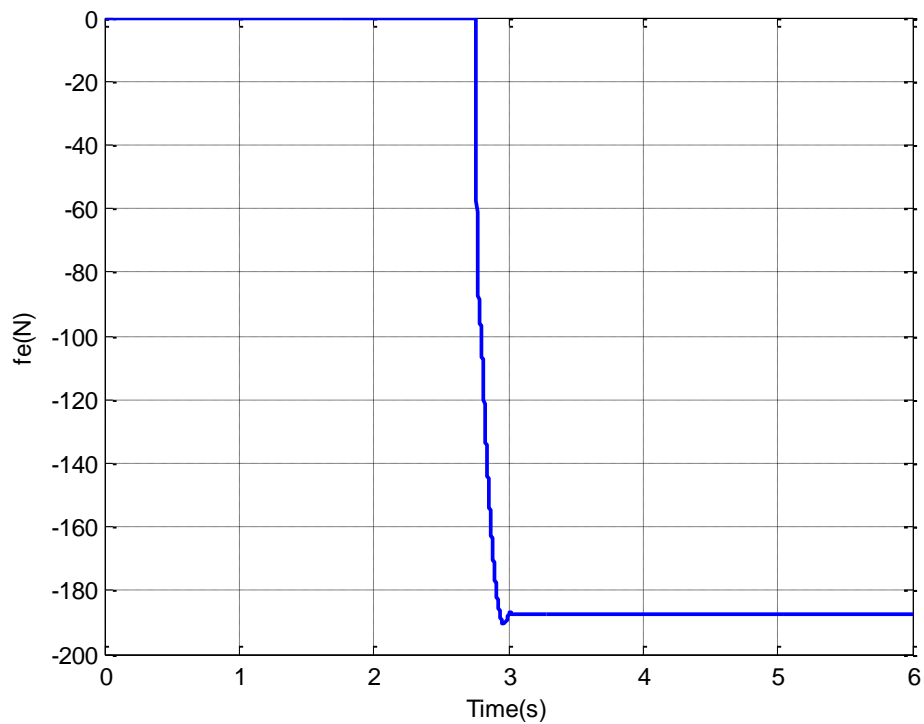
$$K_p = \begin{bmatrix} 50000 & 0 & 0 \\ 0 & 50000 & 0 \\ 0 & 0 & 50000 \end{bmatrix}$$

است. همانند فصل قبل ربات مسیر مطلوب را دنبال می‌کند، در

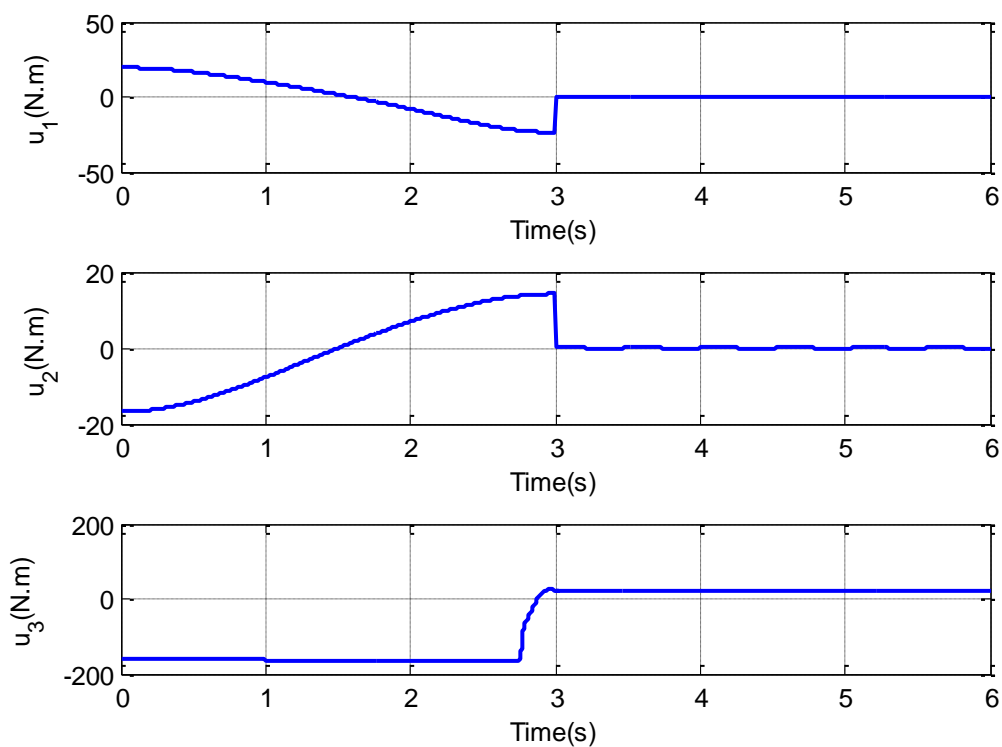
مسیر خود به مانع برخورد می‌کند و دینامیک غیرخطی بین نقطه انتهایی ربات و محیط برقرار می‌شود. در شکل (۲-۵) خطای ردیابی مسیر مطلوب نشان داده شده است. همانطور که می‌بینیم پس از برخورد با محیط در راستای سوم شاهد خطای اندکی در ردیابی مسیر هستیم. شکل (۳-۵) میزان نیروی تماسی بین ربات و محیط را نشان می‌دهد. شکل (۴-۵) گشتاور لازم برای اعمال به ربات جهت اجرای قانون کنترل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنیم که مقدار گشتاور محدود و قابل اعمال و پیاده‌سازی است.



