





دانشکده برق

گروه کنترل

کنترل امپدانس ترکیبی بازوی‌های ربات با راهبرد کنترل ولتاژ

دانشجو :

محمد برادران فرد

استاد راهنما :

دکتر محمد مهدی فاتح

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور 1393

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق

گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد برادران فرد

تحت عنوان:

کنترل امپدانس ترکیبی بازوی‌های ربات با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : محمد مهدی فاتح

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به:

مادر و پدر مهربانم که حاصل دستاوردشان رمز موفقیتیم شد و خواهر و دو
برادر عزیزم...

و به تمام آزاد مردانی که نیک می اندیشند و عقل و منطق را پیشه خود
نموده و جز رضای الهی و پیشرفت و سعادت جامعه، هدفی ندارند.

تشکر و قدردانی:

از راهنمایی‌های ارزنده استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر محمد مهدی فاتح کمال تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب محمد برادران فرد. دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش کنترل دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان "کنترل امپدانس ترکیبی مقاوم بازوی رباتیک با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ" تحت راهنمایی دکتر محمد مهدی 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 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.

پردازد. قبلا این روش کنترلی بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور ارائه شده است و در این پایان نامه برای

نخستین بار با راهبرد کنترل ولتاژ عرضه می‌گردد. همواره عدم قطعیت‌ها در سیستم‌های کنترل باعث ایجاد خطا در تحقق هدف مطلوب می‌شوند. بکارگیری روش‌های مبتنی بر کنترل مقاوم باعث جبران عدم قطعیت‌ها و در نتیجه بهبود عملکرد سیستم حلقه بسته می‌شود. تحقق امیدانس ترکیبی براساس راهبرد کنترل ولتاژ نیز نیازمند غلبه بر عدم قطعیت‌ها در تماس ربات و محیط می‌باشد. این عدم قطعیت‌ها مربوط به مدل ربات، مدل موتور و مدل محیط هستند. در این پایان‌نامه کنترل‌کننده‌ای بر اساس روش سلسله مراتبی جهت جبران عدم قطعیت‌ها پیشنهاد می‌گردد. بدین صورت که، قانون کنترل پیشنهادی با بکارگیری راهبرد کنترل ولتاژ، مستقل از مدل دینامیکی ربات و عدم قطعیت‌های آن طراحی می‌گردد. اما به عدم قطعیت‌های مدل محرکه وابسته است. پس با استفاده از سیستم فازی تطبیقی عدم قطعیت‌ها را تخمین زده و در قانون کنترل جبران می‌گردد. در نهایت، با بهره‌گیری از روش کنترل ساختار متغیر، عدم قطعیت‌های تماس جبران گشته، بگونه‌ای که مدل امیدانس مطلوب میان ربات و محیط حاکم می‌گردد. اطلاع از کران عدم قطعیت و پدیده لرزش در سیگنال کنترل، از چالش‌های اساسی در بکارگیری روش کنترل ساختار متغیر می‌باشد. جهت حذف پدیده لرزش، از کنترل‌کننده انتگرالی تناسبی استفاده می‌شود. همچنین با محاسبه کران عدم قطعیت بر اساس قوانین تطبیقی، نیازی به اطلاع از کران عدم قطعیت نیست. تحلیل پایداری جهت محاسبه قوانین تطبیق و همچنین محدود ماندن متغیرهای حالت ارائه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی بر روی ربات اسکارا و مقایسه‌ها بیانگر عملکرد مقاوم با بار محاسباتی کمتر می‌باشد.

کلمات کلیدی : کنترل امیدانس ترکیبی، راهبرد کنترل ولتاژ، کنترل ساختار متغیر، تقریبگر فازی- تطبیقی، کنترل انتگرالی تناسبی

فهرست مطالب

۱..... فصل اول مقدمه و پیشینه‌ی تحقیق

1-1 مقدمه 2

2-1 قیدهای سینماتیکی 4

3-1 حرکت سازگار یا انعطاف پذیر 6

1-3-1 انعطاف پذیر غیر فعال 6

2-3-1 - انعطاف پذیر فعال 7

1-2-3-1 کنترل ترکیب بینی و - موقعیت 8

2-2-3-1 کنترل لامپدانس 9

3-2-3-1 کنترل لامپدانسترکیبی 121

4-1 مرور بر فعالیتها ی گذشته 13

5-1 اهداف تحقیق 16

6-1 طرح کلی پایان نامه 17

۲ فصل دو سینماتیک و دینامیک ربات ۱۹

1-2 مقدمه 20

2-2 سینماتیک مستقیم 20

1-2-2 ماتریس دوران 22

2-2-2 بردار انتقال 23

3-2-2 الگوریتم دناویت - هارتنبرگ 26

3-2 سینماتیک وارون 27

4-2 ماتریس ژاکوبین 28

- 30..... 1-4-2 وضعیت‌ها یتکین
- 31..... 5-2 مدل‌سازی دینامیکی
- 31..... 1-5-2 انرژی جنبشی
- 32..... 2-5-2 انرژی پتانسیل
- 32..... 3-5-2 لاگرانژین
- 33..... 4-5-2 معادله‌ها و بلر - لاگرانژ
- 34..... 6-2 مدل‌سازی سینماتیک و دینامیک با تاسکارا
- 34..... 1-6-2 مدل‌سازی سینماتیکی
- 36..... 2-6-2 مدل‌سازی دینامیکی
- ۴۱..... ۳ فصل سوم کنترل امیدانس ترکیبی مبتنی بر مدل با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ
- 42..... 1-3 مقدمه
- 42..... 2-3 مدل‌سازی محیط
- 43..... 3-3 کنترل کننده‌ها امیدانس ترکیبی
- 44 1-3-3 حلقه کنترل خارجی
- 45 1-3-3-1 زیرفضای کنترل موقعیت
- 48..... 2-1-3-3 زیرفضای کنترل نیرو
- 50 4-3 ماتریس انتخاب
- 51 1-4-3 سوئیچ‌فازی
- 53 5-3 حلقه کنترل داخلی

- 6-3 طراحی قانون کنترل 53
- 1-6-3 راهبرد کنترل گشتاور 54
- 2-6-3 راهبرد کنترل ولتاژ 56
- 3-6-3 تحلیل همگرایی 59
- 7-3 شبیه سازی 59
- 1-7-3 راهبرد کنترل ولتاژ 62
- 2-7-3 راهبرد کنترل گشتاور 65
- 8-3 نتیجه گیری 67
- ۴ فصل چهارم کنترل امپدانس ترکیبی مقاوم با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ ۶۹
- 1-4 مقدمه 70
- 2-4 طراحی کنترل کننده مقاوم 71
- 1-2-4 مدل سازی 71
- 2-2-4 امپدانس ترکیبی 74
- 3-2-4 طراحی کنترل ساختار متغیر 76
- 4-2-4 قانون کنترل 77
- 1-4-2-4 فازیت تطبیقی 79
- 3-4 ماتریس انتخاب 82
- 4-4 تحلیل پایداری 83
- 5-4 شبیه سازی 85

91..... 6-4 نتیجه گیری

۹۳..... فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات

94..... 1-5 نتیجه گیری

95..... 2-5 پیشنهادات

96 مراجع

فهرست اشکال

4..... شکل 1-1 تصویر اولر با تپلیس سهر دار، تصویر دومر با تجراح

- شکل 1-2 قیود طبیعی و مصنوعی 5
- شکل 1-3 مرکز انطاف پذیر کنتر ل شونده 7
- شکل 1-4 کنتر لکننده تر کیبی موقعی تنیر و 9
- شکل 1-2 ربات هنر مند 21
- شکل 2-2 ربات اسکارا 21
- شکل 2-3 ربات استنفورد 21
- شکل 2-4 دیاگرام مفصلی ربات تکروری 22
- شکل 2-5 محورهای مختصات دورانیافته 23
- شکل 2-6 دستگاه مختصات انتقال یافته 24
- شکل 2-7 دیاگرام مفصلی در مختصات دکارتی 28
- شکل 2-8 دیاگرام مفصلی 34
- شکل 1-3 کنتر لکننده های مپدانستر کیبی 44
- شکل 2-3 مدل زیر فضای کنتر لموقعیت 46
- شکل 3-3 مدل زیر فضای کنتر لنیر و 48
- شکل 3-4 توابع تعلق فازی 52
- شکل 3-5 مسیرهای مطلوب موقعی تدر هر سهر استا 61
- شکل 3-6 خطای ر دیا بی موقعی 62
- شکل 3-7 خطای ر دیا بینیر و 63
- شکل 3-8 ولتاژ کنتر لهر 3 موتور 64
- شکل 3-9 اثر بکار گیر سیست مفازی 64
- شکل 3-10 خطای ر دیا بی موقعی 65
- شکل 3-11 خطای ر دیا بینیر و 66

- شکل 3-12 گشتاورها یورودیبهر بات 66
- شکل 4-1 خطایردیابیمو قعیتمطلوب 87
- شکل 4-2 خطایردیابینیرویمطلوب 87
- شکل 4-3 عملکردمناسبسوئیچنمایی 88
- شکل 4-4 سیگنالهایکنترلولتاژ 89
- شکل 4-5 سیگنالهایجر بانموتور 89
- شکل 4-6 سرعتمجرینهاییدر فضایکار 90
- شکل 4-7 وضعیتسطوحلغزش 91

فهرست جداول

- جدول 2-1 پارامترهایدناویت-هارتنبرگ 34
- جدول 2-2 ماتریساینرسیومراکزجرمربطها 39
- جدول 3-1 پارامترهایموتور 60

فصل اول

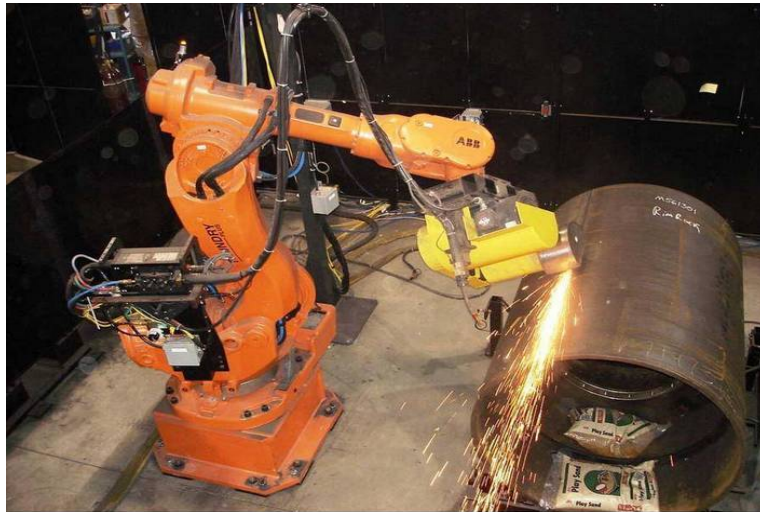
مقدمه و پیشینه‌ی تحقیق

در طول دو دهه گذشته کنترل حرکت در تماس ربات با محیط، یکی از جذابترین حوزه های تحقیقاتی در زمینه رباتیک بوده است. اولین پژوهش ها در این زمینه زمانی صورت پذیرفت که، صاحبان صنایع جهت افزایش سرعت ودقت، نیاز به حضور ربات رادر کارهای پیچیده تری از قبیل اسمبلی کردن و پلیسه کاری که انسان آنها را به راحتی انجام می داد، احساس کردند. در اینجا بود که این سوال مطرح گردید بازوی ماهر ربات، مساله ردیابی مسیر مطلوب را چگونه در مواجهه با مقاومت محیطی تواند همچنان دنبال کند.

راهبردهای کنترل موقعیت در بازوی ماهر، تا هنگامی که در فضا آزاد دنبال می شود، مناسب است. اما هنگامی که مجری نهایی با محیط تماس پیدا می کند، این کنترل به تنهایی کافی نخواهد بود. یک بازوی ماهر ربات را در نظر بگیرید که شیشه پنجره ای را با اسفنج می شوید. به دلیل انعطاف پذیری اسفنج، می توان با کنترل مکان مجری نهایی نسبت به شیشه، نیروی اعمال شده به پنجره را تنظیم کرد. اگر نرمی (انعطاف پذیری)^۱ اسفنج بسیار بالا باشد، یا تعیین مکان شیشه با دقت زیاد انجام گیرد، کنترل مکان به تنهایی می تواند نتیجه مورد نظر را به دست دهد. اما اگر سختی^۲ مجری نهایی ویا ابزار بالا باشد، انجام کارهایی که در آنها بازوی ماهر با سطوح تماس پیدا می کند، بسیار دشوار خواهد شد. فرض کنید بازو به جای شستن پنجره با اسفنج، بخواد رنگ روی شیشه پنجره را با استفاده از یک ابزار تراشنده، پاک کند. انجام این عمل در صورت وجود هرگونه عدم قطعیت در مکان سطح شیشه، یا خطایی در تنظیم مکان بازو، غیر ممکن خواهد شد. این بدان معناست که یا شیشه خواهد شکست ویا بازو ابزار را در مجاورت شیشه بصورت رفت و برگشتی حرکت خواهد داد، بدون آنکه با آن تماس پیدا کند.

1-Compliance
2-Stiffness

در هر دو مورد شستن شیشه و تراشیدن رنگ از روی آن معقول تر خواهد بود اگر به جای تعیین مکان صفحه شیشه، نیرویی که باید بصورت عمود بر سطح شیشه وارد شود، را مشخص کنیم. حال می توانیم بگوییم در مساله تعامل بازوی ماهر ربات با محیط علاوه بر کنترل موقعیت باید نیروهایی که توسط جسم یا محیط به ربات وارد می شود نیز کنترل گردند. در این حالت ربات باید با نیروهای تماس ایجاد شده از طرف محیط خود را تطبیق داده تا اینکه سعی در حذف آنها داشته باشد [1]. در شکل 1-1 نمونه هایی از



ربات ها که در تماس با محیط وظایف مشخصی را انجام می دهند، مشاهده می کنید.

شکل ۱-۱ تصویر اول ربات پلیسه بردار، تصویر دوم ربات جراح [54]

۱-۲ قیدهای سینماتیکی

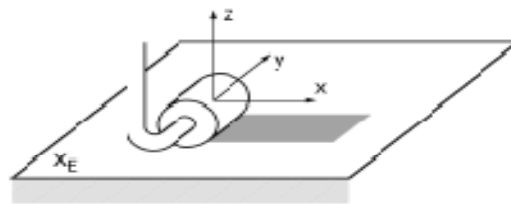
ارتباط دو گانه بین کنترل موقعیت و کنترل نیرو را در نقطه تماس می‌توان بر اساس قیود طبیعی¹ و قیود مصنوعی^۲ بیان نمود. قیود طبیعی موقعیت و نیرو بر اساس هندسه محیط تعریف می‌گردند. برای نمونه، همانطور که در شکل 1-2 مشاهده می‌نمایید، ربات در حال نقاشی بر روی سطح می‌باشد. در راستای محور Z با فرض سطحی با سختی زیاد، امکان نفوذ برای ربات وجود ندارد. لذا در این وضعیت گفته می‌شود که ربات یک درجه آزادی موقعیت در این راستا از دست داده است. در نتیجه یک قید طبیعی حرکت برای ربات در راستا محور Z بوجود آمده است. در دو راستای دیگر Y , X با فرض صفر بودن نیروهای اصطکاک، دارای قید طبیعی نیرو هستیم بدین معنی که هیچ نیرویی از طرف محیط به ابزار ربات اعمال نمی‌گردد. لذا در هر کدام از این دو راستا نیز، ربات یک درجه آزادی نیرو را از دست داده است.

حال به منظور تحقیق کار ربات در محیط مقید، کافی است قیود مصنوعی تعریف و توسط سیستم کنترل اعمال شود. یک قید مصنوعی نسبت به نیرو زمانی وجود دارد که در همان راستا یک قید طبیعی موقعیت وجود داشته باشد و یا بالعکس. در مثال بالا در مقابل قید طبیعی موقعیت در راستا Z ، قید مصنوعی نیرو باید توسط سیستم کنترل بوجود آید. بعبارت دیگر در راستا Z از طرف ربات بر محیط نیرو وارد آید. همچنین در دو راستا Y , X بدلیل عدم وجود اصطکاک قید طبیعی نیرو مطرح می‌گردد. بنابراین در این دو راستا سیستم کنترل باید قید مصنوعی سرعت ثابت را جهت جلوگیری از لغزش بر روی سطح اعمال کند. ذکر این نکته حائز اهمیت است که با توجه به قیود طبیعی ربات نمی‌تواند هم نیرو و هم موقعیت را در راستای یک درجه آزادی، همزمان کنترل کند [2]، همانطور که نمی‌توان هم ولتاژ و هم جریان را در

1-Natural constraint

2-Artificial constraints

یک مقاومت همزمان مشخص نمود. به عبارت دیگر موقعیت یا نیروی هر کدام از درجات آزادی یا بوسیله یک قید طبیعی یا یک قید مصنوعی تعریف می‌شوند. بنابراین تعداد قیود طبیعی و مصنوعی با هم برابر تعداد درجات آزادی فضای مقید هستند. قیود مصنوعی که معمولاً توسط ربات بر فضای کار اعمال می‌گردند، بر پایه قیود طبیعی تعیین می‌شوند [3].



Natural Constraints	Artificial Constraints
$F_x = 0$	$v_x = \dot{V}$
$F_y = 0$	$v_y = 0$
$v_x = 0$	$F_z = 0$
$\omega_x = 0$	$M_x = 0$
$\omega_y = 0$	$M_y = 0$
$M_z = 0$	$\omega_z = 0$

شکل ۱-۲ قیود طبیعی و مصنوعی [15]

اهمیت اطلاع از وضعیت هندسه محیط کار تا حدی است که در صورت عدم دانش کافی نسبت به قیود طبیعی، ممکن است ربات و محیط متحمل خسارات زیاد و در مواقعی جبران ناپذیر شوند. وضعیتی را فرض کنید که در یک راستای مشخص کنترل کننده‌ها جای اعمال کنترل نیرو، کنترل موقعیت را بکار ببرد. در این حالت خطاهای کوچک در موقعیت بعثت سختی متوسط بازوی ربات، نیروهای تماسی نسبتاً بزرگی را سبب می‌شوند و چون ربات کنترلی بر نیروی وارد آمده ندارد، سیستم فیزیکی (ربات + محیط) دچار آسیب‌های احتمالی می‌گردد. شایان ذکر است، راهبردهای کنترلی در این مساله همگی به دنبال یک هدف هستند و آن نیز عبارتست از: اجرای موفق وظیفه ربات در تماس با محیط، بدون به خطر انداختن

خود و محیط اطراف است، که تحقق آن مستلزم نگاهی دقیق به کنترل موقعیت و نیروهای تعاملی می- باشد.

۱-۳- حرکت سازگار یا انعطاف پذیر^۱

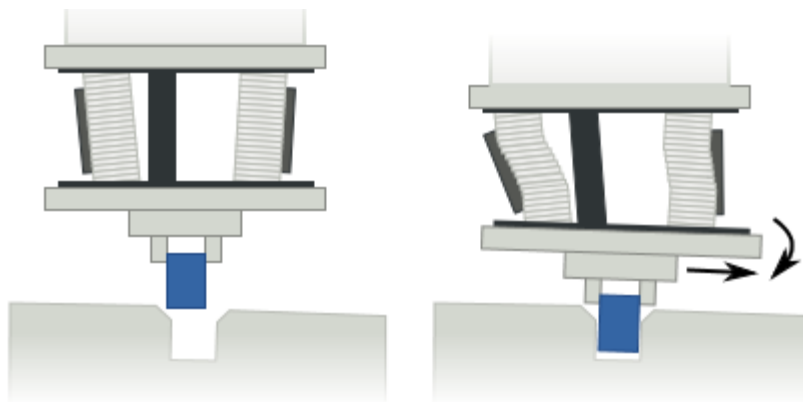
کنترل دقیق موقعیت مجری نهایی^۲ ربات جهت حرکت در نزدیکی سطوح مقید را حرکت سازگار می- نامند. مساله کنترل ربات در طول این سری وظایف به واقع به مساله موقعیت یابی دقیق در عملگر نهایی ختم می-شود. اما بدلیل عیوب احتمالی در فرآیند، سیستم کنترل، سنسورها و غیره متاسفانه این نزدیکی به برخورد با سطح مقید منجر می-شود. که نتیجه باعث پدیدار آمدن نیروهای عکس العمل می-شود. اندازه-گیری این نیروهای تعاملی جهت تشخیص خطا و سپس اصلاح موقعیت بر اساس آنها، کنترل انعطاف پذیر یا سازگار^۳ نامیده می-شود. از این قبیل کارها می-توان به جفت کردن اشیاء در کار بهم بستن آنهاخاطر نشان کرد. مسائلی که با کنترل حرکت انعطاف پذیر مواجه می-شوند، به طور گسترده بررسی و راهبردها و طرحهای کنترلی زیادی با تجزیه و تحلیل دقیق در مورد آنها پیشنهاد شده است [4]. این طرحها را می-توان با توجه به معیارهای مختلفی دسته‌بندی کرد. نخستین سازماندهی در این ارتباط با در نظر گرفتن تعامل ساختاری انعطاف پذیری صورت می-پذیرد [5].

۱-۳-۱- انعطاف پذیری غیر فعال^۴

در این گروه، انعطاف پذیری توسط یک ابزار مکانیکی که به بازوی ربات متصل می-گردد، حاصل می-آید. بر اساس ذات عناصر غیر فعال تشکیل‌دهنده ابزار مانند فنرها و دمپرها و همچنین ساختار بازوها از لحاظ سختی یا انعطاف پذیری، موقعیت مجری نهایی در اثر اعمال نیروهای حاصل از تماس تطبیق داده می-

1-Compliant motion
2- End effector
3-compliant control
4-Passive compliance

شود. در سال 1977 محققى به نام دراک نشان داد که عملیات قراردادن یک پین در یک سوراخ را می توان با معرفی مناسب سختی‌ها جانبی و دورانی در مکانیزم گیرنده آن، تسهیل بخشید. برپایه این اصل استوار نخستین ابزار غیرفعال مکانیکی جهت پیاده‌سازی بر رباتبه نام مرکز انعطاف پذیر کنترل شونده^۱ طراحی گردید [6]. نمونه‌ای از این ابزار را در شکل 1-3 مشاهده می‌کنید. وسایل مکانیکی غیر فعال مانند ابزار فوق مشخصا دارای پاسخ های سریع بوده و نسبتا ارزان هستند. اما کاربرد آنها ضرورتا به یک سری کارهای خاص محدود می‌شود. برای مثال مرکز انعطاف پذیر کنترل شونده تنها می‌تواند پین‌هایی با طول معین و جهت مشخص نسبت به بازو را حمل کند. لذا می‌توان گفت از معایب آنها، عدم قابلیت تغییر



انعطاف‌پذیری در انجام اعمال مختلف بر روی قطعات مختلف است.

شکل ۱-۳ مرکز انعطاف پذیر کنترل شونده [15]

۱-۳-۲- انعطاف پذیری فعال

در این گروه از وظایف، ربات با استفاده از فیدبک نیرو، قوانین کنترلی قابل برنامه ریزی را بوجود می‌آورد. با بکارگیری این قوانین، انعطاف پذیری لازم و یا سختی معینی در وظیفه‌ای خاص، در مواجهه با نیروهای

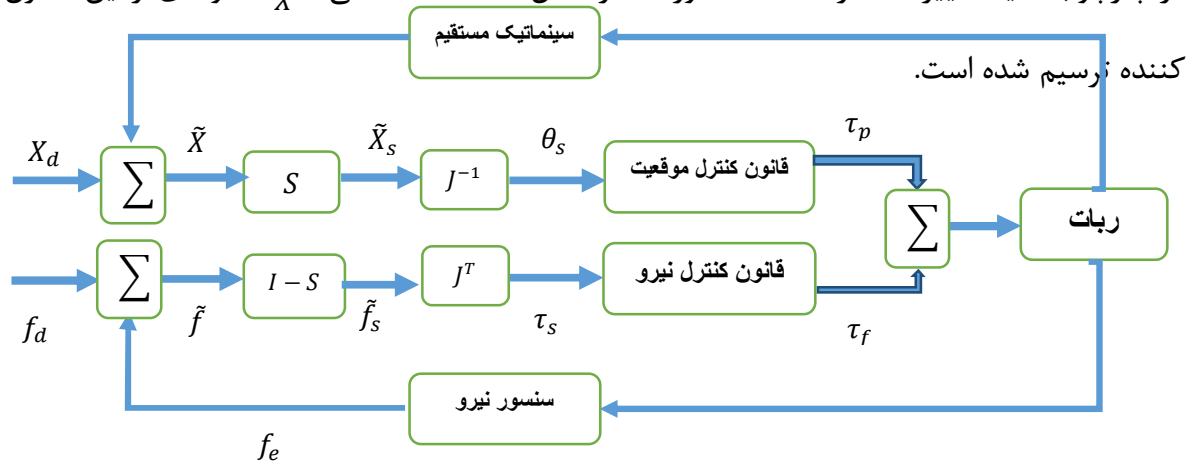
1-Remote center compliance

تعاملی برای نقطه انتهاییفرامهم می‌آورد. از مزایای این روش می‌توان این نکته را یادآور شد که چون به لحاظ نرم افزاری میزان انعطاف پذیری ربات تعیین می‌شود قابلیت هر میزان سختی در بازوی ربات فراهم می‌گردد و می‌توان آن را در وظایف پیچیده بکار بست. جهت پیاده‌سازی مساله انعطاف‌پذیری فعال دو راهبرد کلی مطرح گردید.

۱-۳-۲-۱ - کنترل ترکیبی نیرو-موقعیت

در این روش [7]، نگاه اهم معطوف به قیود طبیعی اعمال شده توسط محیط بر ربات است. بر اساس این چارچوب مقید دو زیر فضای کنترلی متعامد مطرح می‌گردد. کنترل همزمان موقعیت و نیرو در این دو زیر فضای متعامد بدون هیچگونه تداخلی میسر می‌گردد. بنابراین درجات آزادی از حرکت مجری نهایی که توسط محیط مقید محدود گردیده، به کنترل نیرو تخصیص یافته و درجات آزادی دیگر که در آن قیدی توسط محیط برای حرکت آزادانه مجری نهایی وجود ندارد، به کنترل حرکت معطوف می‌گردد. همانطور که قبلا بیان شد، جهت تحقق وظیفه مشخص شده برای ربات با توجه به چارچوب مقید، نیازمند طراحی و بکارگیری قیود مصنوعی در سیستم کنترل می‌باشیم. قیود مصنوعی را می‌توان بر اساس دوگانی از قیود طبیعی تعریف نمود. طراحی این روش کنترلی بر مبنای دو حلقه اصلی تشکیل گردیده است. حلقه داخلی که وظیفه آن جبران ترم های غیرخطی معادلات ربات با استفاده از روش خطی‌سازی فیدبکی و یا تکنیک کنترل دینامیک معکوس است. ورودی این حلقه از جنس شتاب و خروجی آن از جنس گشتاور است. حلقه خارجی که به عنوان یک کنترل اضافی در راستای حصول به اهداف کنترل کلاسیک از قبیل ردیابی، دفع اغتشاش و مقاوم‌سازی طراحی می‌گردد [8]. خروجی این حلقه به شکل شتاب و ورودی آن اطلاعات سنسورهای نیرو و موقعیت و همچنین فرمانهای مطلوب می‌باشد. یک ماتریس قطری به نام ماتریس انتخاب انعطاف‌پذیری در حلقه فیدبک وظیفه فیلتر کردن نیروها و جابه‌جایی‌ها را بر اساس چارچوب مقید بر عهده دارد. با توجه به قیود مصنوعی، راستاهایی که جهت کنترل نیرو در نظر گرفته می‌شوند، مقدار 1)

فرمانهای موقعیت فیلترمی شود) و برای راستاهایی که جهت کنترل موقعیت انتخاب می شوند مقدار 0 (فرمانهای نیرو فیلتر) برای عناصر قطری این ماتریس لحاظ میشود. این انتخاب می تواند بر حسب تغییر در چارچوب مقید تغییر کند. در ادامه همانطور که در شکل 4-1 مشاهده می شود نمونه ای از این کنترل



شکل 4-1 کنترل کننده ترکیبی موقعیت نیرو

۲-۲-۳-۱- کنترل امیدانس

این روش کنترلی برای اولین بار توسط هوگان مطرح گردید [2]. اصول اولیه آن بر اساس تجزیه و تحلیل دقیقی از حرکات بازو انسان و تعمیم آن در مورد بازوی ربات است. بر این اساس نتایج چشمگیری در راستای مفاهیم امیدانس برای کنترل ربات در تماس با محیط صورت پذیرفت [9].

از دیدگاه مکانیکی، امیدانس بهمیزان اندازه کار مکانیکی انتقالی در تماس دو شیء فیزیکی اشاره می کند. بدین صورت که اندازه کار مکانیکی رابطه مستقیم با نیرو و جابه جایی دارد، در نتیجه زمانی که در مساله برخورد دو شیء، نتوان از نیروهای تماسی و یا همچنین اندازه جابه جایی صرف نظر کرد، موضوع انتقال انرژی مکانیکی بر اساس دینامیک تداخل مطرح می گردد. بنابراین امیدانس را می توان یک عملگر دینامیکی

دانست که نیروی خروجی را بر اساس میزان جابه‌جایی ورودی به آن تعیین می‌کند. همچنین ادمیتانس نیز عملگری دینامیکی است که جابه‌جایی خروجی را بر مبنای میزان نیروی ورودی تعیین می‌کند.

از دیدگاه فیزیولوژی، برای روشن شدن مفهوم امپدانس، وضعیتی را در نظر بگیرید که شما قرار است با دستان خود شیئی را با سختی کم (شیئی نرم یا با سختی کم مانند تخم‌مرغ) برداشته و در جایی مشخص قرار دهید. سیستم عصبی حرکتی، متناسب با فیزیک شیئی (نرمی یا سختی آن)، پیکربندی مشخصی برای انگشتان دست شما تنظیم می‌کند، این پیکربندی انگشتان دست معادل ایجاد امپدانس مشخصی در تماس با شیئی است، به گونه‌ای که هیچ‌گونه آسیبینه برای دست شما و نه برای آن شیئی بوجود آید. با توجه به امپدانس کم شیئی در صورت عدم تنظیم امپدانس مناسب توسط سیستم عصبی حرکتی برای انگشتان (یا همان محکم گرفتن انگشتان) وجود کوچکترین خطایی در موقعیت نقطه تماس باعث اعمال نیروی زیادی به شیئی شده و چون شیئی دارای امپدانس کمی است در هم شکسته و آسیب می‌بیند (شکستن تخم‌مرغ). در وضعیت عکس، اگر پیکربندی دست شما بصورت امپدانس خیلی کمی در محل تماس ظاهر شود، باز هم کوچکترین خطای در موقعیت، نیروی لازم را جهت حمل شیئی نمی‌تواند فراهم آورد و شیئی از دست شما رها می‌گردد. وظیفه فوق یکی از راهترین کارهایی است که انسان در طول روز بصورت‌های مختلف و بطور کاملاً خودکار توانایی انجام آن را دارد، ولیکن انجام آن توسط ربات نیازمند الگوریتم‌های بسیار پیچیده‌است. بنابراین تاثیر تنظیم امپدانس مناسب برای ربات بر مبنای امپدانس شیئی برای انجام وظیفه‌ای مشخص در تماس با محیط بوضوح مشهود است.

از دیدگاه کنترلی، می‌توان گفت پیاده‌سازی اولین روش‌های کنترل مبتنی بر فیدبک نیرو در تماس ربات با محیط، مربوط به کنترل امپدانس است [10]. مساله کنترل امپدانس را می‌توان بصورت طراحی کنترل-کننده موقعیتی در نظر گرفت که، نیروی تداخل حاکم بر نقطه تماس را بر اساس اختلاف میان موقعیت واقعی و مطلوب مجری نهایی ایجاد می‌کند. بنابراین هدف کنترلی در کنترل امپدانس با سایر کنترل‌کننده-

های مرسوم متفاوت است، بدین معنا که نتیجه کنترل ردیابی سیگنال ورودی را تضمین نمی‌کند، بلکه کنترل‌کننده با بکارگیری یک قانون کنترل مناسب، باعث جبران اثرات دینامیک‌های پیچیده و غیرخطی ربات‌گردیده و مدل امپدانس مرجع را برای سیستم حلقه بسته در مساله تداخل محقق می‌سازد. بعبارت دیگر ارتباط مطلوب میان نیروهای عمل‌کننده و عکس‌العمل حرکتی ربات را توصیف می‌کند. بنابراین امکان کنترل همزمان برای نیرو و موقعیت بطور مستقل در یک راستا میسر نمی‌شود. لیکن می‌توان با کنترل دینامیک‌های تداخل یا همان کنترل امپدانس بطور نسبی به هدف کنترل موقعیت در حضور نیروهای تداخل رسید. زمانی که برای یک سیستم امپدانس صفر (ادمیتانس بی‌نهایت) مطرح می‌گردد، بدین مفهوم است که نیروی اعمال شده توسط سیستم هیچگونه وابستگی به میزان حرکت در محل تداخل ندارد. این نوع سیستم را می‌توان بعنوان کنترل‌کننده نیرو خالص در نظر گرفت. متقابلاً برای یک سیستم ادمیتانس صفر (امپدانس بی‌نهایت)، بدین مفهوم است که میزان جابه‌جایی توسط سیستم هیچگونه وابستگی به نیروها در محل تداخل ندارد. این نوع سیستم را می‌توان بعنوان کنترل‌کننده موقعیت خالص در نظر گرفت [11].

از دیدگاه ریاضیاتی، امپدانس برای سیستم‌های خطی نامتغیر با زمان معمولاً به فرم یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه دوم که توصیف‌کننده سیستم مکانیکی جرم-فنر-میراکننده است، بیان می‌گردد. با تنظیم ضرایب مربوط به این سه عنصر مکانیکی در رابطه امپدانس، مدل امپدانس مطلوب بدست می‌آید. در سیستم‌های غیرخطی امپدانس اصطلاحی است که برای توصیف رابطه میان نیرو و جابه‌جایی بیان می‌گردد. بطوریکه امپدانس سیستم‌های غیرخطی بصورت امپدانس خطی در نقطه کاری که سیستم در آن خطی شده است، می‌باشد. پس امپدانس تابعی از نقطه کار سیستم خواهد بود.

با نگاهی دقیق به این دو روش کنترل امپدانس و نیرو-موقعیت ترکیبی می‌توان نقاط ضعف آنها را به خوبی دریافت. کنترل ترکیبی موقعیت-نیرو، به درستی رویکردی با توانایی بالایی است که به طور مناسب زیرفضاهای کنترلی را از یکدیگر تمایز می‌دهد، در عین حالیکه می‌تواند کنترل همزمان نیرو و موقعیت را با توجه به محیط در زیر فضاهای مربوطه محقق سازد. چالش اصلی این رویکرد، عدم توجه به امپدانس محیط و ربات می‌باشد. بعبارت دیگر، بر مبنای این روش در صورتی که ربات در خلال انجام وظیفه‌ای مشخص بطور ناگهانی، با سطح تماس برخورد داشته باشد، دچار مشکل می‌شود. در این حالت به علت اینکه در قانون کنترل، امپدانس مناسب ربات با توجه به امپدانس محیط لحاظ نگردیده است، احتمال برخوردهای لحظه‌ای مجری نهایی با سطح تماس و جداسدن از آن بصورت پیاپی بوجود می‌آید. همچنین هنگامی که مجری نهایی در تماس با محیط سختی بوده و بطور ناگهانی از آن جدا و به محیط آزاد بازگردد، با توجه به اینکه قبل از جداسدن، بر روی محیط سخت نیروی قابل توجهی را اعمال می‌کرده، این جداسدن بعلت عدم نگاهی دقیق به مساله امپدانس همراه با نیروی زیادی صورت می‌گیرد. در هر دو وضعیت امکان آسیب دیدگی چه برای ربات و چه برای محیط وجود دارد.

کنترل امپدانس اثرات امپدانس تداخل میان ربات و محیط را در نظر می‌گیرد و با استفاده از مدل امپدانس مرجع مشخص شده، در فضای کار محقق می‌گردد. در حقیقت، اگر با دقت کافی به مساله نگاهی داشته باشید به وضوح مشخص است، کنترل امپدانس یک روش کنترل موقعیت است که به همراه تنظیماتی به واکنش مناسب در برابر نیروهای تماس منجر می‌شود. بدین صورت که موقعیت مطلوب فرمان داده شده و امپدانس جهت حصول به پاسخ نیروی مناسب تنظیم می‌شود. هیچگونه تلاشی در جهت دنبال کردن

نیروی مطلوب صورت نمی‌پذیرد و همچنین هرگونه تفکیک جهت زیرفضاهای کنترلی نادیده گرفته شده است.

بنابراین برای نخستین بار کنترل امپدانس ترکیبی توسط اسپانگ و اندرسون مطرح گردید [8]. این روش کنترلی با تکیه بر ویژگی تفکیک زیرفضاها و همچنین کاربرد مفهوم امپدانس توانست به خوبی معایب هر دو روش فوق را برطرف نماید. الگوریتم کار در اینجا بدین صورت است که ابتدا زیر فضای نیرو و موقعیت با توجه به فضای مقیداز همدیگر تفکیک شده، سپس کنترل‌کننده بر مبنای مفاهیم تئوری مدار در حالت دائمی، با انتخاب امپدانس مناسب در هر زیرفضای هدف مطلوب را محقق می‌سازد. ردیابی موقعیت مطلوب در زیر فضای کنترل موقعیت و ردیابی نیرو مطلوب در زیرفضای کنترل نیرو اجرا می‌گردد.

۱-۴- مروری بر فعالیت‌های گذشته

فعالیت‌های تحقیقاتی گسترده‌ای در ارتباط با کنترل نیرو و امپدانس صورت پذیرفته است. در این میان دسته‌ای از تحقیقات به رفع چالش‌های حوزه کنترل نیرو و امپدانس معطوف گردیدند، و دسته‌ای دیگر به توسعه و ارائه روش‌های جدید در این زمینه‌ها پرداختند.

عدم قطعیت‌ها همواره از مهمترین چالش‌های پیش‌رو در کنترل ربات می‌باشند. در مساله تماس میان ربات با محیط علاوه بر عدم قطعیت‌های مربوط به مدل دینامیکی ربات با گروهی دیگر از عدم قطعیت‌ها در ارتباط با دینامیک تداخل برخورد می‌کنیم. لذا روش‌های کنترلی می‌بایست توانایی لازم جهت غلبه بر هر دو نوع از عدم قطعیت‌ها را داشته باشند. بر این اساس روش‌های مبتنی بر کنترل مقاوم مطرح گردید [13-15]. اما پیاده‌سازی این کنترل‌کننده‌ها با مشکلاتی مواجه بود. زیرا قانون کنترل پیشنهادی در این روش‌ها وابسته به سیگنال‌های شتاب و مشتق نیرو بود. همچنین کنترل امپدانس ترکیبی با استفاده از کنترل تطبیقی مطرح گردید [16-18]، چنانچه که در [19] اشاره شده است، یک فرض اساسی در این مقالات

کتر بودن نرخ تغییرات پارامترهای سیستم از نرخ تنظیمات گین کنترل کننده است. که این خود باعث کاهش قدرت مانور بازوی ربات می شود. در [20-21] برخی طرح های کنترل تطبیقی برای بازوهای ربات صلب ارائه شدند، که در برابر عدم قطعیت های پارامتری و اغتشاش خارجی عملکرد قابل قبولی را ارائه دادند. بکارگیری روش های مبتنی بر کنترل ساختار متغیر در مساله تماس نتایج چشمگیری را از خود نشان داد. پایداری بالا، پاسخ سریع، عدم حساسیت به دینامیک ربات و انحرافات پارامتری و همچنین اغتشاش خارجی از مزایای این الگوریتم کنترلی می باشد [22-23].

از دیگر چالش های در حوزه امیدانس ترکیبی می توان به تعیین دقیق چارچوب مقید جهت تفکیک زیرفضاهای کنترلی اشاره نمود. در سطوح مقیدی که از لحاظ هندسی دارای پیچیدگی هستند، بدلیل اینکه بردارهای تماس وعمود در این سطوح ممکن است، تابعی از موقعیت نقطه تماس باشند. تفکیک زیرفضاهای کنترلی کاری مشکل است. روش پیشنهادی در [24] نیز به دلیل استفاده از مشتقات سیمبولیک¹ معادلات توصیفی از مختصات مقید، کارآمدی لازم را ندارد. در [25] روش دیگری نیز بر مبنای تجزیه ماتریس ژاکوبین به مقادیر تکین در سطح مقید پیشنهاد گردید.

الگوریتم های هوشمند بدلیل ویژگی مهم یادگیری قابلیت بالایی در کنترل ربات دارند [26-28]. در مساله تماس ربات با محیط بعلت وجود دینامیک تداخل که معمولاً ناشناخته است امکان مدل کردن این دینامیک بصورت یک مدل ریاضی مقدور نمی باشد لذا در اینجا می توان از الگوریتم های هوشمند مانند فازی و عصبی استفاده نمود. این الگوریتم ها توانایی مدل کردن سیستم های پیچیده بر اساس اصل آموزش بخوبی دارا می باشند. بر این اساس در زمینه شبکه های عصبی در حوزه امیدانس و نیرو تحقیقات وسیعی صورت گرفت [29-32]. همچنین از شبکه عصبی در زمینه مدل سازی امیدانس محیط نیز استفاده گردیده است [33].

1-Symbolic

کنترل‌کننده‌های فازی نیز بعنوان یک ابزار توانمند در کنترل سیستم‌های همراه با عدم قطعیت پیچیده، تحول شگرفی در مهندسی کنترل بوجود آوردند. در این میان استفاده از بکارگیری کنترل فازی جهت تنظیم نیروی مطلوب در تماس با محیط‌هایی که سختی آنها ناشناخته است، عملکرد مطلوبی را از خود نشان داد [34]. همچنین ترکیب سیستم فازی با روش‌های کنترل مقاوم مانند کنترل ساختار متغیر باعث بهبود پایداری در حالت گذرای سیستم فازی و همچنین غلبه بر عدم قطعیتها در زمینه کنترل نیرو گردید [35-36].

روش‌های ارائه شده برای کنترل نیرو و امپدانس در بازوی ربات، اکثراً براساس راهبرد کنترل گشتاور می‌باشد. اعمال مستقیم این گشتاور به سیستم فیزیکی میسر نیست. زیرا این گشتاور می‌بایست توسط محرکه‌های سیستم فراهم آید. بنابراین نخست باید محرکه‌های ربات را تحریک نمود تا گشتاور مطلوب را تولید کنند. بعلاوه بسیاری از روش‌های کنترلی ارائه شده در حوزه کنترل گشتاور، مبتنی بر مدل نامی ربات هستند. این مدل بسیار پیچیده بوده، بنابراین حجم محاسبات کنترل کننده در این روش‌ها زیاد است و ممکن است در پیاده سازی عملی با مشکلاتی از قبیل حجم حافظه مورد نیاز و زمان نمونه برداری مواجه شویم. سوال اساسی در اینجا مطرح می‌گردد که آیا می‌توان راهبرد مناسب‌تری برای کنترل تماس ربات با محیط ارائه داد، تا چالش‌های روش‌های مبتنی بر گشتاور را مرتفع سازد؟

در پاسخ به این سوال می‌توان به راهبرد کنترل ولتاژ¹ در کنترل ربات‌ها اشاره کرد [37-40]. این راهبرد کنترلی علاوه بر حل چالش‌های کنترل گشتاور، دارای عملکرد مناسب‌تری می‌باشد. در این راهبرد موتورهای الکتریکی به عنوان محرک استفاده می‌شوند و بازوی ربات، بعنوان بار برای این موتورها در نظر گرفته می‌شوند. موتورها بر اساس ولتاژ ورودی به آنها کنترل می‌گردند و در خروجی خود گشتاور مورد نیاز برای مفاصل را بوسیله موقعیت زاویه ای روتور فراهم می‌کنند. در این روش با مدل موتور که بسیار

1-Voltage control strategy

ساده‌تر از مدل پیچیده ربات است، سروکار داریم. لذا بار محاسباتی کنترل کننده بسیار کمتر خواهد شد. همچنین امکان پیاده‌سازی عملی قانون کنترل ولتاژ بر روی ربات وجود دارد. مقاوم بودن راهبرد کنترل ولتاژ در برابر عدم قطعیه‌ها بویژه مدل دینامیکی ربات یک ویژگی منحصر به فرد را در مساله تماس برای طراحی قانون کنترل فراهم می‌کند. قوانین کنترلی مبتنی بر گشتاور در مساله تماس، باید بر تمامی دینامیک‌های غیرخطی مدل ربات در سیستم حلقه بسته غلبه کنند و مدل امپدانس خطی را در نقطه تماس حاکم کنند. این در حالیست که قانون کنترل ولتاژ مستقل از مدل ربات است و تحقق مدل امپدانس مطلوب را بمراتب دقیق‌تر انجام می‌دهد. [41] عملکرد بسیار مناسب بکارگیری راهبرد کنترل ولتاژ در تحقق مدل مطلوب امپدانس در فضای کار را نشان می‌دهد.

۱-۵-اهدافتحقیق

موضوع این پایان‌نامه کنترل امپدانس ترکیبی با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژی باشد. در این خصوص مدل‌سازی جدیدی برای سیستم تحت کنترل، طراحی کنترل‌کننده‌ای مقاوم و تحلیل پایداری سیستم انجام می‌شود. با توجه به این موضوع که عدم قطعیت هم در مدل ربات و هم نسبت به مدل محیط در فضای کار مطرح است. کنترل‌کننده باید توانایی لازم راجهت غلبه بر این عوامل را داشته و به دنبال تحقق مدل امپدانس مطلوب باشد. در این پایان‌نامه، روشی ترکیبی از رویکردهای کنترل فازی و کنترل ساختار متغیر ارائه می‌گردد. بر این اساس دیگر نیازی به اطلاع از کران عدم قطعیت‌ها و استفاده از توابع محدودیت‌نیست. همچنین پدیده نامطلوب لرزش که جزء لاینفک کنترل ساختار متغیر است، توسط کنترل انتگرالی- تناسبی حذف گردیده است. در مساله سوئیچ بین روش‌های کنترلی که بعنوان یکی از چالش‌های کنترل امپدانس ترکیبی است، از توابعی با آهنگ تغییرات نرم در زمان سوئیچ استفاده شده است.

۱-۶- طرح کلی پایان نامه

در فصل 2 مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی بازو ماهر اسکارا ارائه می گردد.

در فصل 3 روش کنترل امیدانس ترکیبی توضیح داده می شود. سپس قانون کنترل بر اساس هم ولتاژ و هم گشتاور پیشنهاد می شود. کنترل کننده پیشنهادی در این فصل مبتنی بر مدل می باشد. در پایان این فصل هر دو راهبرد کنترل ولتاژ و گشتاور در تحقق امیدانس ترکیبی مورد مقایسه قرار می گیرند.

در فصل 4 ابتدا مدل سیستم بر اساس فرم معادلاتی مورد نیاز در کنترل ساختار متغیر اصلاح می گردد. سپس روش کنترل امیدانس ترکیبی مقاوم بر اساس راهبرد کنترل ولتاژ مطرح می شود. در این فصل موضوع عدم قطعیت ها مطرح و قانون کنترل مقاوم جهت تحقق امیدانس ترکیبی در فضای کار پیشنهاد می گردد. در فصل 5 به نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات پرداخته می شود.

فصلدوم

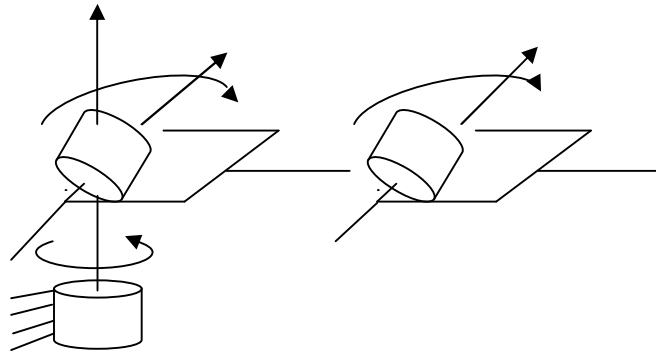
مدلسازی سینماتیکی و دینامیکی بازوهای ماهر اسکارا

در این فصل چگونگی بدست آوردن مدل ریاضی بازوهای ماهر مکانیکی را بیان می‌کنیم. مدل سازی ربات ها بصورت مدل سازی سینماتیکی و دینامیکی تشریح می‌گردد [3]. معادلات مربوط به حرکت ربات در مدل سازی سینماتیکی بدست می‌آید. با بکارگیری جدول دناویت هارتنبرگ، روش منظمی برای انجام سینماتیک مستقیم ارائه می‌دهیم. در مدلسازی دینامیکی روابط انرژی جنبشی و پتانسیل ربات را بدست می‌آوریم. سپس با استفاده از روش‌های مکانیک تحلیلی مدل دینامیکی ربات را بدست می‌آوریم. در پایان، مدل ریاضی ربات اسکارا ارائه شده است.