شکل ۴-۵: خطای ردیابی مسیر مطلوب



شکل ۴-۵: نیروی تماسی بین ربات و محیط



شکل ۵-۴: گشتاور اعمالی به مفاصل ربات

نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترل تعامل دینامیکی غیرخطی و کنترل امپدانس مرسوم بیانگر عملکرد مشابه در تعامل با محیط است. این در حالی است که با توجه به روابط (۲-۵) و (۹-۵) مشاهده می‌کنیم حجم محاسبات قانون کنترل تعامل دینامیک غیرخطی به طرز چشمگیری کاهش یافته است که باعث می‌شود در پیاده‌سازی عملی محاسبات قانون کنترل با سرعت بیشتری انجام شود.

فصل ۶

نتیجه‌گیری و پیشنهادات:

۶-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه روش جدید کنترل تعامل دینامیکی غیرخطی برای بازوهای رباتیک ارائه شده است. در کاربردهای رباتیک نمی‌توان تعامل بین ربات و محیط را نادیده گرفت و باید کنترل کننده به‌گونه‌ای طراحی شود که ربات مورد نظر رفتار مناسب در تعامل با محیط از خود نشان دهد. روش‌های مرسوم کنترل امپدانس با ایجاد یک رابطه دینامیکی خطی و بدون تزویج بین نیرو و سرعت نقطه انتهایی ربات باعث ایجاد تعامل مناسب بین ربات و محیط می‌شود. معادلات دینامیکی بازوهای ماهر رباتیک بصورت غیرخطی و دارای تزویج هستند از این رو قانون کنترلی که بتواند سیستم حلقه بسته را به امپدانس مطلوب برساند دارای پیچیدگی‌های بسیاری است و شدیداً وابسته به مدل است. در این پایان‌نامه با استفاده از یک کنترل کننده ساده‌تر نسبت به روش کنترل امپدانس مرسوم حجم محاسبات مربوط به قانون کنترل کاهش می‌یابد و سیستم حلقه بسته بصورت رابطه غیرخطی حاصل می‌شود بنابراین پایداری سیستم حلقه بسته بررسی می‌شود و نتایج شبیه‌سازی کارایی روش مذکور را نشان می‌دهد.

۲-۶ پیشنهادات

استفاده از روش‌های کنترل مقاوم و کنترل تطبیقی جهت غلبه بر نامعینی‌های پارامتری و غیر پارامتری و همچنین توسعه روش غیرخطی فوق برای ردیابی دقیق نیرو پیشنهاد می‌شود. بعلاوه استفاده از استراتژی کنترل ولتاژ نیز می‌تواند برای غلبه بر نامعینی‌های سیستم مطلوب باشد.