۲-۲- سینماتیک مستقیم

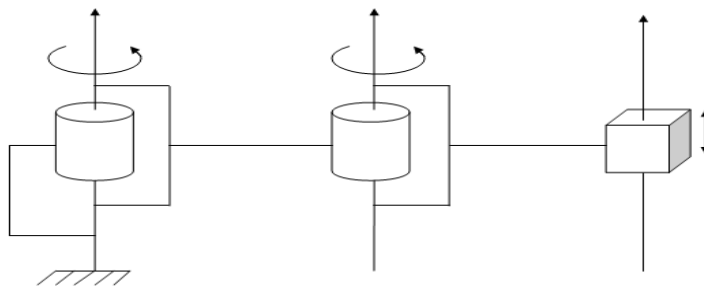
مساله سینماتیک مستقیم معطوف به ارتباط میان مفاصل بازوی ربات و موقعیت و جهت‌گیری ابزار یا مجری نهایی می‌باشد. می‌توان گفت سینماتیک مستقیم تعیین جهت و موقعیت مجری نهایی با توجه به مقادیر متغیرهای مفاصل می‌باشد. همانطور که قبلا هم بیان گردید یک بازوی رباتیک مجموعه‌ای از رابط‌ها است که توسط مفاصل مختلف به یکدیگر متصل گردیده‌اند. یک بازوی ربات با تعداد n مفصل همواره $n + 1$ رابط را دربردارد. مفاصل رباتها به دو نوع کشویی و لولایی تقسیم می‌شوند. مفصل لولایی (که به اختصار با R نمایش داده می‌شود) امکان چرخش نسبی بین دو رابط را فراهم می‌آورد. مفصل کشویی (که با نماد P نشان داده می‌شود) اجازه حرکت نسبی طولی بین دو رابط را می‌دهد. متغیرهای مفاصل در مفصل لولایی زاویه بین دو رابط و در مفاصل کشویی طول رابط می‌باشد. پیکربندی‌های مختلفی با توجه به چگونگی ترتیب مفاصل رباتها وجود دارد. پیکربندی‌های متداول عبارتند از: هنرمند، استوانه‌ای، اسکارا، استنفورد و کروی. در پیکربندی هنرمند سه مفصل لولایی وجود دارد. در بازوی ماهر استوانه‌ای اولین مفصل از نوع لولایی می‌باشد که اجازه چرخش حول پایه را فراهم می‌آورد و دو مفصل

بعدي كشويي هستنـد. دياگرام مفصلي اين ربات در شكل 1-2 رسم شده است. دياگرام مفصلي رباتهاي

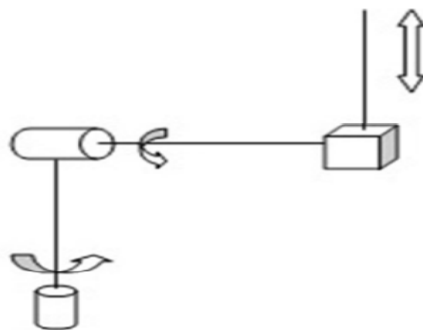


اسكارا، استنفورد و كروي نيز به ترتيب در شكلهاي 2-2 تا 4-2 رسم شده‌اند.

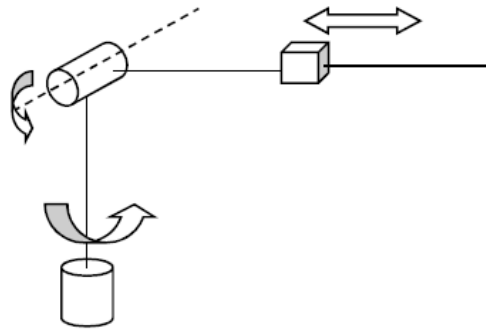
شكل ۱-۲ رباتهنرمند



شكل ۲-۲ ربات اسكارا



شكل ۳-۲ ربات استنفورد



شکل ۲-۴ دیگرام مفصلی ربات کروی

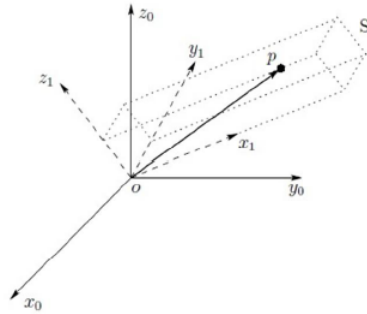
دناویت-هارتنبرگ بعنوان روشی منظم و منسجم برای مدلسازی سینماتیکی انواع رباتها بکار می‌رود. تحلیل سینماتیک مستقیم (تعیین موقعیت و جهت مجری نهایی با استفاده از متغیرهای مفاصل) با استفاده از این تکنیک انجام می‌شود. برای انجام این کار ابتدا باید ماتریس‌های تبدیل و دوران و بردار انتقال را معرفی کنیم.

۲-۲-۱- ماتریس دوران

فرض کنید P_0 نمایش نقطه P در دستگاه مختصات $\{0\}$ با محورهای $\{x_0, y_0, z_0\}$ باشد و P_1 نمایش همان نقطه در دستگاه مختصات $\{1\}$ با محورهای $\{x_1, y_1, z_1\}$ باشد. همان طور که در شکل 2-5 مشاهده می‌شود، مبدأ این دو دستگاه نقطه O می‌باشد، اما محورهای آنها نسبت به هم دوران یافته است. با استفاده از ماتریس دوران و P_0 می‌توانیم P_1 را بدست آوریم و بالعکس. به راحتی می‌توان نشان داد [3] که R_1^0 توصیف دستگاه $\{0\}$ در دستگاه $\{1\}$ به صورت زیر بدست می‌آید.

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} i_0 \cdot i_1 & j_0 \cdot i_1 & k_0 \cdot i_1 \\ i_0 \cdot j_1 & j_0 \cdot j_1 & k_0 \cdot j_1 \\ i_0 \cdot k_1 & j_0 \cdot k_1 & k_0 \cdot k_1 \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

$\{i, j, k\}$ بردارهای یکه دستگاههای مختصات می‌باشند که در هم ضرب نقطه‌ای می‌شوند.



شکل ۲-۵ محورهای مختصات دوران یافته

همچنین روابط زیر به سادگی قابل اثبات می‌باشند [3].

$$P_1 = R_1^0 P_0 \quad , \quad P_0 = R_0^1 P_1 \quad (2-2)$$

$$R_0^1 = R_1^0 T = R_1^0^{-1} \quad (3-2)$$

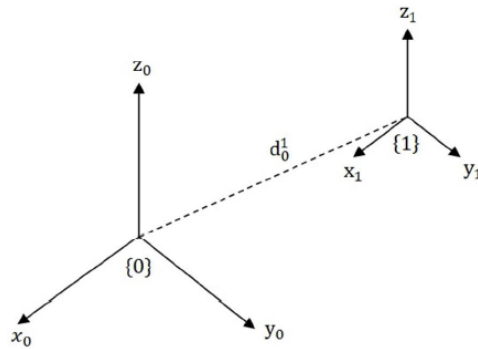
به عنوان مثال اگر دستگاه {1} از دوران دستگاه {0} حول محور z_0 به اندازه زاویه θ بوجود آمده باشد، خواهیم داشت:

$$R_0^1 = R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

۲-۲-۲ بردار انتقال

فرض کنید در شکل 2-6 محورهای دستگاه‌های {0} و {1} موازی باشند و بردار d_0^1 برداری از مبدأ O_0 به مبدأ O_1 است که در دستگاه {0} بیان می‌شود. مطابق قبل، هر نقطه دو نمایش P_0 و P_1 دارد که به صورت زیر به هم مربوط می‌شوند.

$$P_0 = P_1 + d_0^1 \quad (5-3)$$



شکل ۲-۶ دستگاه مختصات انتقال یافته

بیشترین رابطه کلی بین دستگاه‌های مختصات به صورت ترکیب دوران خالص و انتقال خالص می‌تواند باشد و به عنوان حرکت صلب معرفی می‌شود [3]. اگر دو حرکت صلب به صورت زیر داشته باشیم:

$$P_0 = R_0^1 P_1 + d_0^1 \quad (6-2)$$

$$P_1 = R_1^2 P_2 + d_1^2 \quad (7-2)$$

ترکیب آنها حرکت صلب سومی را تعریف می‌نماید که می‌توانیم با جایگذاری P_1 از (7-2) در (6-2) بیان کنیم.

$$P_0 = R_0^1 R_1^2 P_2 + R_0^1 d_1^2 + d_0^1 \quad (8-2)$$

چون رابطه بین P_0 و P_2 یک حرکت صلب است می‌توانیم آن را به صورت زیر بیان کنیم:

$$P_0 = R_0^2 P_2 + d_0^2 \quad (9-2)$$

بنابراین، داریم:

$$R_0^2 = R_0^1 R_1^2 \quad (10-2)$$

$$d_0^2 = R_0^1 d_1^2 + d_0^1 \quad (11-2)$$

تساوی ماتریسی زیر

$$\begin{bmatrix} R_0^1 & d_0^1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1^2 & d_1^2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0^1 d_1^2 & R_0^1 d_1^2 + d_0^1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12-2)$$

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

$$T_0^n = A_1 A_2 \dots A_{n-1} A_n = \begin{bmatrix} R_0^n & d_0^n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13-2)$$

که به آن ماتریس تبدیل همگن می‌گوییم. همچنین ماتریس‌های همگن A_i ، مختصات یک نقطه از دستگاه مختصات i را به دستگاه مختصات $i+1$ تبدیل می‌کند. به عنوان مثال، ماتریس تبدیل همگن T که دوران α درجه حول محور X ، سپس انتقال b واحدی در امتداد محور X فعلیو بعد انتقال d واحدی در امتداد محور فعلی Z و بعد دوران θ درجه حول محور فعلی Z دارد به صورت زیر می‌باشد:

$$T = Rot_{x,\alpha} Trans_{x,b} Trans_{z,d} Rot_{z,\theta}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_\alpha & -s_\alpha & 0 \\ 0 & s_\alpha & c_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & -s_\theta & 0 & 0 \\ s_\theta & c_\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14-2)$$

که در آن در c_θ نماد $\cos(\theta)$ و s_θ نشان دهنده $\sin(\theta)$ است. در دناویت هارتنبرگ نیز هر ماتریس تبدیل A_i به صورت چهار ضرب تبدیل پایه نشان داده می‌شود:

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} \times Trans_{z,d_i} \times Trans_{x,a_i} \times Rot_{x,\alpha_i}$$

$$= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\alpha_i}s_{\theta_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i}c_{\theta_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15-2)$$

کمیت‌های $\theta_i, \alpha_i, d_i, a_i$ در بخش بعد در میان دستورالعمل دناویت هارتنبرگ تعریف خواهند شد. در ربات‌هایی با $n + 1$ رابط، رابط‌ها را از صفر تا n شماره گذاری می‌کنیم از پایه ربات به عنوان رابط صفر استفاده می‌کنیم و مفاصل را از یک تا n شماره گذاری می‌کنیم. به انتهای هر رابط یک دستگاه مختصات متصل می‌کنیم. شماره این دستگاه مختصات همان شماره رابط است.

۲-۲-۳- الگوریتم دناویت-هارتنبرگ

با این مقدمات، دستورالعمل دناویت-هارتنبرگ را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

مرحله 1: محورهای مفاصل را Z_0, \dots, Z_{n-1} قرار داده و نامگذاری کنید.

مرحله 2: دستگاه پایه را نصب کنید. مبدأ را در هر جای دلخواه روی محور Z_0 تنظیم کنید.

محورهای x_0 و y_0 را با در نظر گرفتن دستگاه راستگرد به طور مناسب انتخاب کنید. برای $i = 1, \dots, n - 1$ ، مرحله‌های 3 تا 5 را اجرا نمایید.

مرحله 3: مبدأ O_i را جایی که عمود مشترک Z_i و Z_{i-1} ، Z_i را قطع می‌کند قرار دهید. اگر Z_{i-1} و Z_i متقاطع هستند نقطه O_i را در نقطه تقاطع قرار دهید. اگر Z_{i-1} و Z_i موازی هستند O_i را در محل مفصل i قرار دهید.

مرحله 4: x_i را در امتداد عمود مشترک بین Z_i و Z_{i-1} و در عبور از O_i قرار دهید. وقتی Z_i و Z_{i-1} متقاطع هستند در جهت عمود به صفحه Z_i و Z_{i-1} قرار دهید.

مرحله 5: y_i را با تکمیل دستگاه راستگرد مشخص سازید.

مرحله 6: دستگاه مختصات قسمت پایانی x_n, y_n, z_n را تعیین کنید.

مرحله 7: یک جدول از پارامترهای رابط $\theta_i, \alpha_i, d_i, a_i$ درست کنید.

a_i : طول امتداد x_i از O_i تا محل تقاطع محورهای x_i و Z_{i-1} می‌باشد.

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 می‌شود.

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

مرحله 8: ماتریس‌های تبدیل همگن A_i را با جایگذاری پارامترهای بالا در (2-15) تشکیل دهید.

مرحله 9: $T_0^n = A_1 \dots A_n$ را تشکیل دهید. این ماتریس تبدیل موقعیت و جهت دستگاه آخرین دستگاه مختصات را در دستگاه مختصات پایه نشان می‌دهد.

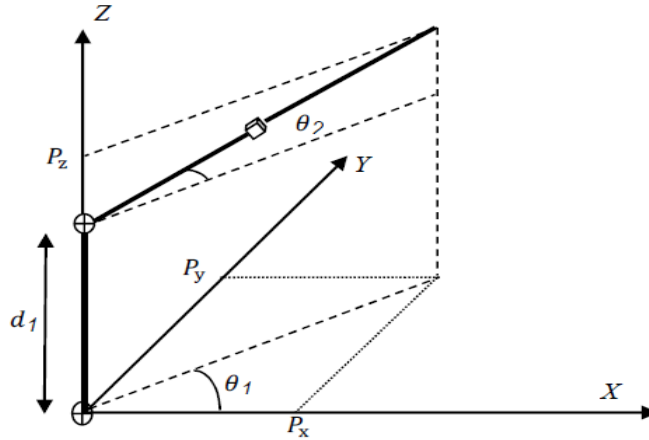
۲-۳- سینماتیک وارون

منظور از سینماتیک وارون یافتن متغیرهای مفاصل به ازای موقعیت و جهت مجری نهایی است. برای سینماتیک وارون الگوریتم مشخصی ارائه نشده است و با توجه به پیچیدگی خاص هر ربات انجام می‌شود. فرض کنید مختصات مجری نهایی $P = [p_x, p_y, p_z]^T$ معلوم است و می‌خواهیم متغیرهای مفاصل را بر حسب آن بیان کنیم. با استفاده از دیاگرام مفصلی نشان داده شده در شکل 2-7 و استفاده از روابط هندسی و مثلثاتی روابط زیر به سادگی بدست می‌آیند.

$$\theta_1 = \text{atan2}(p_x, p_y) \quad (21-3)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(\sqrt{p_x^2 + p_y^2}, p_z - d_1) \quad (22-2)$$

$$d_3 = \sqrt{(p_z - d_1)^2 + p_x^2 + p_y^2} \quad (23-2)$$



شکل ۲-۷: دیاگرام مفصلی در مختصات دکارتی

۴-۲- ماتریس ژاکوبین

هنگامیکه ربات دارای حرکت است، هم متغیرهای مفاصل و هم موقعیت و جهت مجری نهایی تابعی از زمان می‌گردد. ژاکوبین به خوبی ارتباط میان سرعت‌های خطی و زاویه‌ای (v) و (w) ناشی از این حرکت مجری نهایی در فضای دکارتی یا همان فضای کار را با بردار سرعت مفاصل (\dot{q}) را بیان می‌کند. روابط سرعت ربات بوسیله ماتریس ژاکوبین بدست می‌آیند. این ماتریس یکی از مهمترین کمیت‌های تحلیل و کنترل حرکت ربات محسوب می‌شود. ماتریس ژاکوبین در طراحی مسیرهای هموار، تعیین ترکیب‌های تکین، تبدیل نیروها و گشتاورها از مجری نهایی به مفاصل به کار می‌رود. رابطه سرعت‌ها در فضای مفصلی و فضای کار به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (24-2)$$

روابط بدست آوردن ژاکوبین به صورت زیر خلاصه می‌شود. (چگونگی بدست آوردن این روابط به تفصیل در [3] ارائه شده است.)

ماتریس ژاکوبین برای مفاصل کشویی:

$$J_i = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25-2)$$

ماتریس ژاکوبین برای مفاصل لولایی:

$$J_i = \begin{bmatrix} J_v \\ J_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times (O_n - O_{i-1}) \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (26-2)$$

ژاکوبین بازوی ماهر اسکارا همراه با سه مفصل لولایی 1 و 2 و 4، و یک مفصل کشویی 3 به صورت زیر است.

با توجه به این نکته که $O_4 - O_3$ موازی Z_3 است داریم

$$z_3 \times (O_4 - O_3) = 0 \quad (27-2)$$

$$J = [J_1 J_2 J_3 J_4] = \begin{bmatrix} z_0 \times (o_4 - o_0) & z_1 \times (o_4 - o_1) & z_2 & 0 \\ z_0 & z_1 & 0 & z_3 \end{bmatrix} \quad (28-2)$$

که در آن

$$z_{i-1} = R_{i-1}^0 k \quad (29-2)$$

$$k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (30-2)$$

$$O_1 = \begin{bmatrix} a_1 c_1 \\ a_1 s_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (31-2)$$

$$O_2 = \begin{bmatrix} a_1 c_1 + a_2 c_{12} \\ a_1 s_1 + a_2 s_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (32-2)$$

$$O_4 = \begin{bmatrix} a_1 c_1 + a_2 c_{12} \\ a_1 s_2 + a_2 s_{12} \\ d_3 - d_4 \end{bmatrix} \quad (33-2)$$

$$z_0 = z_1 = k \quad , \quad z_2 = z_3 = -k \quad (34-2)$$

بنابراین ماتریس ژاکوبین به صورت زیر می باشد:

$$J = \begin{bmatrix} -a_1 s_1 - a_2 s_{12} & -a_2 s_{12} & 0 & 0 \\ a_1 c_1 + a_2 c_{12} & a_2 c_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (35-2)$$

نمادهای اختصاری C_i, S_i, S_{ij}, C_{ij} به ترتیب بیانگر توابع $\sin(\theta_i), \cos(\theta_i), \sin(\theta_i + \theta_j), \cos(\theta_i + \theta_j)$ می باشند.

۲-۴-۱- وضعیت های تکین

به ازای برخی مقادیر متغیرهای ربات، مرتبه ماتریس ژاکوبین کاهش پیدا می کند که به آنها وضعیت های تکین ربات گفته می شود.

وضعیت های تکین به دلایل زیر حائز اهمیت هستند:

- در وضعیت های تکین، برخی جهات معینی از حرکت، قابل اجرا نمی باشد.

- در تکین‌ها ممکن است سرعت‌های محدود مجری نهایی به سرعت‌های نامحدود مفاصل منجر شود.

- نزدیک تکین‌ها راه حل یگانه‌ای برای سینماتیک وارون وجود ندارد. ممکن است پاسخ وجود نداشته باشد یا بی‌شمار پاسخ داشته باشیم.

- در تکین‌ها ممکن است نیروها و گشتاورهای محدود مجری نهایی به سرعت‌های نامحدود مفاصل منجر شود.

۲-۵- مدل‌سازی دینامیکی

برای بدست آوردن مدل دینامیکی ربات انرژی‌های جنبشی و پتانسیل ربات را محاسبه می‌کنیم. سپس لاگرانژین سیستم را تشکیل می‌دهیم. آنگاه با استفاده از معادلات اویلر لاگرانژ معادله دینامیکی ربات بدست می‌آید.

۲-۵-۱- 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.

$$KE = \frac{1}{2} \dot{q}^T (\sum_{i=1}^n (m_i J_v^T J_v + J_w^T R_i I_i R_i^T J_w)) \dot{q} \quad (2-36)$$

J_v و J_w از روابط (2-25) و (2-26) 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 اینرسی یا تانسور لختی می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I = \int_A \begin{bmatrix} -(p_z^2 + p_y^2) & p_x p_y & p_x p_z \\ p_x p_y & -(p_x^2 + p_z^2) & p_z p_y \\ p_x p_z & p_z p_y & -(p_x^2 + p_y^2) \end{bmatrix} dm \quad (37-2)$$

اگر تعریف کنیم:

$$D(q) = (\sum_{i=1}^n (m_i J_v^T J_v + J_w^T R_i I_i R_i^T J_w)) \quad (38-2)$$

خواهیم داشت:

$$KE = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (43-2)$$

$D(q)$ ماتریس اینرسی ربات نام دارد.

۲-۵-۲- انرژی پتانسیل

انرژی پتانسیل گرانشی ربات با قرار دادن مبدأ دستگاه مختصات رابط در مرکز جرم آن و استفاده از رابطه معروف mgh به صورت زیر محاسبه می‌شود. r_{c_i} مختصات مرکز جرم می‌باشد.

$$PE = g^T r_{c_i} m_i \quad (39-2)$$

$$PE = g^T (m_1 d_0^{c_1} + m_2 d_0^{c_2} + m_3 d_0^{c_3}) \quad (40-2)$$

$$g^T = [0 \quad 0 \quad 9.81] \quad (41-2)$$

۳-۵-۲ لاگرانژین

لاگرانژین عبارتست از اختلاف انرژی جنبشی و پتانسیل. بنابراین می‌توان نوشت:

$$L = KE - PE \quad (42-2)$$

$$L = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} - PE \quad (43-2)$$

۲-۵-۴- معادله اویلر-لاگرانژ

معادله دینامیکی ربات با قرار دادن لاگرانژین از رابطه (42-2) در معادله اویلر-لاگرانژ که به صورت زیر بیان می‌شود، بدست می‌آید.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (44-2)$$

با جایگذاری لاگرانژین در رابطه فوق و انجام محاسبات لازم، معادله دینامیکی ربات به صورت زیر بدست می‌آید.

$$D(q)\ddot{q} + \dot{D}(q)\dot{q} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q} (\dot{q}^T D(q) \dot{q}) + \frac{\partial}{\partial q} PE = \tau \quad (45-2)$$

که معمولاً به فرم زیر بیان می‌شود:

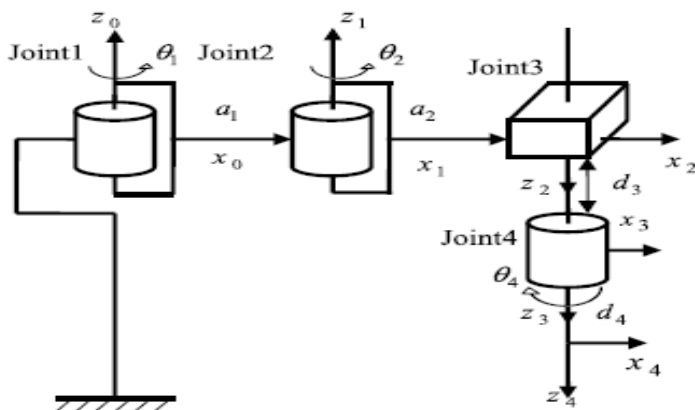
$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (46-2)$$

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

۶-۲- مدلسازی سینماتیکی و دینامیکی ربات اسکارا

۱-۶-۲- مدلسازی سینماتیکی

ربات اسکارا 4 رابط دارای 3 مفصل لولایی و 1 مفصل کشویی است که در شکل 2-9 دیاگرام مفصلی آن



را مشاهده می کنید.

شکل ۲-۸ دیاگرام مفصلی

برطبق روش دناویت-هارتنبیگ دستگاه مختصات را بر روی مفاصل ربات قرار می دهیم. جدول پارامترهای ربات بصورت زیر می باشد.

جدول ۱-۲ جدول پارامترهای دناویت-هارتنبیگ

i	$\theta(rad)$	$d(m)$	$a(m)$	$\alpha(rad)$
1	θ_1	0	$a_1 = .6$	0
2	θ_2	0	$a_2 = .4$	π
3	0	d_3	0	0

4	θ_4	$d_4 = 0.08$	0	0
---	------------	--------------	---	---

حال با استفاده از روابط (2-13) تا (2-15) ماتریس‌های تبدیل همگن A را بدست می‌آوریم.

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_{\theta_1} & -S_{\theta_1} & 0 & a_1 C_{\theta_1} \\ S_{\theta_1} & C_{\theta_1} & 0 & a_1 C_{\theta_1} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (47-2)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C_{\theta_2} & S_{\theta_2} & 0 & a_2 C_{\theta_2} \\ S_{\theta_2} & -C_{\theta_2} & 0 & a_2 C_{\theta_2} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (48-2)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (49-2)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C_{\theta_4} & -S_{\theta_4} & 0 & a_4 C_{\theta_4} \\ S_{\theta_4} & -C_{\theta_4} & 0 & a_4 C_{\theta_4} \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (50-2)$$

اکنون ماتریس تبدیل را با توجه به رابطه (2-13) بدست می‌آوریم.

$$T_0^4 = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{43} \end{bmatrix} \quad (51-2)$$

$$T_{11} = C_{\theta_4} (C_{\theta_1} C_{\theta_2} - S_{\theta_1} S_{\theta_2}) + S_{\theta_4} (C_{\theta_1} S_{\theta_2} + S_{\theta_1} C_{\theta_2})$$

$$T_{12} = -S_{\theta_4} (C_{\theta_1} C_{\theta_2} - S_{\theta_1} S_{\theta_2}) + C_{\theta_4} (C_{\theta_1} S_{\theta_2} + S_{\theta_1} C_{\theta_2})$$

$$T_{13} = T_{23} = T_{31} = T_{32} = T_{41} = T_{42} = T_{43} = 0$$

$$T_{14} = a_2(C_{\theta_1}C_{\theta_2} - S_{\theta_1}S_{\theta_2}) + a_1C_{\theta_1}$$

$$T_{21} = C_{\theta_4}(C_{\theta_1}S_{\theta_2} + S_{\theta_1}C_{\theta_2}) + S_{\theta_4}(-C_{\theta_1}C_{\theta_2} + S_{\theta_1}S_{\theta_2})$$

$$T_{22} = C_{\theta_4}(-C_{\theta_1}C_{\theta_2} + S_{\theta_1}S_{\theta_2}) - S_{\theta_4}(C_{\theta_1}S_{\theta_2} + S_{\theta_1}C_{\theta_2})$$

$$T_{24} = a_2(S_{\theta_1}C_{\theta_2} + C_{\theta_1}S_{\theta_2}) + a_1S_{\theta_1}$$

$$T_{33} = -1$$

$$T_{34} = -d_4 - \theta_3$$

$$T_{44} = 1$$

نمادهای اختصاری C, S بیانگر توابع \cos, \sin می باشند.

۲-۶-۲- مدلسازی دینامیکی

در این قسمت نخست ماتریس‌های تبدیل ربات را محاسبه نموده، سپس به کمک آنها ماتریس‌های دوران، d, J_v, J_w و ماتریس D را بدست می آوریم. بعد از آن انرژی پتانسیل و جنبشی را جهت محاسبه مدل دینامیکی ربات حساب می کنیم. بر اساس رابطه (2-46) داریم:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (52-2)$$

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \end{bmatrix} \quad q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} \quad (53-2)$$

در ادامه $[x_i, y_i, z_i]$ مختصات مرکز جرم رابط i ام در دستگاه i ام است. عناصر ماتریس‌های G, C, D بصورت زیر می شوند.

$$\begin{aligned}
D_{11} = & 2m_1a_1x_1 + 2m_3a_2x_3 + 2m_2a_2x_2 + m_1y_1^2 + m_3x_3^2 + m_3a_2^2 + m_2a_2^2 + m_3y_3^2 \\
& + m_4a_2^2 + m_3a_1^2 + m_4x_4^2 + m_1a_1^2 + m_4a_1^2 + m_1x_1^2 + m_2a_1^2 + m_2x_2^2 \\
& + m_4y_4^2 + 2m_2a_1x_2 \cos(q_2) + 2m_3a_2a_1 \cos(q_2) + 2m_3a_1y_3 \sin(q_2) \\
& + 2m_2a_2a_1 \cos(q_2) - 2m_4a_2y_4 \sin(q_4) + 2m_4a_2x_4 \cos(q_4) \\
& + 2m_2a_1y_2 \sin(q_2) + 2m_3a_1x_3 \cos(q_2) + 2m_4a_2a_1 \cos(q_2) + I_{zz3} \\
& + 2m_4a_1x_4 \cos(q_2 - q_4) + I_{zz1} + 2m_4a_1y_4 \sin(q_2 - q_4) + I_{zz2} + I_{zz4}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{12} = & 2m_3a_2x_3 + 2m_2a_2x_2 + m_3x_3^2 + m_3a_2^2 + m_2a_2^2 + m_3y_3^2 + m_4a_2^2 + m_4x_4^2 + m_2x_2^2 \\
& + m_4y_4^2 + m_2y_2^2 + m_2a_1x_2 \cos(q_2) + m_3a_2a_1 \cos(q_2) + m_3a_1y_3 \sin(q_2) \\
& + m_2a_2a_1 \cos(q_2) - 2m_4a_2y_4 \sin(q_4) + 2m_4a_2x_4 \cos(q_4) \\
& + m_2a_1y_2 \sin(q_2) + m_3a_1x_3 \cos(q_2) + m_4a_2a_1 \cos(q_2) + I_{zz3} \\
& + m_4a_1x_4 \cos(q_2 - q_4) + m_4a_1y_4 \sin(q_2 - q_4) + I_{zz2} + I_{zz4}
\end{aligned}$$

$$D_{13} = 0$$

$$\begin{aligned}
D_{14} = & -m_4a_2x_4 \sin(q_4) - m_4y_4^2 - m_4a_1x_4 \cos(q_2 - q_4) - m_4a_1y_4 \cos(q_2 - q_4) \\
& + m_4a_2y_4 \sin(q_4) - m_4x_4^2 - I_{zz4}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{22} = & m_2y_2^2 + 2m_3a_2x_3 + m_2x_2^2 + 2m_4a_2x_4 \cos(q_4) + m_4y_4^2 + 2m_2a_2x_2 + I_{zz3} - 2 \\
& + m_3y_3^2 + m_3a_2^2 + m_4a_2^2 + I_{zz2} + I_{zz4} + m_3x_3^2 + m_2a_2^2
\end{aligned}$$

$$D_{23} = 0$$

$$D_{24} = -m_4a_2x_4 \cos(q_4) - m_4y_4^2 - m_4x_4^2 + m_4a_2y_4 \sin(q_4) - I_{zz4}$$

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

$$D_{34} = 0$$

$$D_{44} = m_4y_4^2 + m_4x_4^2 + I_{zz4}$$

$$\begin{aligned}
C_{11} = & -\dot{q}_2m_4a_1x_4 \sin(q_2 - q_4) + \dot{q}_2m_4a_1y_4 \cos(q_2 - q_4) + \dot{q}_2m_2a_1y_2 \cos(q_2) \\
& - \dot{q}_2m_2a_1x_2 \sin(q_2) - \dot{q}_2m_2a_2a_1 \sin(q_2) - \dot{q}_2m_4a_2a_1 \sin(q_2) \\
& - \dot{q}_2m_3a_2a_1 \sin(q_2) - \dot{q}_2m_3a_1x_3 \sin(q_2) + \dot{q}_4m_4a_1x_4 \sin(q_2 - q_4) \\
& - \dot{q}_4m_4a_1y_4 \cos(q_2 - q_4) - \dot{q}_4m_4a_2x_4 \sin(q_4) - \dot{q}_4m_4a_2y_4 \cos(q_4)
\end{aligned}$$

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

$$C_{13} = 0$$

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

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

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

$$C_{23} = 0$$

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

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

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

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

$$G_1 = G_2 = 0$$

$$G_3 = 9.81m_3 - 9.81m_4$$

$$G_4 = 0$$

ماتریس اینرسی و مرکز جرم ربات ها در جدول 2-2 آمده است. از معادلات بالا این نکته بسیار مهم دریافت می شود که دینامیک ربات بسیار پیچیده، چندمتغیره، به همراه کوپلینگ شدید می باشد.

i	$x_i(m)$	$y_i(m)$	$z_i(m)$	$m_i(kg)$	$I_{xxi}(kgm^2)$	$I_{yyi}(kgm^2)$	$I_{zz_i}(kgm^2)$	$I_{xyi}(kgm^2)$	$I_{xz_i}(kgm^2)$	$I_{yzi}(kgm^2)$
1	-0.03082	-0.0014	-0.1446	95.2315	1.6216	7.3107	7.6006	0.0268	-0.0026	0.0001
2	-0.6739	0.0011	-0.1956	158.088	3.7452	22.6436	21.6825	0.0135	2.0996	-0.0015
3	0	0	-0.5403	16.6171	1.6339	1.6339	0.0407	0	-0.0004	0
4	0	0	-0.025	0.106	0.000264	0.000264	0.000483	0	0	0

جدول ۲-۲ ماتریس اینرسی و مراکز جرم رباتها

جدول فوق اطلاعات فیزیکی ربات مورد استفاده در شبیه سازی است که در شکل 2-8 آمده است.

فصل سوم

کنترل امپدانس ترکیبی مبتنی بر مدل با استفاده از

راهبرد کنترل ولتاژ

همان‌طور که در فصل اول اشاره گردید، روش امپدانس ترکیبی یکی از پرکاربردترین روش‌های ارائه شده برای کنترل ربات در تماس با محیط می‌باشد که تا به حال مبتنی بر گشتاور بوده است. یکی از اهداف این پایان‌نامه ارائه کنترل امپدانس ترکیبی بر اساس رویکرد کنترل ولتاژ است. در این فصل، ابتدا مدلسازی محیط را بیان می‌کنیم. سپس به بررسی دقیق امپدانس ترکیبی از نقطه نظر تئوری مدار می‌پردازیم. در ادامه، روش طراحی کنترل‌کننده بر مبنای مدل بر اساس رویکردهای کنترل گشتاور و ولتاژ ارائه می‌دهیم و از آن برای کنترل ربات مورد نظر استفاده می‌کنیم. در نهایت نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است در این فصل به مساله مقاوم سازی در برابر عدم قطعیت‌ها پرداخته نمی‌شود و قانون‌های کنترل پیشنهادی بر مبنای مدل نامی سیستم ارائه گردیده است.

۳-۲ مدلسازی محیط

هدف از مدل کردن محیط، تعیین رفتار فرکانس پایین امپدانس آن است. دانش تقریبی از امپدانس محیطی که ربات در آن وظیفه مشخصی را انجام می‌دهد، به طراحی قانون کنترل دقیق‌تری برای سیستم منجر می‌گردد. برای محیط‌های خطی، امپدانس نسبت تبدیل لاپلاس نیرو به سرعت تعریف می‌شود. محیط‌های خطی بطور معمول بصورت فنری خطی با سختی k_e مدل می‌شوند. در برخی موارد نیز این فنر با میراکننده‌ای با ضریب میرایی B_e موازی در نظر گرفته می‌شود و مدل دیگر از محیط را تعریف می‌کند. در عین حال برای هر فرکانس ω ، امپدانس مختلط دارای بخش حقیقی $R(\omega)$ و بخش موهومی $Z(\omega)$ بصورت زیر بیان می‌گردد:

$$\bar{Z} \quad (1-3)$$

چنانچه ω به سمت صفر میل کند، یکی از 3 حالت زیر برای امپدانس محیط اتفاق خواهد افتاد [3]:

حالت 1- محیط با امپدانس (1-3) جرمی است اگر $|Z(0)| = 0$

حالت 2- محیط با امپدانس (1-3) مقاومتی است اگر $|Z(0)| = c$ ($0 < c < \infty$)

حالت 3- محیط با امپدانس (1-3) خازنی است اگر $|Z(0)| = \infty$

ذکر این نکته حائز اهمیت است که در محیط‌های خطی، محیط‌های خازنی و جرمی دوگان یکدیگر هستند و همچنین به محیط‌های مقاومتی به اصطلاح خود دوگان¹ می‌گویند.

محیط‌ها در صورتی که غیرفعال² باشند، مولد نیرو و یا جابه‌جایی نیستند و برای مدل کردن محیط تنها مدل امپدانس مذکور کافیست. در غیر اینصورت محیط‌ها را فعال³ می‌نامند. مدل کردن محیط‌های فعال در دو حالت زیر توصیف می‌گردد:

حالت 1- اگر محیط مولد نیرو باشد آنگاه مدل آن بصورت ترکیب سری یک منبع نیرو به همراه امپدانس محیط می‌باشد. بر اساس مفاهیم مدار آن را بصورت مدار تونن نیز بیان می‌کنند.

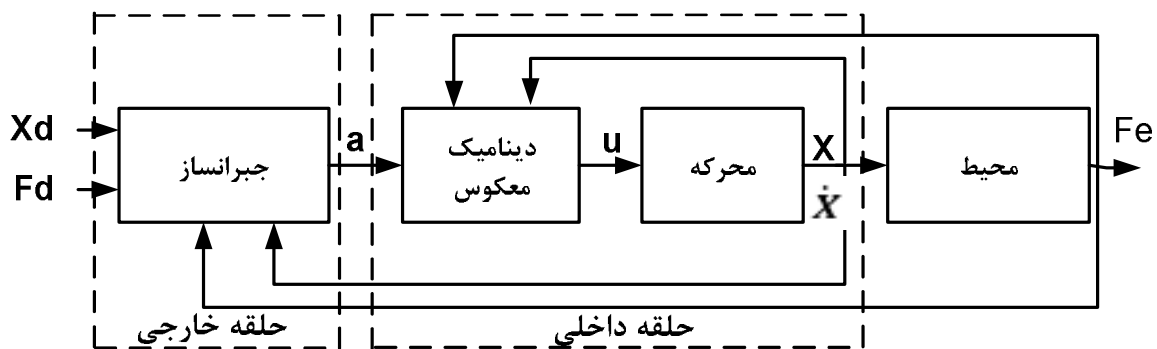
حالت 2- اگر محیط مولد جابه‌جایی (حرکت) باشد آنگاه مدل آن بصورت ترکیب موازی یک منبع جابه‌جایی به همراه امپدانس محیط می‌باشد. بر اساس مفاهیم مدار آن را بصورت مدار نورتن نیز بیان می‌کنند.

۳-۳ کنترل کننده امپدانس ترکیبی

کنترل کننده امپدانس ترکیبی با توجه به قیود طبیعی در مقابل حرکت ربات زیرفضاهای کنترلی را تفکیک و با بهره‌گیری از مفاهیم حلقه‌های داخلی و خارجی در هر زیرفضا مدل امپدانس مطلوب را محقق

1- Self_dual
2- Passive environment
3- Active

می‌سازد. در روش‌های کنترل متداول در حوزه گشتاور حلقه داخلی وظیفه حذف تمامی دینامیک‌های غیرخطی بازوی ربات را برعهده دارد، در حالیکه در روش پیشنهادی این پایان‌نامه بر مبنای کنترل ولتاژ، حلقه داخلی با استفاده از روش خطی‌سازی فیدبک، دینامیک محرکه‌های الکتریکی بازوی ربات را حذف می‌کند، حلقه خارجی نیز وظیفه تعیین ورودی مناسب برای حلقه داخلی از جنس شتاب (یا سرعت) را برعهده دارد. این ورودی بر اساس اهداف کنترل در هر دو حالت ردیابی موقعیت و نیروی مطلوب برای هر کدام از زیرفضاهای کنترلی تعیین می‌گردد. از مهمترین مزایای کنترل‌کننده امپدانس ترکیبی نسبت به تکنیک‌های متداول، استفاده از الگوریتمی مستقیم جهت کنترل نیروی مطلوب می‌باشد. در شکل 3-1 دیاگرام این کنترل‌کننده را مشاهده می‌کنید.



شکل 3-1 کنترل‌کننده امپدانس ترکیبی

3-3-1 حلقه کنترل خارجی

در الگوریتم کنترل این حلقه، مسیرهای مطلوب (نیرو و موقعیت) بعنوان ورودی دریافت می‌گردند. سپس بر مبنای اهداف کنترلی در هر راستای فضای کار، شتاب (ویا سرعت) مناسب را محاسبه و بعنوان خروجی در اختیار حلقه داخلی قرار می‌دهد. سه وضعیت مختلف برای تحلیل و طراحی این حلقه بیان می‌گردد. اولین وضعیت مربوط به زیرفضای کنترل موقعیت است که بازوی ربات در محیط آزاد قرار دارد و هیچگونه قید حرکتی برای ردیابی موقعیت مطلوب ندارد و در صورت مواجه با هرگونه قید حرکتی رفتار امپدانس

مطلوب را از خود نشان می‌دهد. دومین وضعیت مربوط به زیرفضای کنترل‌نیرو است که در آن بازوی ربات در یک محیط مقید قرار دارد و متاثر از قیود موقعیت، حرکت آزادانه‌ای در راستاهای مقید نخواهد داشت. آخرین وضعیت نیز مربوط به حالت گذرا یعنی عبور از زیرفضای کنترل‌موقعیت به زیرفضای نیرو یا بالعکس است. در این حالت کنترل‌کننده از امیدانس به نیرو و یا بالعکس تغییر وضعیت می‌دهد. به عبارت دیگر کلیدزنی بین الگوریتم‌های کنترل اتفاق می‌افتد.

۳-۱-۳ زیر فضای کنترل موقعیت

هدف کنترلی در این زیرفضا، تحقق مسیر موقعیت مطلوب توسط بازوی ربات می‌باشد. نیل به این هدف با انتخاب امیدانس مناسب ربات براساس امیدانس محیط صورت می‌پذیرد. رفتار امیدانس محیط در فرکانس‌های پایین در این زیرسیستم بصورت جرمی تعریف می‌گردد. لذا برای محاسبه امیدانس ربات با بهره‌گیری از مفاهیم تئوری مدار و براساس هدف کنترلی در این زیرفضا (ردیابی موقعیت مطلوب)، تحلیل طراحی صورت می‌پذیرد. بدین صورت که در ابتدا مدل نورتن برای ربات و بر مبنای اصل دوگانگی هوگان مدل تونن برای محیط انتخاب می‌شود [3]. شکل 2-3 مدار معادل این زیرفضا می‌باشد.

اکنون برطبق قوانین تئوری مدار داریم:

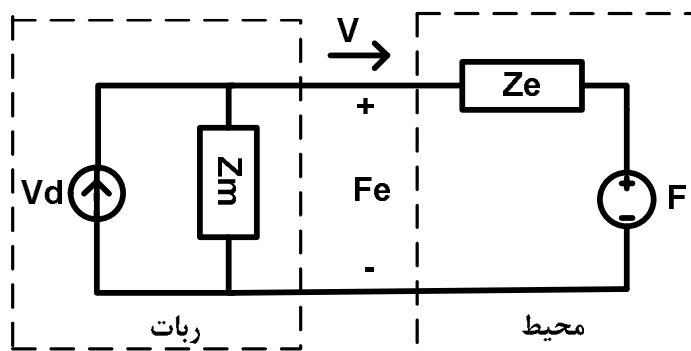
$$\bar{z} \quad (2-3)$$

$$v \quad (3-3)$$

$$F \quad (4-3)$$

در اینجا Z_m, Z_e به ترتیب پارامترهای امپدانس محیط و امپدانس بازوی ربات و V_d, V سرعت و سرعت مطلوب، X_d, X موقعیت و مسیر موقعیت مطلوب و F, F_e نیروی تماس و منبع نیروی محیط هستند. با فرض غیرفعال بودن محیط، منبع نیروی محیط F را می‌توان برابر صفر در نظر گرفت.

$$F \quad (5-3)$$



شکل ۳-۲ مدل زیرفضای کنترل موقعیت

باجایگذاری معادلات (3-3) تا (5-3) در (2-3) داریم:

$$v \quad (6-3)$$

اکنون خطای حالت ماندگار را محاسبه می‌کنیم.

$$e \quad (7-3)$$

سپس بر مبنای صفر شدن خطا و با توجه به رفتار امپدانس محیط، امپدانس ربات را بدست می‌آوریم. در فضای آزاد امپدانس محیط Z_e در فرکانس‌های پایین تقریباً برابر صفر است. این نشان‌دهنده محیطی از

نوعجرمی است. بنابراین شرط صفرشدن خطای حالت ماندگار $e_{ss} \rightarrow 0$ کفایست امپدانس ربات در فرکانس‌های پایین مقداری مخالف صفر داشته باشد. بعبارت دیگر ربات امپدانسی غیرجرمی داشته باشد.

پس داریم:

$$\bar{z} \quad (8-3)$$

در اینجا M_d, B_d, K_d بترتیب ماتریس‌های قطری $n \times n$ سختی، میرایی و اینرسیمطلوب است. کنترل‌کننده به همراه ربات بعنوان یک سیستم یکپارچه باید در قالب امپدانس مطلوب در نقطه تماس ظاهر گردد. با قراردادن معادلات (3-3) و (8-3) در معادله (2-3) به رابطه کنترل امپدانس می‌رسیم.

$$(\quad (9-3)$$

هنگامی که امپدانس محیط صفر است. نیرویی از طرف محیط بر ربات وارد نمی‌شود پس

$$F \quad (10-3)$$

$$(\quad (11-3)$$

بنابراین با شرط مثبت معین بودن ماتریس‌های M_d, B_d, K_d در (11-3) تمامی ریشه‌های معادله $(M_d s^2 + B_d s + K_d)$ در سمت چپ صفحه لاپلاس قرار می‌گیرد و در ازای $t \rightarrow \infty$ مشاهده می‌شود که $X \rightarrow X_d$ و کنترل‌کننده امپدانس ترکیبی بعنوان یک کنترل‌کننده دقیق موقعیت عمل می‌کند. با این وجود زمانی که ربات با محیطی دارای امپدانس غیرصفر (خازنی و یا مقاومتی-خازنی) تماس دارد، از سمت محیط به ربات نیرویی غیر صفر $F_e \neq 0$ وارد خواهد شد، پس رابطه (9-3) جهت تحقق

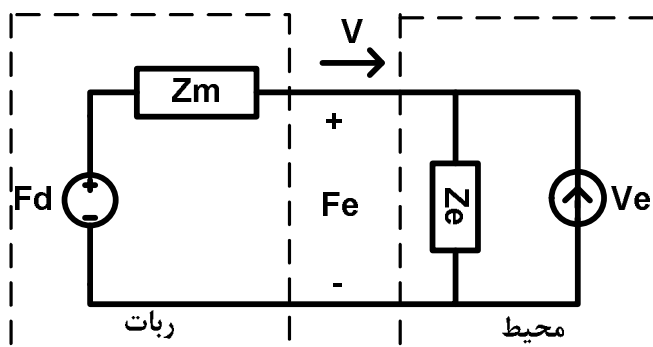
مدل امپدانس مطلوب در تماس با محیط پدید می‌آید. معادله (3-12) معادل رابطه (3-9) در حوزه زمان است. در صورت بازنویسی این معادله برحسب شتاب a_p مربوط به زیر فضای کنترل موقعیت، در حوزه زمان خواهیم داشت:

$$\Lambda \quad (12-3)$$

$$a \quad (13-3)$$

۳-۱-۳-۳ زیرفضای کنترل نیرو

هدف کنترلی در این زیرفضا، تحقق نیروی مطلوب در تماس با محیط است. همانطوریکه قبلاً اشاره گردید، جهت حصول به این هدف باید امپدانس مناسب را برای ربات براساس رفتار امپدانسی محیط بدست آوریم. رفتار امپدانسی محیط در فرکانس‌های پایین در این زیرفضا بصورت خازنی در نظر گرفته می‌شود. شکل 3-3 مدار معادل تونن این زیرفضای کنترل را با در نظر گرفتن امپدانس‌های محیط و ربات نشان می‌دهد [3].



شکل ۳-۳ مدل زیرفضای کنترل نیرو

برطبق قوانین تئوری مدار داریم:

$$F_d(s) = Z_m(s)V(s) + F_e \quad (14-3)$$

$$F_e = Z_e(s)(V(s) + V_e(s)) \quad (15-3)$$

در معادله (15-3)، V_e منبع جابه‌جایی محیط است. فرض کنید ربات در یک محیط غیرفعال و بسیار سخت قرار دارد. از اینرو سرعت محیط صفر است. امپدانس محیط را باید بصورت خازنی در نظر گرفت.

$$V_e = 0 \quad (16-3)$$

$$Z_e(s) = \frac{K_e}{s} \rightarrow Z_e(s)|_{s=0} = \infty \quad (17-3)$$

باجایگذاری (3-15) و (16-3) در (14-3) داریم:

$$F_e = \frac{Z_e}{Z_m + Z_e} F_d \quad (18-3)$$

خطای حالت ماندگار را بدست می‌آوریم :

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} (F_d - F) = \frac{Z_m(0)}{Z_e(0) + Z_m(0)} \quad (19-3)$$

در صورتی که بخواهیم خطا صفر گردد $e_{ss} \rightarrow 0$ با توجه به اینکه امپدانس محیط بینهایت است، کفایت که مدل امپدانس ربات را از نوع غیرخازنی (جرمی یا جرمی-مقاومتی و یا مقاومتی) بر اساس نیاز مساله انتخاب نمود.

$$Z_m(s)|_{s=0} \neq \infty \rightarrow Z_m(s) = M_d s + B_d \quad (20-3)$$

در معادله $(20-3)$ M_d, B_d ماتریس‌های مثبت معین و قطری $n \times n$ ، میرایی و اینرسی در مدل امیدانسمطلوب ربات هستند. با جایگذاری $(3-3)$ و $(20-3)$ در معادله $(14-3)$ متغیر شتاب a_f مربوط به زیر فضای کنترل نیرو را در حوزی زمان بدست می‌آوریم.

$$F_d(s) = (M_d s^2 + B_d s)X(s) + F_e(s) \quad (21-3)$$

$$F_d(t) = M_d \ddot{X} + B_d \dot{X} + F_e(t) \quad (22-3)$$

$$a_f = \ddot{X} = M_d^{-1}(F_d(t) - F_e(t) - B_d \dot{X}) \quad (23-3)$$

۳-۴ ماتریس انتخاب

در صورت تغییر در محیطی که بازوی ربات در آن قرارداد متعاقبا ممکن است هدف کنترلی نیز دستخوش تغییر قرارگیرد. بطور نمونه، ربانی را تصور نمایید که در یک راستا مشخص در فضای آزاد بدون هیچگونه قید حرکتی مسیر مطلوب خود را طی می‌کند که ناگهان با یک جسم سخت برخورد دارد، در این وضعیت ربات بدلیل حفظ مسیر مطلوب چه در طول زمان برخورد و چه بعد از آن، نیازمند تغییر الگوریتم کنترلی از موقعیت به نیرو در آن راستا مشخص در مدت زمان برخورد می‌باشد. این تغییر وضعیت الگوریتم کنترل در روش‌های مرسوم توسط ماتریسی قطری که بعد آن برابر ابعاد فضای کاراست به نام ماتریس انتخاب S انجام می‌شود. با یکسان در نظرگرفتن ماتریس‌های میرایی B_d و اینرسی M_d ، دو الگوریتم کنترل نیرو و موقعیت مربوط به معادلات $(12-3)$ و $(22-3)$ را در صورتی که در هر دو زیرفضا یکسان انتخاب کنیم، رابطه زیر بیان می‌نماید.

$$M_R(\ddot{X} - S\ddot{X}_d) + B_d(\dot{X} - S\dot{X}_d) + K_d S(X - X_d) - (I - S)F_d(t) = -F_e \quad (24-3)$$

معادله فوق را امیدانس ترکیبی بازو در تماس با محیط می‌نامند [51]. انتخاب مقدار صفر برای درایه‌های این ماتریس، مدل امیدانس مطلوب در زیرفضای کنترل نیرو و با انتخاب مقدار یک مدل امیدانس مطلوب در زیرفضای کنترل موقعیت را بصورت جداگانه در هر بعد فضای کار منجر می‌گردد. حال می‌توان متغیر ورودی به حلقه کنترل داخلی را بر حسب شتاب از رابطه فوق تعیین نمود.

$$a = \ddot{X} = S\ddot{X}_d + M_R^{-1}(-B_R(\dot{X} - S\dot{X}_d) - K_d S(X - X_d) - F_e(t) + (I - S)F_d(t)) \quad (25-3)$$

(25-3) را می‌توان همچنین بر حسب ترکیبی دو رابطه (3-13) و (3-23) توسط ماتریس انتخاب کبیان نمود:

$$a = Sa_p + (I - S)a_f \quad (26-3)$$

این متغیر شتاب همانطور که بیان نمودیم بعنوان خروجی برای حلقه خارجی کنترل‌کننده و ورودی برای حلقه داخلی می‌باشد.