مراجع:

- [1] I. Bonilla, F.reyes, M.mendoza, E. J. Gonzalez, 'A dynamic compensation approach to impedance control of robot manipulators', Journal of Intelligent & Robotic Systems, Volume 63, Issue 1, PP 53-71, 2010.
- [2] N. Hogan, 'Impedance control: An approach to manipulation: Part I,II,III', Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Volume 107, Issue 1, PP 1-24,1985.
- [3] M. W. Spong, M. Vidyasagar, 'Robot dynamics and control', John Wiley and Sons, Inc, New york, 2006.
- [4] B. Kim, N. Y. Chong, S. Oh, H. Suh, 'Intelligent compliance control for robot manipulators using adaptive stiffness characteristics', IEEE International Conference on Robotics and Automation, Volume 3, PP 2134-2139, 1999.
- [5] M.H. Raibert, J. J. Craig, 'Hybrid position/force control of manipulators', Journal of Dynamic Systems Measurement and control, Volume 103, Issue 2, PP 126-133, 1981.
- [6] H. Zhang, R. P. Paul, 'Hybrid control of robot manipulators', IEEE International Conference on Robotic and Automations, volume 2, PP 602-607, 1985.
- [7] Y. H. Chen, W. George, 'Robust hybrid control of robot manipulators', IEEE International Conference on Robotic and Automations, Volume 1, PP 236-241, 1989.
- [8] S-P. T. Wang, C. Y. Kuo, 'Nonlinear robust control of robot manipulators', American Control Conference, PP 1345-1350, 1988.
- [9] R. J. Anderson, M. W. spong, 'Hybrid impedance control of robot manipulators', IEEE Journal of Robots and Automation, Volume 4, Issue 5, 1988.

- [10] A. Albu, C. Ott, G.Hirzinger, ‘A passivity based cartesian impedance controller for flexible joint robots’, IEEE International Conference in Robotics and Automation, Volume 3, PP 2666-2672, 2004.
- [11] S. Lee, H. S. Lee, ‘Intelligent control of manipulators interacting with an uncertain environment based on generalized impedance’, IEEE International Symposium on Intelligent Control, PP 61-38, 1999.
- [12] D. Dawson, Z. Qu, W. S. Lu, Q. H. Meng, ‘Comments on "impedance control with adaptation for robotic manipulations"', IEEE Trans on Robotics and Automations, Volume 7, Issue 6, PP 897-881, 1991.
- [13] W. S. Lu, Q. H. Meng, ‘Impedance control with adaptation for robotic manipulations’, IEEE Trans on Robotics and Automations, Volume 7, Issue 3, PP 408-415, 1991.
- [14] S. P. Chen, B. Yao, W.B. Gao, M. Cheng, ‘Robust impedance control of robots manipulators’, International Journal of Robotics and Automations, Volume 6, Issue 4, PP 220-227, 1991.
- [15] M. M. Fateh, S. S. Alavi, ‘Impedance control of an active suspension system’, Mechatronics, Volume 18, Issue 20, PP 134-140, 2009.
- [16] M. M. Fateh, M. M. Moradi Zirkohi, ‘Adaptive impedance control of a hydraulic suspension system using particle swarm optimizatin’, International Journal of Vehicle System Dynamics, Volume 49, Issue 12, PP 1951-1965, 2011.
- [17] M. M. Fateh, ‘Robust impedance control of a hydraulic suspension system’, International Journal of Robust Nonlinear Control, Volume 12, Issue 20, PP 858-872, 2010.
- [18] Z. Li, W. Chen, J. Luo, ‘Adaptive compliant force–motion control of coordinated non-holonomic mobile manipulators interacting with unknown non-rigid environments’, Neurocomputing , Volume 71, Issue 7-9, PP 1330-1334, 2008.
- [19] M. M. Fateh, ‘On the voltage-based control of robot manipulators’, International Journal of Control, Automation and Systems, Volume 6, Issue 5, PP 707-712, 2008.