۳-۴-۱ سوئیچ فازی

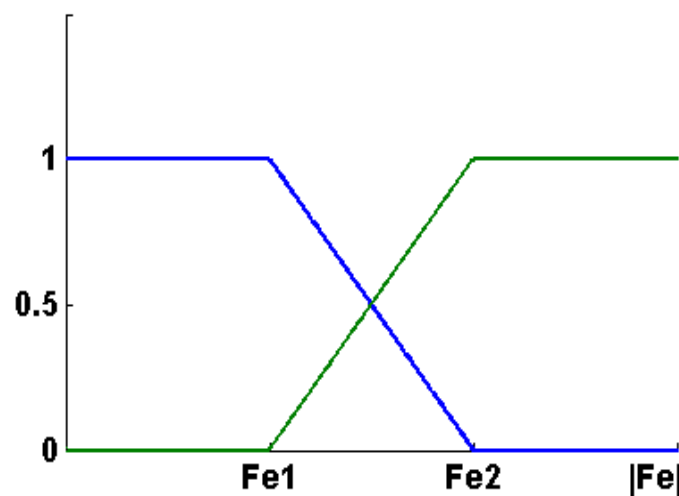
یکی از معایب ماتریس انتخاب، وجود تغییرات گسسته در مقدار درایه‌ها آن است که موجب جابه‌جایی ناگهانی در سطح کنترل‌کننده از موقعیت به نیرو و یا بالعکس می‌گردد. حاصل این تغییرات، ایجاد حالت گذرای نامطلوب به همراه اثرات نامطلوب نیروهای لحظه‌ای است. این مقاله با تخصیص یک سیستم فازی بعنوان سوئیچ برای هر کدام از درایه‌های ماتریس انتخاب، تغییراتی بصورت کاملاً نرم و پیوسته را بین کنترل‌کننده‌ها صورت می‌دهد و موجب بهبود در اثرات نیروهای نامطلوب گذرا خواهد شد. بدین صورت که هر کدام از سیستم‌های فازی توسط یک مقدار آستانه یعنی F_{e1} فعال می‌گردند. این کران بر لزوم رسیدن نیروی تماس به حداقل ممکن جهت تغییر در الگوریتم کنترلی تاکید دارد. در عین حال با تنظیم این آستانه می‌توان سوئیچ را در مقابل خطاهای احتمالی در سنسور اندازه‌گیری نیز مقاوم نمود. با رسیدن

اندازه نیروی تماس به حداقل مقدار آستانه در یک راستا در فضای کار، کنترل کننده بتدریج از موقعیت به نیرو تبدیل شده و در صورت کاهش نیرو از مقدار آستانه F_{e2} ، کنترل کننده باردیگر به موقعیت بصورت کاملا نرم تغییر وضعیت می دهد. در شکل 3-4 توابع تعلق فازی مربوط را مشاهده می کنید. قوانین و خروجی سیستم فازی نیز بصورت زیر می باشد.

$$I \quad (27-3)$$

$$I \quad (28-3)$$

که در اینجا μ_{A1} و μ_{A2} تعلق های فازی مربوط به هر یک از دو تابع عضویت فازی هستند. $|F_e|$ نیروی اندازه گیری شده از محیط در نقطه تماس و a_p و a_f میزان شتابهای ورودی به حلقه داخلی که در معادلات (3-13) و (3-23) محاسبه گردیده اند. خروجی سیستم فازی بصورت زیر تعیین می شود:



$$a \quad (29-3)$$

شکل 3-4 توابع تعلق فازی

بازوی ربات در فضای آزاد تحت الگوریتم مربوط به زیر فضای کنترل موقعیت عمل می‌کند. بعبارت دیگر مدل امیدانس مطلوب (3-12) را در فضای کار حاکم می‌کند. این مدل امیدانس به خوبی توانایی حفظ پایداری ربات را در برخورد با قطعه کار داراست. بنابراین تغییر الگوریتم‌های کنترلی توسط سیستم فازی را می‌توان زمانی که ربات با قطعه درگیر می‌باشد، انجام داد.

۳-۵ حلقه کنترل داخلی

مکانیزم عملکرد این حلقه بدین صورت است که پس از دریافت ورودی (از نوع شتاب که در بردارنده هدف کنترلی است) وبا استفاده از روش خطی سازی فیدبکی، دینامیک محرکه‌های الکتریکی را حذف کرده و در خروجی (فضای کار) مدل امیدانس مطلوب را محقق می‌کند. با در نظر گرفتن این نکته که جریان موتور حاوی تمامی دینامیک های غیرخطی ربات می‌باشد [37]، بنابراین با حذف دینامیک‌های محرکه برطبق آنچه که بیان گردید، بدون در اختیار داشتن مدل دینامیکی ربات، به سهولت آن را حذف می‌کنیم. ورودی برای این حلقه کنترلی با توجه به نیاز مساله می‌تواند از نوع سرعت و یا از نوع شتاب باشد.

۳-۶ طراحی قانون کنترل

راهبرد کنترل گشتاور بر پایه مدل دینامیکی بازوی ربات همواره در پیاده سازی بدلیل عدم دسترسی به مدل دقیقی از آن، با مشکلات اساسی روبرو بوده است. لذا محققان بدنبال راهبردی نوین بوده‌اند تا معایب این روش را بخوبی پوشش دهند. بر این اساس راهبرد کنترل ولتاژ مطرح گردید. که ویژگی اصلی آن عدم نیاز به مدل ربات در طراحی قانون کنترل بود. زیرا این روش بیان نمود که جریان موتور حاوی تمام تأثیرات غیرخطی بار (ربات) است. بنابراین با فیدبک گرفتن از جریان موتور دینامیک غیر خطی پیچیده ربات را در اختیار خواهیم داشت. گشتاور مورد نیاز برای راه اندازی بازوی ربات، توسط محرکه های

الکتریکی تولید می‌شود. بنابراین، به منظور کنترل بازو، باید موتورهای آن کنترل شوند و چون کنترل موتورها توسط ولتاژ ورودی آنها صورت می‌پذیرد. به این راهبرد، راهبرد کنترل ولتاژ می‌گویند.

جریان موتورهای الکتریکی تابعی از ولتاژ آن می‌باشد، بنابراین حتی برای کنترل جریان نیز، ولتاژ موتور باید کنترل شود. سادگی مدل موتورهای الکتریکی بدلیل تک ورودی - تک خروجی بودن نسبت به مدل چندمتغیره و پیچیده ربات، طراحی کنترل کننده را برای طراح بمراتب آسان تر می‌سازد. بطور کلی دقت، کاهش حجم محاسبات، افزایش سرعت، مقاوم بودن در برابر عدم قطعیت‌های مدل دینامیکی بازوی ربات و سادگی از مهمترین شاخص‌های پیاده‌سازی این روش نسبت به کنترل مبتنی بر گشتاور می‌باشد. در این بخش هر دو راهبرددبررسی و قوانین کنترلی مربوط به آنها محاسبه می‌شود.

۳-۶-۱ راهبرد کنترل گشتاور

بازوی ربات با فرض صلب بودن در تماس با محیط توسط رابطه زیر بیان می‌گردد.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + J^T F_e = \tau_l \quad (30-3)$$

که در اینجا $F_e \in R^m$ بیانگر بردار نیروی اندازه‌گیری شده در تماس با محیط است و مابقی پارامترهای این رابطه مانند رابطه (2-46) توصیف می‌شوند. بدلیل تحقق امپدانس در فضای کار، با استفاده از ماتریس ژاکوبین $J(q) \in R^{m \times n}$ معادله (30-3) را از فضای مفصلی به فضای کار منتقل می‌کنیم.

بنابراین داریم:

$$\dot{\lambda} \quad (31-3)$$

$$\dot{\lambda} \quad (32-3)$$

$$\ddot{q} \quad (33-3)$$

در رابطه (33-5) ماتریس $J(q)^{-1}$ در صورتی که در مسیر مطلوب فضای کار، تکین نباشد و $m = n$ باشد، وجود خواهد داشت. در غیر اینصورت اگر $m \neq n$ می‌توان از روش شبه معکوس¹ برای محاسبه $J(q)^{-1}$ استفاده نمود.

اکنون با جایگذاری رابطه (33-3) در رابطه (30-3) داریم:

$$D(q)J(q)^{-1}\ddot{X} + h(q, \dot{q}) + J^T(q)F_e = \tau_l \quad (34-3)$$

در اینجا

$$h(q, \dot{q}) = -D(q)J(q)^{-1}\dot{J}(q)\dot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (35-3)$$

قانون کنترل را با جایگذاری معادله (25-3) در رابطه (34-3) می‌توان پیشنهاد داد.

$$\begin{aligned} \tau_l = D(q)J(q)^{-1} & \left(S\ddot{X}_d \right. \\ & + M_R^{-1} \left(-B_R(\dot{X} - S\dot{X}_d) - K_R S(X - X_d) - F_e(t) \right. \\ & \left. \left. + (I - S)F_d(t) \right) \right) + h(q, \dot{q}) + J^T(q)F_e \end{aligned} \quad (36-3)$$

قانون کنترل فوق نیازمند فیدبک‌هایی از موقعیت x ، سرعت \dot{x} ، نیروی تماس F_e ، موقعیت مفاصل q و سرعت زاویه‌ای مفاصل \dot{q} می‌باشد. علاوه بر این این قانون نیازمند مدل دقیقی از دینامیک بازوی ربات می‌باشد. با در نظر گرفتن مدل چندمتغیره ربات در این قانون بوضوح پیچیدگی قانون کنترل امیدانس ترکیبی با استفاده از راهبرد کنترل گشتاور آشکار می‌گردد. با جایگذاری قانون کنترل (36-3) در رابطه (34-3) سیستم حلقه بسته بصورت زیر می‌گردد:

¹-Pseudo inverse

$$l \quad (37-3)$$

بنابراین رابطه امپدانس ترکیبی در فضای کار برای ربات محقق می‌گردد.

۳-۶-۲ راهبرد کنترل ولتاژ

دینامیک مکانیکی موتور DC مغناطیس دائم بصورت زیر بیان می‌شود:

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + r \tau_l = \tau_m \quad (38-3)$$

J_m ، B_m ، r ماتریس‌های قطری $n \times n$ هستند که به ترتیب برابر ممان اینرسی موتور، ضریب میرایی و ضریب چرخ دنده هستند. $\theta_m \in R^n$ موقعیت زاویه‌ای موتور، $\tau_m \in R^n$ گشتاور تولید شده توسط موتور و τ_l گشتاور بار موتور که در رابطه (30-3) بیان گردید. بردار گشتاور موتور τ_m بعنوان ورودی برای معادله (38-3) توسط بردار جریان موتور تولید می‌شود.

$$\tau_m = K_m I \quad (39-3)$$

در اینجا K_m ماتریسی قطری و $n \times n$ از ثابت‌های گشتاور است. همچنین رابطه بین موقعیت موتور و متغیرهای ربات به صورت زیر است:

$$q = r \theta_m \quad (40-5)$$

دینامیک الکتریکی موتور توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$u = RI + LI + k_b \dot{\theta}_m \quad (41-3)$$

که در آن $R, L, k_b \in R^{n \times n}$ به ترتیب ثابت ماتریس‌های قطری ضد محرکه القایی، اندوکتانس و مقاومت موتور و $I \in R^n$ و بردارهای جریان و ولتاژ ترمینال موتور می‌باشند. با توجه به رابطه (3-40) می‌توان (3-41) را بر حسب متغیر مفصل ربات به صورت زیر نوشت.

$$u = RI + L\dot{I} + k_b r^{-1} \dot{q} \quad (42-3)$$

مدل فضای حالت دینامیک ربات به همراه دینامیک محرکه‌های آندر تماس با محیط، توسط جایگذاری معادلات (3-30) و (3-38) تا (3-40) در معادله (3-42) به فرم زیر در می‌آید:

$$\dot{z} = f(z) + bw \quad (43-3)$$

که در اینجا $w^T = [F_e \ u]^T$ ورودی‌ها و همچنین بردار حالات $z^T = [q \ \dot{q} \ I]$ هستند. $f(z)$ و b برابرند با:

$$b = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -(J_m r^{-1} + rD(z_1))^{-1} r J^T(z_1) & 0 \\ 0 & L^{-1} \end{bmatrix} \quad (44-3)$$

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

معادله فضای حالت (3-43) بدرستی بیانگر یک سیستم چندمتغیره، بشدت غیرخطی به همراه تزویج بسیار سنگین می‌باشد. پیچیدگی این مدل از چالشهای پیش رو محققان در مساله کنترل ربات است. با توجه به مطالب ذکر شده در بالا در ارتباط با پیچیدگی مساله کنترل ربات با در نظر گرفتن محرکه‌های آن، راهبرد کنترل ولتاژ را در اینجا برای حل این مشکل بیان می‌کنیم.

با توجه به روابط (3-42) و (3-31) مدل فضای کار را برای سیستم موتور بصورت زیر بدست می‌آوریم:

$$u = RI + L\dot{I} + k_b r^{-1} J^{-1} \dot{X} \quad (45-3)$$

اکنون رابطه امپدانس ترکیبی (3-25) برای حالتی در نظر داریم که ربات در تماس با محیط هیچگونه لختی از خود نشان ندهد. پس در (3-25)، $M_d = 0$ قرار می‌دهیم. در اینصورت شاهد بوجود آمدن شتاب در رفتار ربات نخواهیم بود و این بدین معنی است که ربات با سرعت ثابتی با محیط برخورد دارد که خود به طبع نیروهای ناخواسته حاصل از برخورد را به حداقل می‌رساند. پس داریم:

$$E \quad (46-3)$$

و بازنویسی معادله بر اساس سرعت :

$$\dot{X} \quad (47-3)$$

حال قانون کنترل ولتاژ را با جایگذاری (3-47) در (3-45) بصورت زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$u = RI + L\dot{I} + k_b r^{-1} J^{-1} (S\dot{X}_d + B_d^{-1} (-K_d S(X - \dot{X}_d) + (I - S)F_d(t) - F_e)) \quad (48-3)$$

با اعمال این قانون کنترلی به محرکه‌های ربات، رابطه امپدانس ترکیبی حاصل می‌گردد. برحسب تعیین المانهای ماتریس انتخاب S در هر کدام از زیرفضای‌های کنترلی مدل امپدانس مطلوب حاکم می‌گردد.

مستقل بودن قانون کنترل از دینامیک ربات، کاهش بار محاسباتی و مقاوم‌شدن در برابر عدم قطعیت-ها را در فرآیند کنترل موجب گردیده است. در عین حال قانون کنترل فوق نیازمند فیدبک‌هایی از موقعیت تماس X ، موقعیت مفصل q ، جریان I_a و مشتق‌زمانی جریان \dot{I}_a و نیروی تماس F_e است. در موتورهای dc بعلاوه بمراتب کوچکتر بودن ثابت زمانی الکتریکی نسبت به ثابت زمانی مکانیکی می‌توان از جمله $L\dot{I}_a$ در قانون کنترل صرف‌نظر کرد و این باعث ساده‌تر شدن قانون کنترل ولتاژ فوق می‌گردد.

با این وجود در صورتی که این ترم را محاسبه و در قانون کنترل بکاربریم می توان از یک مشتق زمانی نرم نسبت به جریان استفاده نمود. برای این منظور از یک فیلتر با تابع تبدیل $\frac{s}{\alpha s + 1}$ با $\alpha = 0.001$ استفاده می کنیم. همچنین این فیلتر توانایی حذف نویزهای جریان را نیز دارد.

۳-۶-۳ تحلیل همگرایی

در صورتی که ربات در زیر فضای محیط آزاد و یا محیط مقید قرار بگیرد، آنگاه رابطه (3-37) یک سیستم مرتبه دوم خطی است. با توجه به اینکه ماتریس های M_d, B_d, K_d همگی قطری و مثبت معین هستند، بر اساس معیار روث-هرویتس سیستم پایدار می باشد.

بعنوان یک نتیجه می توان بیان نمود:

همه متغیرها، $\ddot{X}_d - \ddot{X}, \dot{X}_d - \dot{X}, X_d - X$ کراندار باقی می مانند به شرط آنکه نیروی حاصل از تماس F_e نیز کراندار باشد. بعلت اینکه فاصله میان مجری نهایی و سطح تماس مشخص نیست، در هر لحظه امکان برخورد وجود دارد، در زمان برخورد نیروهای ضربه ای ناخواسته ای در نقطه تماس بوجود می آید که ممکن است باعث ناپایداری در سیستم حلقه بسته ربات شوند. در فصل بعد نشان خواهیم داد در صورتی این نیروها کراندار باقی می ماند که سرعت حاصل از برخورد با سطح تماس محدود باقی بماند.

۳-۷ شبیه سازی

روش های پیشنهادی در این فصل بر روی بازوی ربات اسکارا با موتورهای مغناطیس دائم شبیه سازی گردید. عملکرد هر دو راهبرد ولتاژ و گشتاور بر روی ربات مورد ارزیابی قرار گرفت. در راهبرد کنترل ولتاژ سیستم کنترل بصورت مفصل مستقل به ربات اعمال می گردد. بنابراین برای کنترل موتورهای هر مفصل از یک کنترل کننده جداگانه استفاده می شود.

شبیه‌سازی بدین‌صورت است که ربات باید در فضای آزاد حرکت خود را بر طبق مسیر مطلوب موقعیت آغاز و دنبال نماید. سپس با برخورد به قطعه در راستا محور Z ، باید باتفکیک زیرفضاها نیروی مطلوب را در راستایی که قید حرکت برای آن بوجود آمده بر قطعه کار اعمال کند. همچنانکه ردیابی موقعیت مطلوب را در راستاهای دیگر حفظ نماید. نکته مهم در اینجا این است که، ربات هیچگونه اطلاعاتی در ارتباط با میزان سختی قطعه و همچنین فاصله میان مجری نهایی و قطعه کار را ندارد.

پارامترهای هر چهار لینک ربات به همراه مشخصات دینامیک محرکه‌ها و همچنین پارامترهای دینامیک-هارتبرگ به ترتیب در جداول 1-3 و 2-2 و 1-2 ارائه گردیده است. در شکل 2-8 فصل دوم دیاگرام این ربات را مشاهده می‌کنید. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار مطلب در مدت زمان 6 ثانیه انجام شده است. در شبیه‌سازی‌ها از سه مفصل اول بازو برای تحقق کنترل امپدانس ترکیبی در فضای کار استفاده شده و مفصل چهارم قفل گردیده است.

$u_{max}(V)$	R	$K_b(\frac{Vs}{rad})$	$L(H)$	$J_m(\frac{Nms^2}{rad})$	$B_m(\frac{Nms}{rad})$	r
40	1.6	0.26	0.001	0.0002	0.001	0.02

جدول 3-1 پارامترهای موتور

بردار موقعیت مطلوب $X_d = [x_{d1} x_{d2} x_{d3}]^T$ همانطور که در شکل 3-5 نمایش داده شده برابر است

با:

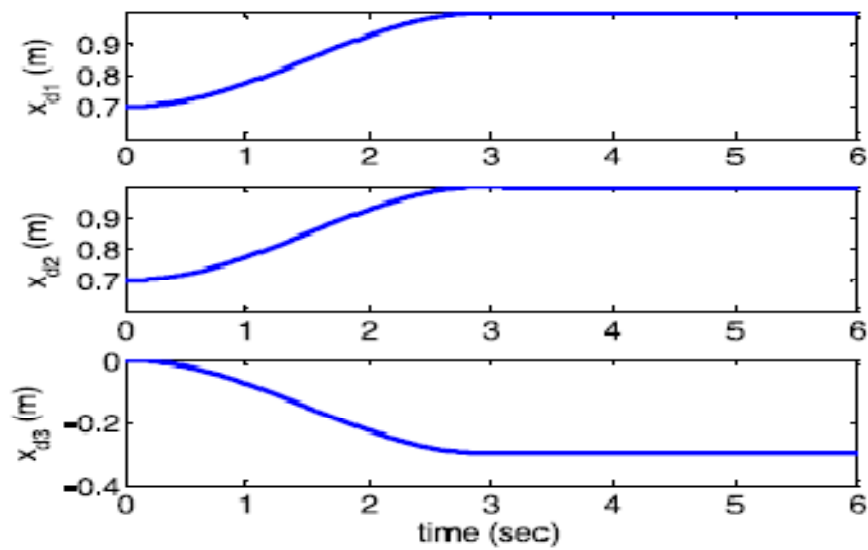
$$(49-3)$$

x

$$x \quad (50-3)$$

$$x \quad (51-3)$$

x



شکل ۳-۵ مسیرهای مطلوب موقعیت در هر سه راستا

بردار موقعیت تماس $X_e = [1 \ 1 \ -0.29]^T$ می‌باشد. بردار نیروی مطلوب جهت بررسی عملکرد ردیابی،

بصورت زیر تعریف می‌کنیم

$$F \quad (52-3)$$

محیط مقید با سختی زیاد، $K_{e3} = 150000 \text{ N/m}$ در راستای محور Z توسط رابطه زیر بصورت

خطی داده شده است.

۳-۷-۱ راهبرد کنترل ولتاژ

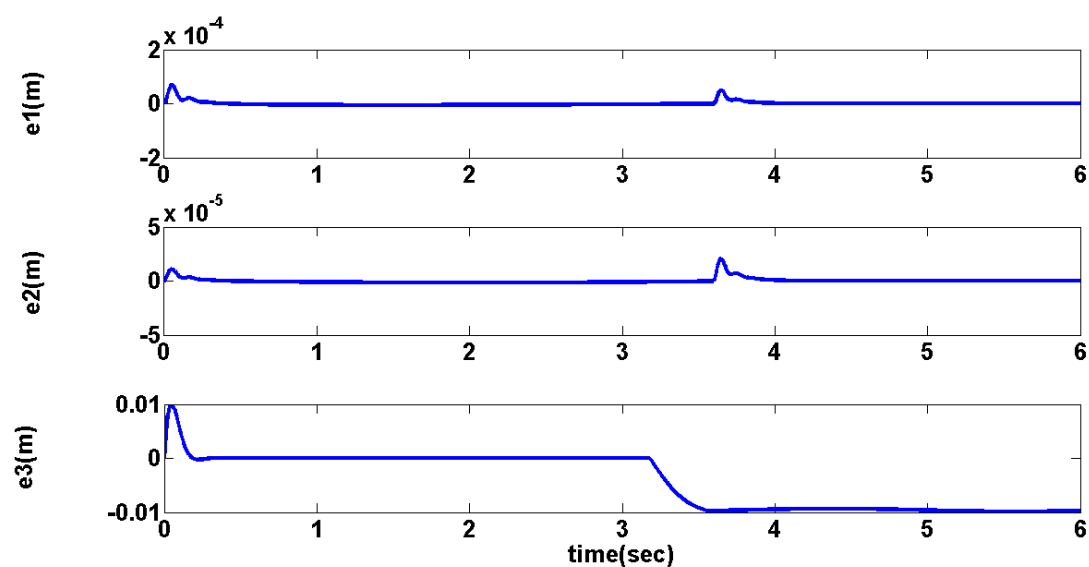
در این بخش شبیه‌سازی براساس قانون کنترل ولتاژ (3-48) بر روی ربات با مشخصات ذکر شده در بالا شبیه‌سازی گردید. پارامترهای مدل امپدانس مطلوب در تماس با محیط برای هر دو زیرفضا روی مقادیر زیر تنظیم شده‌اند:

-3)

 λ

(36)

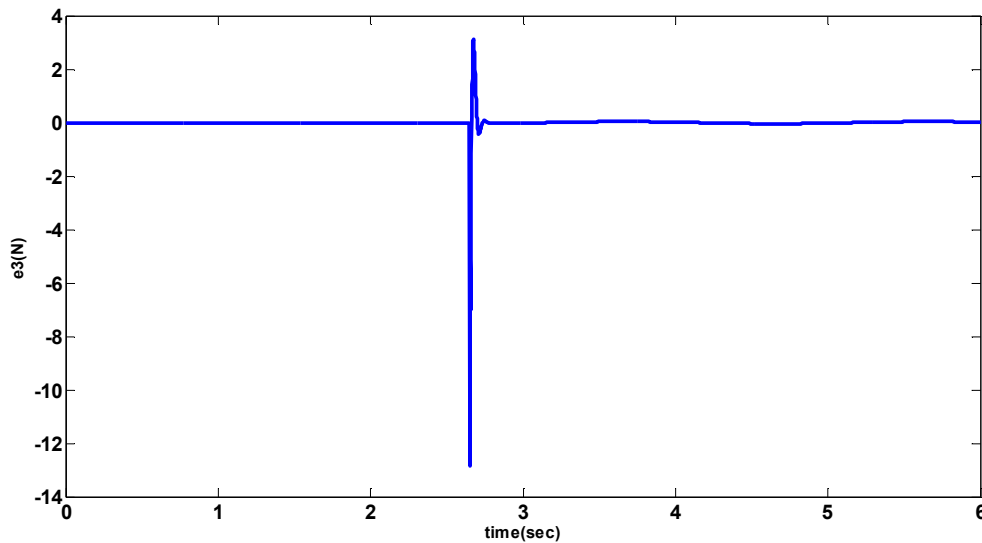
در شکل 3-6 عملکرد مناسب قانون کنترل پیشنهادی در ردیابی موقعیت را برای هر سه بعد فضای کار قبل از تماس را مشاهده می‌کنید. پس از تماس ربات با محیط در راستای محور Z ، خطای محسوسی در ردیابی موقعیت مطلوب‌بعثت عدم امکان نفوذ ربات در قطعه کار ایجاد می‌شود و این نشان‌دهنده عدم امکان



نفوذ مجری نهایی در محیط سخت می‌باشد.

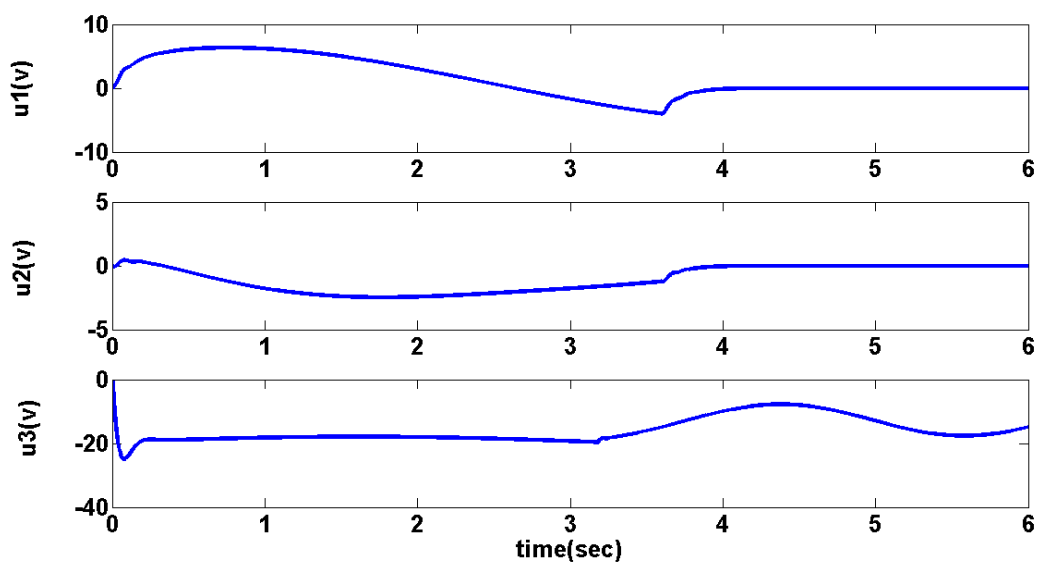
شکل ۳-۶ خطای ردیابی موقعیت

ربات پس از برخورد با محیط در راستای قائم، بصورت کاملا نرم الگوریتم کنترل را از کنترل موقعیت به نیرو توسط سوئیچ فازی تغییر می‌دهد. در لحظه برخورد نیروی ضربه‌ای قابل توجه‌ای در راستای محور Z بوجود می‌آید. خطای ردیابی نیروی مطلوب را در شکل ۳-۷ مشاهده می‌کنید. نیروی تماس به خوبی با خطای حداکثر 0.004 N نیروی مطلوب را در حالت ماندگار ردیابی می‌کند.



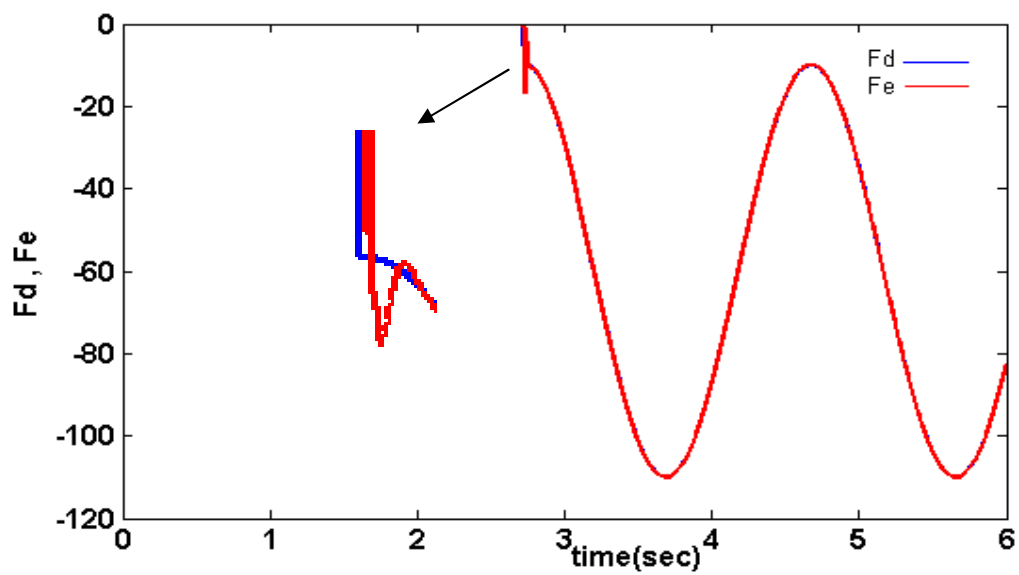
شکل ۳-۷ خطای ردیابی نیرو

شکل ۳-۸ وضعیت مناسب سیگنالهای کنترل یعنی ولتاژ هر 3 موتور را نشان می‌دهد. بعلاوه اعمال نیروی مداوم توسط موتور سوم بر روی محیط ولتاژ کنترلی این موتور صفر نمی‌گردد. هر سه سیگنال در محدوده قابل قبولی می‌باشند.



شکل 8-3 ولتاژ کنترل هر 3 موتور

شکل 8-3 نیز بهینه‌سازی اثرات نامطلوب در حالت گذرا را در زمان کلیدزنی توسط سیستم فازی را نشان می‌دهد. عدم ناپایداری سیستم حلقه بسته در زمان کلیدزنی بوضوح در این شکل مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۹ اثر بکارگیری سوئیچ فازی

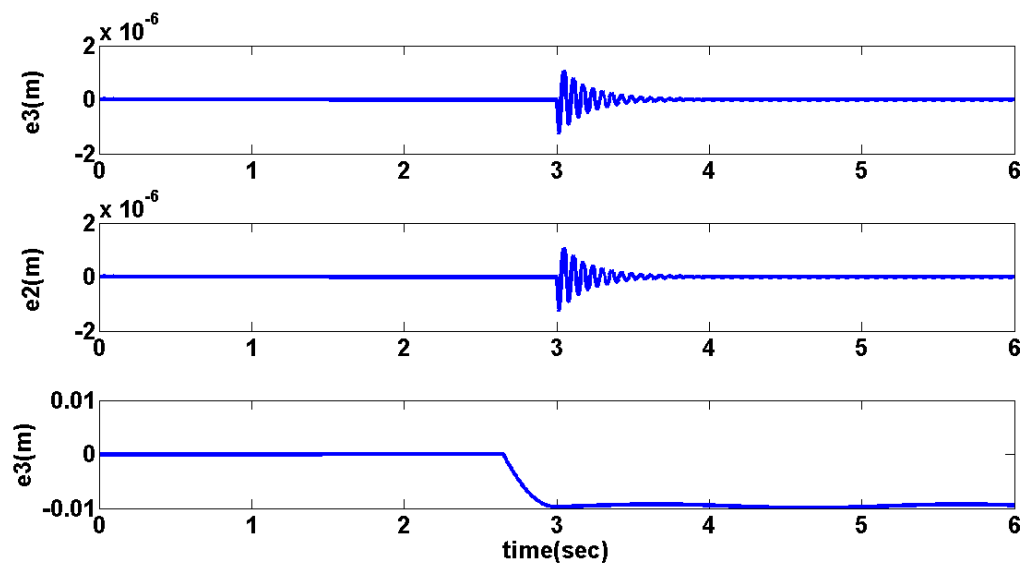
۲-۷-۳ راهبرد کنترل گشتاور

در این بخش شبیه‌سازی براساس قانون کنترل گشتاور (36-3) بر روی ربات با مشخصات ذکر شده در بالا شبیه‌سازی گردید. پارامترهای مدل امپدانس مطلوب در تماس با محیط برای هر دو زیرفضا روی مقادیر زیر تنظیم شده‌اند:

$$M \quad (3)$$

(37)

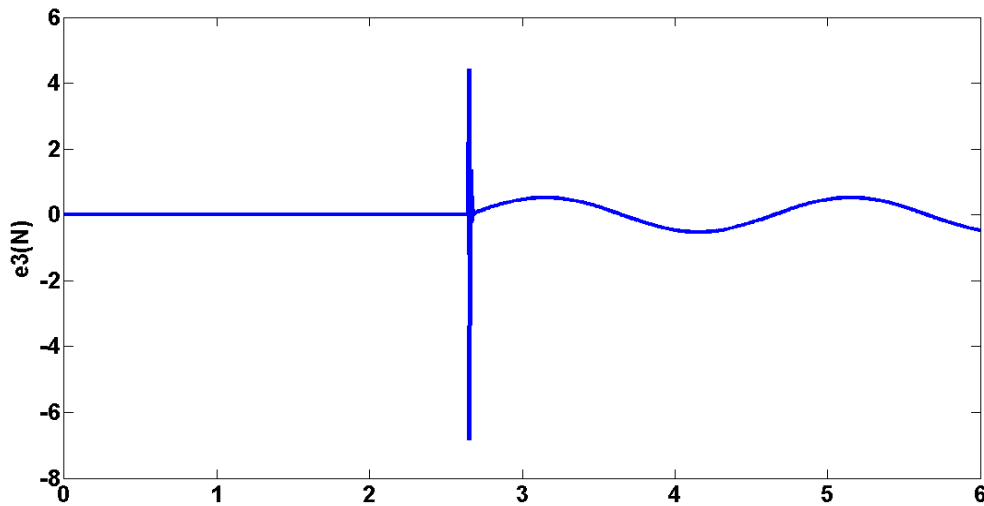
در شکل 3-10 خطای ردیابی موقعیت مطلوب مشاهده می‌کنید. در راستا محور Z بعلت عدم امکان نفوذ مجری نهایی در محیط تماس خطایی به اندازه 0.01 بوجود می‌آید. نوسان خطای ردیابی در ثانیه 3 در



دو راستای X, Y ناشی از تغییر در مسیر مطلوب ربات می‌باشد.

شکل 3-10 خطای ردیابی موقعیت

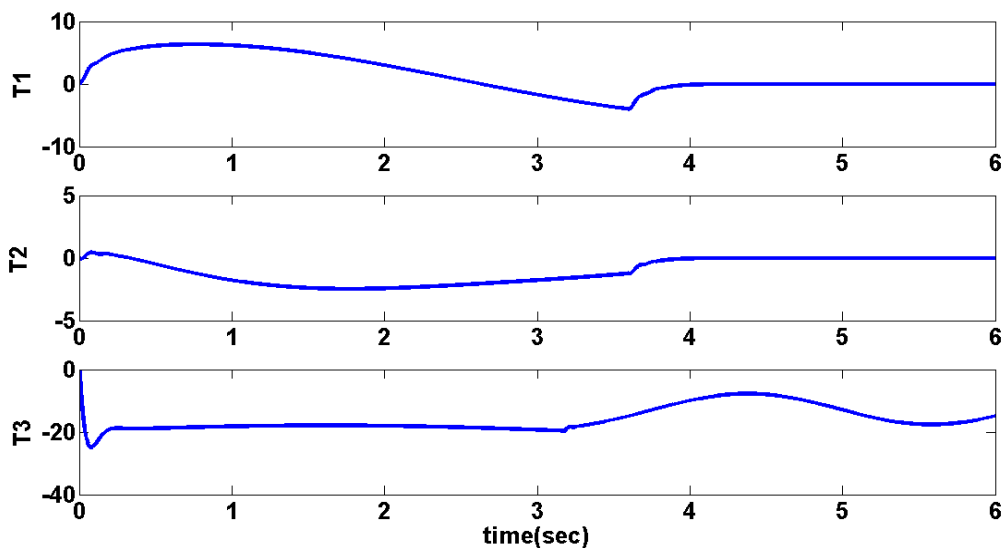
خطای حاصل از ردیابی نیروی مطلوب نیز در شکل 3-11 در راستای برخورد ترسیم گردیده است. در این شکل نیز شاهد خطای حالت گذرا در راستا محور Z در زمان برخورد ربات با محیط می‌باشید. خطای



حالت ماندگار مناسب می‌باشد.

شکل 3-11 خطای ردیابی نیرو

در شکل 3-12 گشتاورهای مورد نیاز جهت حرکت مفاصل ربات ترسیم گردیده است. گشتاور موتور سوم



بدلیل اعمال نیرو به محیط صفر نمی گردد

شکل ۳-۱۲ گشتاورهای ورودی به ربات

۳-۸ نتیجه گیری

در بررسی عملکرد هر دو راهبرد کنترل گشتاور و ولتاژ، شاهد نتایج خوب و قابل قبول هستیم. پیاده سازی روش امپدانس ترکیبی با راهبرد کنترل ولتاژ به دلیل عدم نیاز به مدل دینامیکی بازوی ربات حجم محاسبات را بشدت کاهش و سرعت شبیه سازی را در این پروسه افزایش داد. این در حالی است که پیاده سازی راهبرد کنترل گشتاور با دو چالش اساسی روبرو است. نخست اینکه قانون کنترل گشتاور نیازمند مدل دقیقی از دینامیک پیچیده ربات است، و دوم اینکه فرمان کنترلی گشتاور نمی تواند به ورودی ربات مستقیماً اعمال گردد و در اجرا نیازمند حضور محرکه هاست.

فصل چهارم

کنترل امپدانس ترکیبی مقاوم با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ

کنترل‌کننده‌های مبتنی بر مدل در پیاده‌سازی دارای مشکلات زیادی هستند. علت اصلی این مشکلات مربوط به عدم مدل‌سازی دقیق سیستم‌های تحت کنترل است. این درحالی است که حتی مدل‌های تقریبی از این سیستم‌ها بسیار پیچیده بوده و طراحی کنترل‌کننده را دشوار می‌سازند. این عدم قطعیت‌ها بر روی عملکرد دینامیکی موثر بوده و در نتیجه پایداری سیستم حلقه بسته را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بطور کلی دو نوع عدم قطعیت در سیستم تحت کنترل وجود دارد. اولین مورد در ارتباط با فقدان اطلاعات مربوط به پارامترها و ساختار سیستم است و دومین مورد، ناشی از اغتشاشات داخلی و خارجی می‌باشد. بدلیل وجود این عدم قطعیت‌ها روش‌های کنترل غیرخطی متداول شبیه خطی‌سازی فیدبکی دیگر بازدهی لازم را نداشته، بر این اساس حوزه تحقیقات در زمینه کنترل مقاوم سرعت توسعه یافت [42].

در این میان کنترل تطبیقی بعنوان یکی از روش‌های کنترل مقاوم، با پیشنهاد قانون کنترلی که پارامترهای کنترل‌کننده را درمقابل عدم قطعیت‌ها تنظیم می‌کرد، مطرح گردید. اما همگرایی در کنترل تطبیقی تنها در صورت کم بودن سرعت تغییرات در پارامترها اتفاق می‌افتاد [43-44]. همچنین نیاز به اطلاع از ساختار مدل (از قبیل مرتبه سیستم) از دیگر مشکلات این روش می‌باشد. کنترل ساختار متغیرو بویژه کنترل تحقق مدل بر مبنای ساختار متغیر¹ (VSMRC) در حوزه کنترل مقاوم نیز مطرح گردید [45]. الگوریتم کنترل در VSMRC بدین صورت که در سطح لغزش یک جبران‌ساز دینامیکی بکاررفته است که ابعادش با ابعاد سیستم یکسان می‌باشد. بوسیله کنترل ساختار متغیر با رسیدن به سطح لغزش و ماندن بر روی آن مدل مطلوب محقق می‌شود. مقاوم بودن در مقابل عدم قطعیت‌ها، پاسخ سریع، عدم حساسیت نسبت به تغییر پارامترها و همچنین اغتشاشات خارجی از قابلیت‌ها این رویکرد می‌باشد [46-47]. اما در کاربرد با چالش‌هایی از قبیل، نیاز به اطلاع دقیق از کران عدم قطعیت‌ها و همچنین

1- Variable structure model reaching control

گسسته بودن سیگنال کنترل، مواجهه است. سیگنالهای کنترل گسسته عامل اصلی بوجود آمدن پدیده لرزش و در نتیجه تحریک دینامیکهای مدل نشده فرکانس بالا در سیستم است. جهت حذف پدیده چترنگ، از روش لایه مرزی استفاده گردید که باعث بوجود آمدن خطای حالت ماندگار گشت [48].

از دیگر متدهای کنترل مقاوم می توان به روشهای کنترل مبتنی بر منطق فازی اشاره کرد. این نوع رویکردها ابزار مهمی را جهت بهره گیری از دانش انسانی در تکمیل دانش ریاضی در اختیار طراحان قرار می دهد. کنترل کننده های فازی بر روی سیستم هایی که دینامیک آنها قابل فهم نبود و یا امکان مدل سازی ریاضی برای آنها وجود نداشت، عملکرد قابل قبولی را ارائه داد [49-50]. از دیگر زمینه های جذاب کنترل مقاوم می توان به روش های کنترل ترکیب یافته اشاره کرد. بطور نمونه ترکیبی از تکنیک های کنترلی از قبیل، کنترل تحقق مدل بر مبنای ساختار متغیر، کنترل فازی، کنترل تطبیقی و کنترل انتگرالی-تناسبی می تواند بعنوان یک رویکرد کنترلی جدید، عملکردی کارآمد را نتیجه دهد.

در این فصل برای نخستین بار جهت تحقق امیدانس ترکیبی، کنترل کننده ای مقاوم AFPSHIC¹ و مستقل از مدل دینامیک ربات و محرکه های آن با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ ارائه می شود. قانون کنترل ولتاژ مقاوم، بر اساس رویکردی سلسله مراتبی جهت غلبه بر عدم قطعیتها در تماس با محیط پیشنهاد می گردد. بدین صورت که، بکارگیری راهبرد کنترل ولتاژ باعث مستقل شدن الگوریتم کنترل از دینامیک ربات و عدم قطعیتهای مربوط به آن می گردد. در ادامه عدم قطعیتهای مربوط به مدل دینامیکی محرک های الکتریکی ربات توسط سیستم فازی تطبیقی تخمین می زنیم و سپس با بهره گیری از مفاهیم کنترل ساختار متغیره، دینامیک ناشناخته تداخل در تماس میان ربات و محیط جبران خواهد گردید، بگونه ای که مدل امیدانس مطلوب در فضای کار محقق گردد. . بعلاوه از یک کنترل کننده انتگرالی-تناسبی جهت حذف پدیده لرزش برای حصول به خطای حالت ماندگار صفر، استفاده می شود. کران بالا عدم قطعیت که بعنوان

1-Adaptive Fuzzy PI Sliding Mode Hybrid Impedance control (AFPSHIC)

یکی از چالشهای الگوریتمهای کنترل ساختار متغیر مطرح است، در اینجا دیگر نیاز به اطلاع از آن نیست و تنها کفایت که این کران موجود باشد تا با استفاده از قوانین تطبیق در هر لحظه تعیین شود. در ادامه تحلیل پایداری مربوط به کرانداربودن حالات و بروزرسانی پارامترها ارائه می‌گردد. در پایان نیز نتایج شبیه‌سازی بر روی ربات اسکارا و به طبع آن عملکرد سیستم کنترل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۲ طراحی کنترل کننده مقاوم

۴-۲-۱ مدل‌سازی

در ابتدا می‌بایست معادلات دینامیکی ربات به همراه محرکه‌های آن را به فرم قابل ارائه برای کنترل مود لغزشی درآوریم. در طراحی مود لغزشی باید معادلات بصورت زیر بیان گردند:

(1-4)

که در آن $q = [q, \dots, q^{n-1}]^T$ بردار حالت، q^n مشتق n ام مفصل q و ولتاژ موتورهاست.

دینامیک ربات را در تماس با محیط بصورت زیر در نظر بگیرید:

(2-4)

که در اینجا F_e بیانگر نیروی اندازه‌گیری شده از محیط است. همچنین معادله دینامیک الکتریکی و مکانیکی موتور الکتریکی برابر است:

$$J_m \ddot{\theta} + B_m \dot{\theta} + r \tau_l = \tau_m \quad (3-4)$$

$$u = RI + L\dot{I} + k_b r^{-1} \dot{q} + \phi \quad (4-4)$$

در رابطه فوق ϕ بیانگر اغتشاش است. که همواره دارای کران بالایی می‌باشد $|\phi| \leq \rho$

ارتباط زاویه چرخش موتور با زاویه چرخش مفصل بصورت زیر می‌باشد:

$$\theta \quad (5-4)$$

همچنین رابطه جریان با گشتاور موتور برابر است با :

$$\tau \quad (6-4)$$

حال با جایگذاری رابطه‌های (1-4) و (4-4) در رابطه (2-4) خواهیم داشت :

$$\tau \quad (7-4)$$

می‌توان جریان موتور را با جایگذاری رابطه (6-4) در (5-4) برحسب دینامیک ربات بدست آورد :

$$I \quad (8-4)$$

در رابطه فوق مشاهده می‌کنید جریان موتور در بردارنده تمامی دینامیک های بازوی ربات می‌باشد. با قراردادن رابطه (7-4) در (3-4) داریم

$$u = R \left(k_m^{-1} (J_m r^{-1} + rD) \ddot{q} + (B_m r^{-1} + rC) \dot{q} + rG + rJ^T F_e \right) + Li + k_b r^{-1} \dot{q} + \emptyset \quad (9-4)$$

رابطه فوق در فضای مفصلی است. با استفاده از ماتریس ژاکوبین آن را به فضای کار منتقل می‌کنیم.

با جایگذاری (3-3) در (9-4) داریم :

$$u = R \left(k_m^{-1} \left((J_m r^{-1} + rD) (J^{-1} \ddot{x} - J^{-1} \dot{J} \dot{q}) + (B_m r^{-1} + rC) \dot{q} + rG + rJ^T F_e \right) \right) + Li \quad -4)$$

$$+ k_b r^{-1} \dot{q} + \emptyset \quad (10)$$

حال با تعاریف

$$g \quad (4-)$$

$$(11)$$

$$-4)$$

$$(12)$$

خواهیم داشت

$$\dot{\chi} \quad (13-4)$$

اکنون فرم بدست آمده در معادله (13-4) برای بکارگیری در کنترل مود لغزشی مناسب می باشد.

۴-۲-۲ امیدانس ترکیبی

معادله مطلوب در راستای زیرفضای کنترل نیرو همانطور که در (22-3) فصل قبلی توضیح دادیم بصورت زیر تعریف می شود.

$$F \quad (14-4)$$

که در اینجا M_d و B_d ماتریس های میرایی و اینرسی مطلوب می باشند، F_d نیز نیروی مطلوب است. می توان محیط را با بر مبنای ماتریس های اینرسی، میرایی و سختی بصورت خطی در نظر گرفت. بنابراین

$$F \quad (15-4)$$

که در اینجا X_e بیانگر مختصات نقطه تماس می باشد، همچنین M_e ، B_e ، k_e به ترتیب ماتریس های اینرسی، میرایی و سختی مربوط به محیط هستند. با قراردادن معادله (15-4) در (14-4) داریم:

$$F \quad (16-4)$$

با توجه به این نکته که ما بطور معمول اطلاعاتی از جنس محیط یعنی ماتریس‌های M_e ، B_e ، k_e نداریم، معادله فوق بوضوح بیانگر این موضوع اساسی است که، با تعیین‌اینرسی و میرایی مطلوب یعنی M_d و B_d می‌توان پاسخ رابطه (16-4) را تنظیم نمود [51].