- [20] M. M. Fateh, R. Babaghasabha, 'Impedance control of robots using voltage control strategy', *Nonlinear Dynamics*, Volume 74, Issue 1-2, PP 277-286, 2013.
- [21] M. M. Fateh, S. Khorashadizadeh, 'Robust control of electrically driven robots by adaptive fuzzy estimation of uncertainty', *Nonlinear Dynamics*, Volume 69, Issue 3, PP 1465-1477, 2012.
- [22] M. M. Fateh, S. Fateh, 'Fine-tuning fuzzy control of robots', *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, Volume 25, Issue 4, PP 977-987, 2013.
- [23] M. M. Fateh, S. Fateh, 'A precise robust fuzzy control of robots using voltage control strategy', *International Journal of Automation and Computing*, Volume 10, Issue 1, PP 64-72, 2013.
- [24] M. M. Fateh, S. Fateh, 'Decentralized direct adaptive fuzzy control of robots using voltage control strategy', *Nonlinear Dynamics*, Volume 70, Issue 3, PP 1919-1930, 2012.
- [25] C. Ming-Chih, H. An-Chyau, 'Adaptive impedance controller design for flexible-joint electrically-driven robots without computation of regressor matrix', *Robotica*, Volume 30, Issue 1, PP 133-144, 2012.
- [26] T. C. Seul Jung, Hsia, R. G. Bonitz, 'Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment', *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, Volume 12, Issue 3, PP 474-483, 2004.
- [27] D. Gorinevsky, T. Connolly, 'Comparison of some neural network and scattered data approximations: The inverse manipulators kinematics example', *Neural Computation*, Volume 6, Issue 3, PP 521-542, 1994.
- [28] Y. Nakamura, 'Advanced robotics redundancy and optimization', Addison Wesley, 1991.
- [29] J. J. E. Slotine, W. Li, 'Applied nonlinear control', Prentice Hall, 1991.
- [30] M. R. Soltanpour, M. M. Fateh, A. R. Ahmadifard, 'Nonlinear tracking control on a robot manipulator in the task space with uncertain dynamics', *Journal of Applied Sciences*, Volume 8, Issue 23, PP 4397-4403, 2008.

- [31] A. Behal, W. Dixon, D. M. Dawson, B. Xian, 'Lyapunove based control of robotic systems', CRC Press, 2010.
- [32] H. K. Khalil, 'Nonlinear Systems', Macmillan Publishing Company, 1992.
- [33] W. M. Haddad, V. Chellaboina, 'Nonlinear dynamical systems and control a lyapunov based approach', Princeton University Press, 2008.

Abstract:

This thesis presents a nonlinear dynamic interaction control for robot manipulators. The benefit of this method in comparison with conventional impedance control is in reducing computation of control law which can result to practical implementation, speed of performance and less dependence on robot model meanwhile control purposes in interaction with environment is achieved. In control purposes like commonly used impedance control, if the robot is not in contact with environment, desired tracking of end effector is obtained and in case of contact with the environment no damages can affect robot or environment. Moreover the dynamic equation between velocity of end effector and contact force to the environment is regulated arbitrarily. Three methods of impedance control, hybrid impedance control and nonlinear dynamic interaction control are compared and simulated on scara robot. The conventional impedance control approach forms a linear relationship between contact force to the environment and the displacement of end effector but it is not capable of regulating force during interaction. In hybrid impedance control it is possible to regulate force. The nonlinear dynamic interaction method is the generalization of conventional impedance control from linear differential equation to nonlinear differential equation.

Keywords: impedance control, hybrid impedance control, dynamic interaction, nonlinear control.



University of Shahrood

Department of Electrical and Robotic Engineering

**Control of nonlinear dynamic interaction of robot
manipulators**

Mohammad Ali Daneshpajouh

Supervisor:

Prof. Mohammad Mehdi Fateh

September 2015