وضعیتی را تصور نمایید که مجری نهایی در راستای زیر فضای کنترل نیرو به دلیل اینکه سطح تماس دارای خوردگی است رها و دوباره درگیر شود. در این حالت مجری نهایی میبایست پس از رهاشدن از سطح تماس در راستای زیر فضای کنترل نیرو با سرعت محدود حرکت نماید، تا پس از برخورد دوباره، نیروهای ناخواسته حاصل از برخورد به حداقل برسند. با توجه به اینکه اگر ربات از سطح جدا گردد، نیروی اندازه‌گیری شده در این وضعیت صفر می‌شود $F_e = 0$ پس معادله (14-4) برابر است با:

$$F \quad (17-4)$$

با فرض اینکه $\dot{X}(0) = 0$ و با انتخاب M_d و B_d بصورت ماتریس‌های قطری مثبت معین، با فرض $\dot{X}(0) = 0$ با حل معادله (17-4) می‌توان درایه نام از بردار سرعت را بصورت زیر محاسبه نمود

$$\dot{X} \quad (18-4)$$

بنابراین همواره $|\dot{X}_i| \leq \left| \frac{F_{di}}{C_{di}} \right|$ و با انتخاب مناسب F_{di} و C_{di} می‌توان سرعت بازو را در راستای زیر فضای کنترل نیرو محدود نگاهداشت که کراندار ماندن نیروهای حاصل از برخورد در نقطه تماس را تضمین می‌نماید [51].

رابطه امیدانس ترکیبی با توجه به فصل قبل بصورت زیر بیان می‌گردد.

(19-4)

۴-۲-۳ طراحی کنترل ساختار متغیر

معادله امپدانس ترکیبی (19-4) را می توان براساس فرم کلی امپدانس بصورت زیر بیان نمود.

Λ (20-4)

e

e

e

کنترل امپدانس ترکیبی مقاوم مستلزم طراحی کنترل کننده ای است که امپدانس هدف در رابطه (20-4) را تحت خطاهای مدل سازی محقق سازد. در گام نخست باید، جبران ساز دینامیکی بصورت زیر تعریف گردد:

(21-4)

در اینجا $z \in R^n$ بردار حالت جبران ساز دینامیکی، $A \in R^{n \times n}$ ماتریس ثابت نیمه معین منفی، $K_{pz}, K_{vz}, K_{fz} \in R^{n \times n}$ ماتریس هایی جهت تعیین ساختاری سطح لغزش به طوری که مدل امپدانس محقق گردد. $F_1 \in R^{n \times n}$ ماتریس قطری ثابت و دلخواه، $F_2 \in R^{n \times n}$ نیز ماتریسی قطری و غیر تکین می باشد.

حال سطح لغزش را بصورت زیر تعریف می کنیم:

(22-4)

بر اساس سطح لغزش توصیف شده در (22-4)، زمانی که دینامیک سیستم بر روی سطح لغزش قرار بگیرد $\dot{S}_s = 0$, $S_s = 0$ گردد، پس داریم:

$$\{ \quad (23-4)$$

با جایگذاری (23-4) در معادله جبران ساز دینامیکی (21-4) خواهیم داشت:

$$(24-4)$$

با مقایسه رابطه (24-4) با (20-4) ماتریس های K_{fz} , K_{vz} , K_{pz} را بدست آوریم.

$$\begin{cases} K_{vz} = F_2^{-1}(M_d^{-1}C_d + F_2AF_2^{-1}) \\ K_{pz} = F_2^{-1}(M_d^{-1}K_d + F_2AF_2^{-1}F_1) \\ K_{fz} = F_2^{-1}M_d^{-1} \end{cases} \quad (25-4)$$

در نتیجه زمانی که معادله مود لغزشی (22-4) تحقق یابد به همراه آن مدل امپدانس مطلوب در (20-4) نیز برقرار می گردد. این رویکرد ویژه از کنترل ساختار متغیر را که پس از تحقق سطح لغزش، سیستم حلقه بسته به مدل معادلاتی مشخصی می رسد کنترل تحقق مدل بر مبنای ساختار متغیر می نامند.

۴-۲-۴ قانون کنترل

قانون کنترل بر اساس راهبرد کنترل ولتاژ و مستقل از مدل دینامیکی ربات و دینامیک محرکه های آن پیشنهاد می گردد. ولتاژ کنترلی باید در زمان محدود سیستم را به سطح لغزش برساند. به منظور تحقق مود لغزشی سیستم حلقه بسته باید شرایط $\dot{S}_s = 0$, $S_s = 0$ را برآورده سازد.

در ابتدا رابطه سطح لغزش (22-4) را با جایگذاری متغیر \dot{e}_I از رابطه (20-4) به فرم زیر بازنویسی می-کنیم:

$$S_s = \dot{x} - \dot{x}_{eq} \quad (26-4)$$

در اینجا \dot{x} سرعت خطی در فضای کار است. همچنین \dot{x}_{eq} را بصورت زیر است:

$$\dot{x}_{eq} = S\dot{x}_d - F_1 e - F_2 z \quad (27-4)$$

با مشتق گیری از سطح لغزش (26-4) داریم:

$$\dot{S}_s = \ddot{x} - \ddot{x}_{eq} \quad (28-4)$$

رابطه (13-4) را در (28-4) قرار می دهیم.

$$\dot{S}_s = f + gu - \ddot{x}_{eq} \quad (29-4)$$

شامل توابعی غیرخطی و کراندار در عین حال ناشناخته می باشد. قانون کنترل ولتاژ را به فرم زیر پیشنهاد می دهیم:

$$u = g^{-1}(-f + \ddot{x}_{eq} - u_c - DS_s) \quad (30-4)$$

در اینجا $D \in R^{n \times n}$ یک ماتریس قطری مثبت معین است. این ماتریس زمانی که انحرافی از سطح لغزش $S_s = 0$, $\dot{S}_s = 0$ بوجود آید، در قانون کنترل آن را جبران می کند تا حالات سیستم به سطح لغزش بازگردد. u_c ترم کنترلی مقاومی است که ولتاژ گسسته ای را جهت غلبه بر خطاهای مدل سازی

برای رسیدن به مود لغزشی در زمان محدود فراهم می‌آورد. در کاربردهای عملی دینامیک‌های سیستم و اغتشاش خارجی مشخص نیستند. قانون کنترل (30-4) بصورت معادل قطعی در فرم زیر بیان می‌گردد:

$$u = \hat{g}^{-1}(-\hat{f} + \ddot{x}_{eq} - u_c - DS_s) \quad (31-4)$$

اکنون رابطه (29-4) را بر اساس پارامترهای عدم قطعیت بازنویسی می‌کنیم.

$$\dot{S}_s = (f - \hat{f} + \hat{f}) + (g - \hat{g} + \hat{g})u - \ddot{x}_{eq}$$

$$\dot{S}_s = (f - \hat{f}) + \hat{g}u + \hat{f} + (g - \hat{g})u - \ddot{x}_{eq} \quad (32-4)$$

با جایگذاری قانون کنترل (31-4) در رابطه (32-4) داریم:

$$\dot{S}_s = f + \hat{g} \left(\hat{g}^{-1}(-\hat{f} + \ddot{x}_{eq} - u_c - DS_s) \right) + (g - \hat{g})u - \ddot{x}_{eq}$$

$$\dot{S}_s = (f - \hat{f}) - u_c - DS_s + (g - \hat{g})u \quad (33-4)$$

۱-۴-۲-۴ فازی تطبیقی

با توجه به قانون کنترل (33-4) نیازمند بکارگیری یک تقریبگر جامع^۱ برای تقریب توابع \hat{f} ، \hat{g} هستیم. بنابراین یک سیستم فازی تطبیقی را با ساختار فازی ساز منفرد، موتور استنتاج ضرب ممدانی، غیرفازی ساز میانگین مراکز و توابع تعلق گوسی را پیشنهاد می‌دهیم [55]. خروجی این سیستم فازی بصورت:

1- Universal approximator

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right)} = \theta^T \eta(X) \quad (34-4)$$

که $\theta = [\bar{y}^1, \dots, \bar{y}^M]^T$ مراکز توابع تعلق فازی خروجی می‌باشد که توسط قوانین تطبیق بروزرسانی می‌شود. همچنین $\eta = [\eta_1, \dots, \eta_M]^T$ بردار توابع تعلق گوسی است.

$$\eta_j = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right)} \quad j = 1, \dots, M \quad (35-4)$$

برای هر تابع پیوسته مانند f در مجموعه فشرده $U \subset R^n$ و برای هر $\varepsilon > 0$ دلخواه، وجود دارد یک سیستم فازی

$$f^*(X) = \theta^{*T} \eta^*(X) \quad \text{بطوریکه: (34-4)}$$

$$\text{SUP}_{X \in U} |f^*(X) - f(X)| < \varepsilon \quad (36-4)$$

اکنون توابع \hat{f}, \hat{g} در قانون کنترل (33-4) را توسط سیستم فازی تقریب می‌زنیم:

$$\hat{f} = \hat{\theta}_f^T \eta_f \quad (37-4)$$

$$\hat{g} = \hat{\theta}_g^T \eta_g \quad (38-4)$$

$$f = \theta_f^{*T} \eta_f + \varepsilon_f \quad (39-4)$$

$$g = \theta_g^{*T} \eta_g + \varepsilon_g \quad (40-4)$$

در اینجا $\varepsilon_f, \varepsilon_g$ خطاهای تقریب سیستم فازی می‌باشند. با تعریف:

$$\bar{\theta}_f = \theta_f^* - \bar{\theta}_f \bar{\theta}_g = \theta_g^* - \bar{\theta}_g \quad (41-4)$$

با قراردادن روابط (37-4) تا (41-4) در (33-4) خواهیم داشت:

$$\dot{S}_s = \tilde{\theta}_f^T \eta_f + (\tilde{\theta}_g^T \eta_g) u + \varepsilon_f + \varepsilon_g u - u_c - DS_s \quad (42-4)$$

و با تعریف مجموع خطاهای تقریب در قالب عبارت عدم قطعیت $\varepsilon = \varepsilon_g u + \varepsilon_f$ با فرض کرانی ثابت $|\varepsilon| \leq E$ نامشخص داریم:

$$\dot{S}_s = \tilde{\theta}_f^T \eta_f + (\tilde{\theta}_g^T \eta_g) u + \varepsilon - u_c - DS_s \quad (43-4)$$

بنابراین ترم کنترل مقاوم u_c را براساس کران عدم قطعیتها بصورت زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$u_c = E \operatorname{sgn}(S_s) \quad (44-4)$$

همانطور که مشاهده می‌کنید وجود تابع علامت $\operatorname{sgn}(\cdot)$ باعث ایجاد گسستگی در قانون کنترل می‌شود. حاصل این قانون کنترل گسسته، پدیده نامطلوب لرزش می‌باشد. لذا با استفاده از روش لایه مرزی الگوریتم زیر را برای حذف لرزش ارائه می‌دهیم.

اگر برای سطح لغزش لایه مرزی با ضخامت φ در نظر بگیریم. لرزش زمانی بوجود می‌آید که حالات سیستم در نزدیکی سطح لغزش و یا بعبارت دیگر داخل لایه مرزی $|S_s| < \varphi$ قرار می‌گیرد. بنابراین ترم کنترل مقاوم $E \operatorname{sgn}(S_s)$ را در داخل لایه مرزی توسط الگوریتمی که خطای حالت دائمی صفر را

تضمین نماید، تخمین می‌زنیم [52]. این تخمین را می‌توان توسط کنترل‌کننده انتگرالی-تناسبی^۱ با ساختار زیر پیشنهاد داد:

$$u_c(S_s|\alpha) = K_p S_s + K_I \int S_s dt = \alpha^T \psi(S_s) \quad (45-4)$$

که در اینجا $\psi(S_s) = [S_s, \int S_s dt]^T$, $\alpha = [K_p, K_I]^T$ است.

برای زمانی که حالات در خارج لایه مرزی $|S_s| > \varphi$ می‌باشد، سعی کنترلی^۲ در مقدار اشباع شده E بصورت زیر باقی می‌ماند:

$$u_c(S_s|\alpha) = E \operatorname{sgn}(S_s). \quad (46-4)$$

بطور کلی اندازه گین $\alpha = [K_p, K_I]^T$ و مقدار اشباع شده E هیچکدام معلوم نیستند. لذا از تقریب $u_c(S_s|\alpha)$ یعنی $u_c(S_s|\hat{\alpha})$ به فرم زیر استفاده می‌کنیم

$$u_c(S_s|\hat{\alpha}) = \begin{cases} \hat{E} \operatorname{sgn}(S_s) & |S_s| > \varphi \\ \hat{\alpha}^T \psi(S_s) & |S_s| < \varphi \end{cases} \quad (47-4)$$

که \hat{E} تقریب E و همچنین $\hat{\alpha}$ تقریبی از α هستند که توسط قوانین تطبیق تحت تابع لیاپانوف بروزسانی می‌شوند.

1-Proportional – integral controller
1-Control action

۴-۳ ماتریس انتخاب

همانطور که در فصل قبلی نیز اشاره گردید، در صورت برخورد بازوی ربات با سطح تماس، کنترل کننده نیازمند تغییر در الگوریتم کنترل جهت تحقق مدل امپدانس مطلوب در آن راستا می باشد. این تغییر توسط درایه های ماتریس انتخاب صورت می پذیرد. اگر این تغییرات بصورت نرم باشد، اثرات نامطلوب سوئیچ بین الگوریتم های کنترل به حداقل می رسد. زمانی که از تغییرات نرم برای درایه های ماتریس انتخاب صحبت می شود، منظور پیشنهاد تابعی است که وابسته به گذشت زمان باشد. بنابراین ماتریس انتخاب دیگر درایه های ثابتی ندارد، بلکه آنها بصورت توابعیاز زمان بیان می شوند. بر این اساس سیستم در طول مدت زمان سوئیچ باید پایدار باقی بماند. در نتیجه پایداری در طول عملکرد ماتریس انتخاب باید تحت تابع لیاپانوف تضمین گردد. در این بخش تابع پیشنهادی برای درایه های ماتریس انتخاب را بصورت یک سوئیچ نمایی پیشنهاد می دهیم.

$$S_{ii} = \begin{cases} e^{-\tau(t-\alpha_2)}, & F_e \neq 0 \\ 1 - e^{-\tau(t-\alpha_1)}, & F_e = 0 \end{cases} \quad (48-4)$$

در اینجا S_{ii} درایه ستون و سطر i ام ماتریس انتخاب است. τ ثابت زمانی است که بر اساس آن طول مدت زمان سوئیچ را تنظیم می کنیم. مقدار این ثابت زمانی در اختیار طراح می باشد. اما بهتر است که مقدار کوچکی در نظر گرفته نشود. زیرا باعث ایجاد خطای محسوسی در ردیابی مسیر مطلوب می شود. همچنین متغیر α_2 زمان برخورد و متغیر α_1 زمان جدا شدن از سطح تماس را برای ربات مشخص می کنند.

عملکرد این سوئیچ نمایی بدین صورت است که اگر بازوی ربات در یک راستا با سطح تماس برخوردی را انجام دهد، زمان با توجه به نیروی تماس حاصل از برخورد در متغیر α_2 ثبت می شود، با گذشت زمان و

برمبنای ثابت زمانی، درایه ماتریس انتخاب در آن راستا بصورت کاملاً نرم صفر می‌گردد. در نتیجه در راستای برخورد مدل امیدانس مطلوب در زیرفضای کنترل نیرو محقق می‌شود. در وضعیتی که بازوی ربات از سطح تماس جدا می‌گردد، زمان صفر شدن نیروی تماس در متغیر α_1 ثبت می‌شود، لذا درایه ماتریس انتخاب در آن راستا با گذشت زمان و برمبنای ثابت زمانی، بصورت کاملاً نرم یک می‌گردد. در نتیجه مدل امیدانس مطلوب در زیرفضای کنترل موقعیت محقق می‌گردد.

۴-۴ تحلیل پایداری

در اینجا تابع لیاپانوف را بصورتی ارائه می‌دهیم که علاوه بر حفظ پایداری بواسطه تحقق مود لغزشی، رابطه روزرسانی تمامی پارامترهای تطبیقی را نیز در برداشته باشد. بعلاوه این که راهبرد کنترل ولتاژ بر پایه مفصل مستقل مطرح می‌گردد. پس برای پایداری هر موتور یک تابع لیاپانوف مطرح می‌گردد. لذا تابع منتخب را به فرم زیر پیشنهاد می‌دهیم:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left[S_{si}^2 + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\theta}_{fi}^T \tilde{\theta}_{fi} + \frac{1}{\gamma_2} \sum_{j=1}^3 (\tilde{\theta}_{gji}^T \tilde{\theta}_{gji}) + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{E}_i^2 + \frac{1}{\gamma_4} \tilde{\alpha}_i^T \tilde{\alpha}_i \right] \quad (49-4)$$

در اینجا $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ گام‌های آموزش مربوط به قوانین تطبیق هستند، بعلاوه $\tilde{E} = E - \hat{E}$ و $\tilde{\alpha} = \alpha^* - \hat{\alpha}$ که مقدار بهینه $\hat{\alpha}$ و بصورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\alpha^* = \arg \min_{\hat{\alpha}} \left[\sup_{S_s} |u_c(S_s | \hat{\alpha}) - E \operatorname{sgn}(S_s)| \right] \quad (50-4)$$

با مشتق زمانی از (49-4) داریم:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^3 \left[S_{si} \dot{S}_{si} - \left(\frac{1}{\gamma_1} \tilde{\theta}_{fi}^T \dot{\tilde{\theta}}_{fi} + \frac{1}{\gamma_2} \sum_{j=1}^3 (\tilde{\theta}_{gji}^T \dot{\tilde{\theta}}_{gji}) + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{E}_i \dot{\tilde{E}}_i + \frac{1}{\gamma_4} \tilde{\alpha}_i^T \dot{\tilde{\alpha}}_i \right) \right] \quad (51-4)$$

حال با جایگذاری رابطه (43-4) در رابطه (51-4) و اضافه و کم کردن عبارت $u_{ci}(S_s|\alpha^*)$ داریم:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^3 \left[S_{si} \left(\tilde{\theta}_{fi}^T \eta_{fi} + \left(\sum_{j=1}^3 (\tilde{\theta}_{gji}^T \eta_{gji}) \right) u_i + \varepsilon_i - u_{ci}(S_s|\hat{\alpha}_i) + u_{ci}(S_s|\alpha^*) - u_{ci}(S_s|\alpha^*) - D_{ii} S_{si} \right) - \left(\frac{1}{\gamma_1} \tilde{\theta}_{fi}^T \dot{\hat{\theta}}_{fi} + \frac{1}{\gamma_2} \sum_{j=1}^3 (\tilde{\theta}_{gji}^T \dot{\hat{\theta}}_{gji}) + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{E}_i \dot{\hat{E}}_i + \frac{1}{\gamma_4} \tilde{\alpha}_i^T \dot{\hat{\alpha}}_i \right) \right] \quad (52-4)$$

ماتریس D قطری بوده و D_{ii} همان درایه سطر وستون i ام است. با در نظر گرفتن:

$$u_{ci}(S_{si}|\alpha_i^*) - u_{ci}(S_{si}|\hat{\alpha}_i) = \alpha_i^{*T} \psi(S_{si}) - \hat{\alpha}_i^T \psi(S_{si}) = (\alpha_i^* - \hat{\alpha}_i)^T \psi(S_{si}) = \tilde{\alpha}_i^T \psi(S_{si})$$

و در نتیجه بازنویسی رابطه (52-4) براساس (53-4) و قوانین تطبیق پارامترها:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^3 \left[\tilde{\theta}_{fi}^T \left(-\frac{1}{\gamma_1} \dot{\hat{\theta}}_{fi} + S_{si} \eta_{fi} \right) + \sum_{j=1}^3 \tilde{\theta}_{gji}^T \left(-\frac{1}{\gamma_2} \dot{\hat{\theta}}_{gji} + S_{si} \eta_{gji} u_i \right) + \tilde{\alpha}_i^T \left(S_{si} \psi_i(S_{si}) - \frac{1}{\gamma_4} \dot{\hat{\alpha}}_i \right) + S_{si} \left(\varepsilon_i - u_{ci}(S_{si}|\alpha_i^*) - \frac{1}{\gamma_3} \tilde{E}_i \dot{\hat{E}}_i - S_{si} D_{ii} S_{si} \right) \right] \quad (54-4)$$

بنابراین قوانین تطبیق پارامترها بصورت زیر می‌باشند:

$$\dot{\hat{\theta}}_{fi} = \gamma_1 S_{si} \eta_{fi} \quad (55-4)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_{gji} = \gamma_2 S_{si} \eta_{gji} u_i$$

$$\dot{\hat{\alpha}}_i = \gamma_4 S_{si} \psi_i(S_{si})$$

$$\dot{\hat{E}}_i = \gamma_3 |S_{si}|$$

با توجه به این حقیقت که $u_{ci}(S_{si}|\alpha_i^*)$ در ربع اول و سوم واقع شده:

$$u_{ci}(S_{si}|\alpha_i^*) = \begin{cases} = 0 & S_{si} = 0 \\ \geq 0 & S_{si} \neq 0 \end{cases} \quad (56-4)$$

بنابراین همواره $u_{ci}(S_{si}|\alpha_i^*) = |S_{si}||u_{ci}(S_{si}|\alpha_i)|$ است. لذا با در نظر گرفتن روابط (4-55) و (4-56) رابطه (4-53) را بازنویسی می‌کنیم:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^3 [S_{si}\epsilon_i - E_i|S_{si}| - S_{si}D_{ii}S_{si}] \leq - \sum_{i=1}^3 [|S_{si}|(E_i - |\epsilon_i|) + D_{ii}|S_{si}|^2] \leq 0 \quad (4)$$

(57)

بوضوح مشخص است که \dot{V} همواره نیمه معین منفی است. بنابراین با استفاده از لم باربالات [53]، حالات سیستم حلقه بسته همگی کراندار بوده و بردار خطا بصورت مجانبی به صفر میل می‌کند. با قرار گرفتن حالات سیستم بر روی $S_{si} = 0$ ، در سطح تماس امیدانسی مطلوب محقق می‌گردد.

۴-۵ شبیه‌سازی

شبیه‌سازی بر روی ربات اسکارا با توجه به قانون کنترل پیشنهادی در این فصل توسط نرم افزار مطلب بمدت 5 ثانیه صورت پذیرفت. مشخصات ربات اسکارا و پروسه شبیه‌سازی به همان صورت فصل 3 است. قانون کنترل ولتاژ به صورت مفصل به ربات اعمال می‌شود. بنابراین برای کنترل موتورهای هر مفصل از کنترل‌کننده‌ای جداگانه استفاده گردید. در ادامه عملکرد کنترل مورد ارزیابی قرار گرفت.

بردار موقعیت مطلوب، بردار نیروی مطلوب، بردار موقعیت تماس و میزان سختی محیط مانند شبیه‌سازی فصل 3 می‌باشد. در این شبیه‌سازی جهت بررسی عملکرد مقاوم در برابر اغتشاشات خارجی سیگنالهایی از نوع پله با دامنه 10 ولتی مستقیماً در سیگنال‌های کنترل موتور اول در ثانیه دوم، موتور دوم در ثانیه اول و موتور سوم در ثانیه سوم اعمال نمودیم.

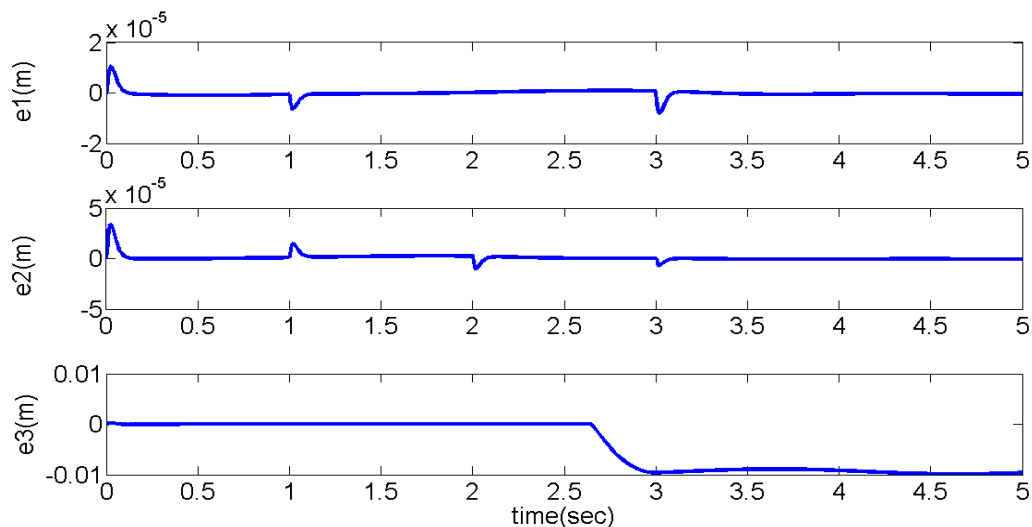
$$M_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} B_d = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} K_d = \begin{bmatrix} 10000 & 0 & 0 \\ 0 & 10000 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 \end{bmatrix} \quad -4)$$

(58)

$$F_1 = \begin{bmatrix} .05 & 0 & 0 \\ 0 & .05 & 0 \\ 0 & 0 & .05 \end{bmatrix} F_2 = \begin{bmatrix} .01 & 0 & 0 \\ 0 & .01 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} A = \begin{bmatrix} -300 & 0 & 0 \\ 0 & -300 & 0 \\ 0 & 0 & -300 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 300 & 0 & 0 \\ 0 & 300 & 0 \\ 0 & 0 & 300 \end{bmatrix}$$

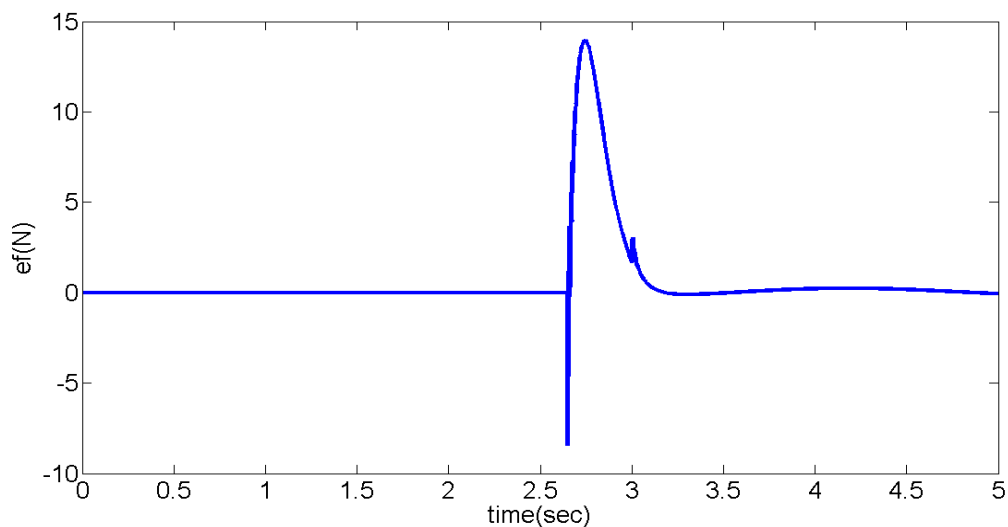
تقریب بردار f در رابطه (13-4) توسط 3 سیستم فازی و همچنین تقریب ماتریس g در رابطه (13-4) توسط 9 سیستم فازی صورت پذیرفت. در این شبیه‌سازی محیط و همچنین فاصله میان مجری نهایی و



قطعه کار هیچکدام برای ربات معلوم نیست. در شکل 1-4 خطای ردیابی موقعیت را مشاهده می‌کنید. در دو راستا x, y ردیابی بطور کامل صورت گرفته است، درحالی‌که در راستا z پس از برخورد با سطح خطایی به میزان $m 0.01$ پدیدار گشته، که این بدلیل عدم امکان نفوذ مجری نهایی در سطح تماس می‌باشد.

شکل ۱-۴ خطای ردیابی موقعیت مطلوب

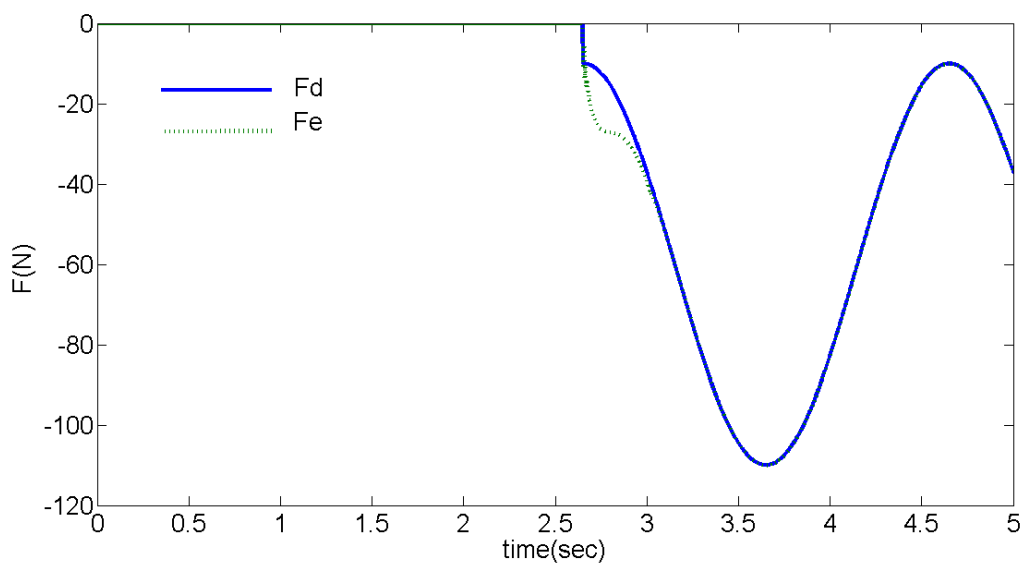
در شکل ۲-۴ نیز شاهد ردیابی موفق نیروی مطلوب در راستا محور z پس از برخورد هستیم. در این شکل



خطای ردیابی نیرو مطلوب ترسیم گردیده است. همانطور که مشاهده می‌کنید، ایجاد نیروهای ضربه‌ای

شکل ۴-۲ خطای ردیابی نیروی مطلوب

حاصل از برخورد ربات با محیط، خطایی را در حالت گذرا بوجود آورده که توسط سوئیچ نمایی با تغییر وضعیت کنترل‌کننده در حالت ماندگار به صفر رسیده است. اثر عملکرد مناسب سوئیچ نمایی در ماتریس انتخاب به خوبی در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌کنید پس از برخورد سوئیچ نمایی به صورت کاملاً نرم در راستا محور Z مدل امیدانس مطلوب را در زیرفضای کنترل نیرو محقق می‌-

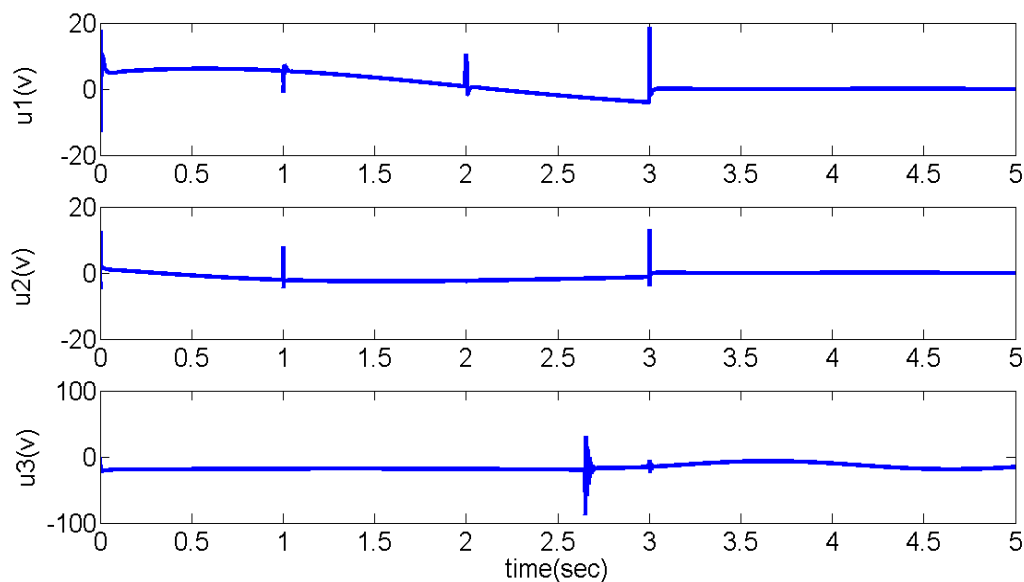


سازد.

شکل ۴-۳ عملکرد مناسب سوئیچ نمایی

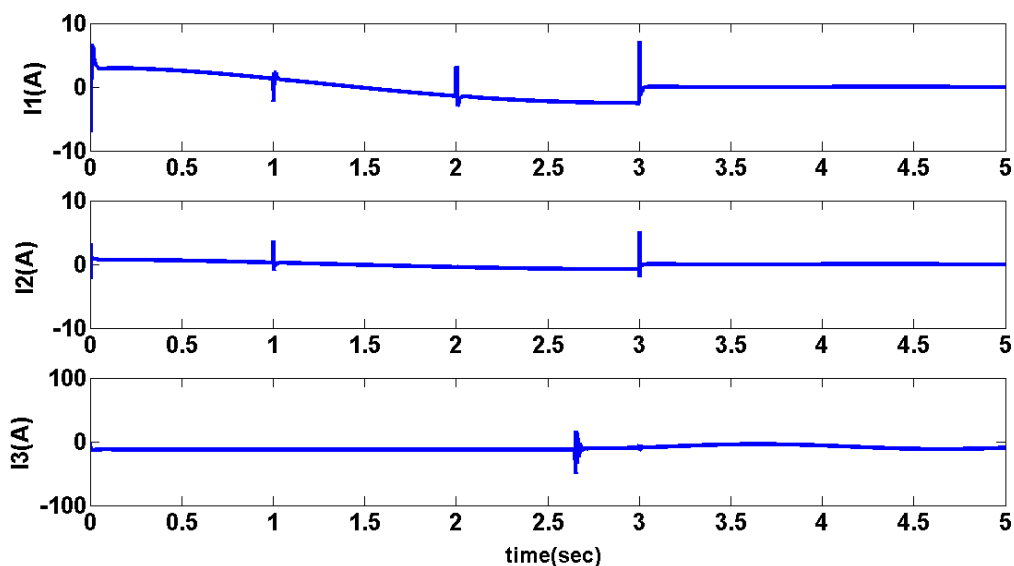
در شکل ۴-۴ سیگنالهای ولتاژ کنترلی هر 3 موتور ربات ترسیم شده است، چنانچه ملاحظه می‌شود با وجود دامنه بزرگ اغتشاشات نسبت به مقدار ماکزیمم ولتاژ کنترلی موتورها، باز هم سیستم به خوبی اثر این اغتشاشات را دفع کرده و ناپایدار نمی‌گردد. همچنین مقادیر سیگنالهای کنترل در محدوده قابل قبولی برای پیاده‌سازی هستند. هردو سیگنال کنترل موتورهای اول و دوم پس از زمان 3 ثانیه صفر می‌گردند،

در حالیکه بعلت اعمال نیرو مداوم بر روی سطح تماس موتور سوم همچنان دارای ولتاژ کنترلی غیر صفر می باشد. در هیچکدام از سیگنالها شاهد پدیده لرزش نیستیم که موفقیت قانون کنترل ترکیبی پیشنهادی را نشان می دهد.



شکل 4-4 سیگنالهای کنترل ولتاژ

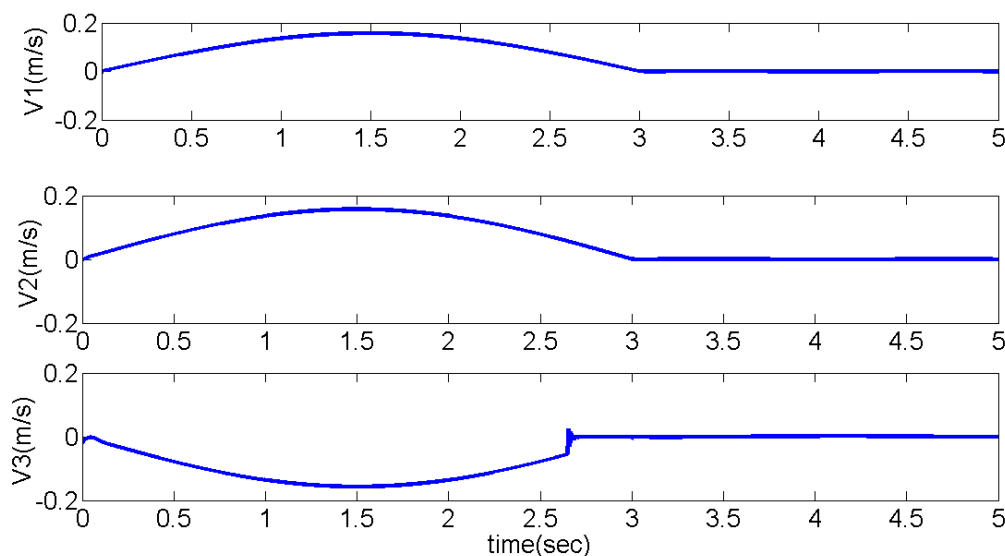
بر اساس راهبرد کنترل ولتاژ مبنی بر این مطلب که جریان موتور تابعی از ولتاژ آن است و در صورت کراندار بودن ولتاژ، جریان آن نیز کراندار باقی می ماند. می توان این مهم را در شکل 4-5 بخوبی مشاهده



کرد.

شکل ۴-۵ سیگنالهای جریان موتور

در شکل ۴-۶ سرعت مجری نهایی را در هر ۳ راستا فضای کار مشاهده می‌کنید. سرعت مجری نهایی در راستا محور Z پس از برخورد دارای تغییرات ناگهانی شده و در نتیجه نیروهای ضربه‌ای را حاصل می‌-

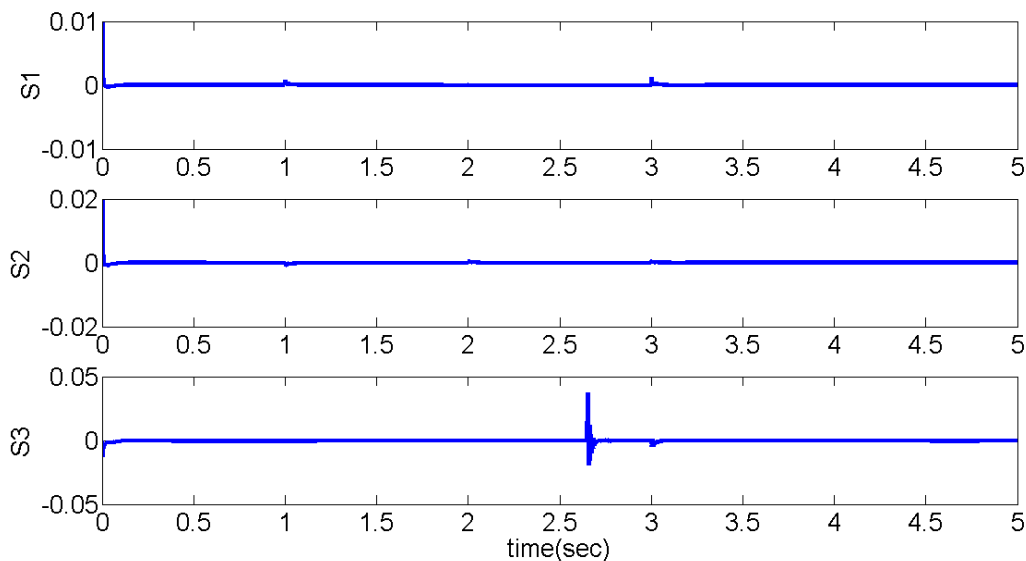


کند. اما به دلیل محدود ماندن سرعت، این نیروهای ضربه‌ای نیز محدود باقی می‌مانند.

شکل ۴-۶ سرعت مجری نهایی در فضای کار

در زمان برخورد بعلت اینکس سطح لغزش جدیدی برای تحقق مدل امیدانس مطلوب در زیرفضای کنترل نیرو، در کنترل‌کننده تعریف می‌شود. انحرافی محسوس از مقدار صفر برای سطح لغزش بوجود می‌آید. در اینجا وجود ماتریس D که در قانون کنترل (۴-۳۳) مطرح گردید، منجر به بازگشت سریع سطح لغزش

قبل از ناپایداری سیستم به مقدار صفر می‌گردد. در شکل 4-7 این وضعیت را برای سطح لغزش در راستا محور تماس Z را ملاحظه می‌کنید.



شکل 4-7 وضعیت سطوح لغزش

۴-۶ نتیجه‌گیری

در این فصل برای نخستین بار کنترل امپدانس ترکیبی مقاوم با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ پیشنهاد گردید. قانون کنترل پیشنهادی سیستم حلقه بسته را در برابر عدم قطعیت‌ها از قبیل ساختاری، غیر ساختاری و اغتشاش مقاوم گردانید. با توجه به اینکه در طراحی این قانون به مدل دینامیکی ربات و حتی محرکه‌های آن نیازی نیست. از مهمترین مزیت‌های کنترل‌کننده پیشنهادی بکارگیری الگوریتم‌های

کنترل کلاسیک به همراه روش‌های کنترل هوشمند در راستای ارائه رویکردهای ترکیبی نوین جهت کنترل امیدانس می‌باشد. بطور کلی می‌توان بیان کرد که کنترل ساختار متغیر عملکرد حالت گذرا سیستم را بخوبی بهبود بخشیده است و همچنین در حالت ماندگار کنترل‌کننده انتگرالی-تناسبی منجر به صفر شدن خطای حالت دائمی گردیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بر عملکرد موفق کنترل‌کننده تاکید دارد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پایان نامه روش نوینی در جهت تحقق کنترل امپدانس ترکیبی مقاوم بر اساس راهبرد کنترل ولتاژ در حضور عدم قطعیت‌ها پیشنهاد شده است. پس از مرور روش‌های کنترل نیرو و امپدانس، روش کنترل امپدانس ترکیبی برای کنترل ربات در سطح تماس انتخاب گردید. در فصل دوم چگونگی مدل‌سازی سینماتیکی و دینامیکی بازوهای ماهر مکانیکی را مرور کردیم و مدل ریاضی ربات اسکارا را معرفی نمودیم. مفاهیم مربوط به کنترل امپدانس ترکیبی را به تفصیل در فصل سوم ارائه کردیم و بر مبنای این مفاهیم، قوانین کنترلی را بر اساس دو راهبرد کنترل ولتاژ و گشتاور پیشنهاد دادیم. با استفاده از این قوانین، به کنترل امپدانس ترکیبی بازو ماهر اسکارا پرداختیم. علاوه بر این در صورت تغییر در زیرفضای کنترلی، با پیشنهاد یک سیستم فازی تغییر در درایه‌های ماتریس انتخاب را بصورت کاملاً نرم، میسر نمودیم. با توجه به اینکه کنترل کننده پیشنهادی در این فصل را بر مبنای مدل مطرح کردیم، بنابراین مساله مواجهه با عدم قطعیت‌ها در آن لحاظ نگردید. از این رو در فصل چهارم به ارائه رویکردی مقاوم در برابر عدم قطعیت‌ها با استفاده از راهبرد کنترل ولتاژ، در جهت تحقق مدل امپدانس مطلوب در تماس ربات با محیط پرداختیم. مدل‌سازی جدیدی از دینامیک ربات به همراه محرکه‌ها را در ابتدا ارائه نمودیم. سپس کنترل کننده‌ای بر اساس رویکردی ترکیبی از الگوریتم‌های کنترلی، در این فصل پیشنهاد دادیم. این کنترل کننده بر اساس ساختاری سلسله مراتبی جهت غلبه بر عدم قطعیت‌ها طراحی گردید. بر این اساس که جبران عدم قطعیت‌های مدل دینامیکی ربات توسط راهبرد کنترل ولتاژ صورت پذیرفت. سپس عدم قطعیت‌های مدل دینامیکی محرکه‌ها با استفاده از یک سیستم فازی تطبیقی تخمین و در اختیار قانون کنترل قرار گرفت. در انتها با بکارگیری کنترل ساختار متغیر در جبران عدم قطعیت‌ها در سطح تماس تضمین حصول به مدل امپدانس مطلوب را در برابر محیط‌های ناشناخته محقق نمودیم. پدیده لرزش سیگنال کنترل نیز توسط کنترل کننده

انتگرالی- تناسبی حذف گردید. مستقل سازی رویکرد پیشنهادی از کران عدم قطعیت نیز با بهره گیری از یک مکانیزم تطبیق صورت پذیرفت. با توجه به اینکه کنترل کننده در دو زیر فضای کنترلی در سطح تماس فعال است، مکانیزم آهنگ تغییر درایه های ماتریس انتخاب را براساس استفاده از یک تابع نمایی با تضمین پایداری تحت تابع لیاپانوف مطرح کردیم. نهایتا شبیه سازی قانون کنترل پیشنهادی در این فصل، عملکرد موثر روش پیشنهادی را نشان می دهد.

نوآوری این پایان نامه در ارائه روشی بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ می باشد که هدف آن تحقق امپدانس ترکیبی در حضور عدم قطعیت ها است. پیشنهاد ترکیب روش های کنترلی از قبیل فازی تطبیقی، مود لغزشی و کنترل انتگرالی-تناسبی بر اساس راهبرد کنترل ولتاژ باعث گردید، روش کنترل مقاومی حاصل آید که توانایی لازم جهت غلبه بر عدم قطعیت ها را بخوبی داراست. از مزایای روش پیشنهادی می توان به، مستقل بودن قانون کنترل از مدل ربات و محرکه های آن، عدم نیاز به کران عدم قطعیت ها و مقاوم بودن آن در برابر محیط های ناشناخته و همچنین بار محاسباتی بمراتب کمتر از روش های مبتنی بر گشتاور برشمرد.

۲-۵-۲ پیشنهادات

در این بخش جهت بهبود عملکرد، راهکارهایی برای پژوهش های آینده، پیشنهاد و بصورت زیر بیان می گردد:

- با توجه به اینکه بطور معمول مدل دینامیکی محیط ناشناخته و در مواردی بسیار پیچیده است، می توان از یک سیستم عصبی جهت تخمین این مدل و در نتیجه استفاده از آن در کنترل کننده بهره جست.
- پارامترهای کنترل کننده در اینجا بر اساس سعی و خطا انتخاب شده اند، استفاده از الگوریتم های هوشمند، باعث بهبود عملکرد سیستم کنترل بویژه در حالت گذرا می شوند.

مراجع :

- [1] Bonilla I., Reyes F., (2011) "A Dynamic-compensation Approach to Impedance Control of Robot Manipulators", Journal of Intelligence Robotic System, 63:51_73.
- [2] Hogan N., (1985) "Impedance control: an approach to manipulators", Part 1, 2, 3. J. Dyn Syst Meas Control 107:1-24.
- [3] Spong W., Hutchinson S., (2008) "Robot Dynamics and Control", Book in Robotic and Control, Wiley India Pvt, ch.19.
- [4] Kim B., Chong N., (1999) "Intelligent Compliance Control for Robot Manipulators Using Adaptive Stiffness Characteristics", International Conference on Robotics & Automation Canada.
- [5] Vukobratovic M., (2009) "Dynamic and robust control of robot-environment interaction", Book in Robotic and Control, World Scientific.
- [6] Whitney D.E., Nevins J.L., (1986) "What is Remote Centre Compliance (RCC) and What Can It Do", in Robot Sensors Volume 2 – Tactile and Non-Vision, IFS Publication, Springer-Verlag, Berlin, 3-17.
- [7] Raibert M.H., Craig J.J., (1981) "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 102, 126-133.
- [8] Anderson R., Spong M., (1988) "Hybrid Impedance Control of Robotic Manipulators, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 5, 549-556.
- [9] Anderson R., Spong M., (1988) "Hybrid Impedance Control of Robotic Manipulators, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 5, 549-556.
- [10] Whitney D.E., (1987) "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control", The Inter. Journal of Robotic Research, Vol. 6, No.1, 3-14.
- [11] Hogan N., (2005) "Impedance and Interaction Control", Robotics and Automation Handbook, CRC Press.
- [12] Colbaugh R., Seraji H., (1992) "Direct Adaptive Impedance Control of Robot Manipulators", Journal of Robotic Systems 10(2), 217-248.

- [13] Chiu C., Lian K., (2004) "Robust adaptive motion/force tracking control design for uncertain constrained robot manipulators", *Int. J. Elsevier, Automatica*, vol 40, 2111-2119.
- [14] Liu G.J., Goldenberg A.A., (1991) "Robust Hybrid Impedance Control of Robot Manipulators", *IEEE Int. Con. Robotics and Automation*, Sacramento, California.
- [15] Vukobratovic M., Surdilovic D., (2009) "Dynamics and robust control of robot-environment interaction", Singapore, World Scientific, ch.3.
- [16] Alavandar S., Nigam M.J., (2009) "New hybrid neuro-fuzzy algorithms for robot control with uncertainties-Comparative study", *ISA Transactions*, Volume 48, Issue 4, Pages 497-502.
- [17] Li Z., Ge S.S., Adams M., Wijesoma W.S., (2008) "Robust adaptive control of uncertain force/motion constrained nonholonomic mobile manipulators", *Int. J. Elsevier, Automatica*, Volume 44, Issue 3, Pages 776-784.
- [18] Li Z., Chen W., Luo J., (2008) "Adaptive compliant force-motion control of coordinated non-holonomic mobile manipulators interacting with unknown non-rigid environments", *Int. J. Elsevier, Neurocomputing*, Volume 71, Issues 7-9, Pages 1330-1344.
- [19] Kelly R. R., (1988) "Unified approach to adaptive control of robotic manipulators", 29th IEEE Con. Decision and Control.
- [20] Colbaugh R., Seraji H., (1990) "Adaptive impedance control of redundant manipulators", 31th IEEE Con! Decision and Control, pp. 2261-2266.
- [21] Slotine J. J. E. Li W., (1987) "Adaptive strategies in constrained manipulators, *IEEE Int. Conf. Robotics Automation*".
- [22] [18] Ge S.S., Lee T. H., Zhu G., Hong F., (2001) "Variable structure control of a distributed-parameter flexible beam", *J. Robot. Syst.*, Vol, 18, pp. 17-20.
- [23] Yao B. F., Chan S. P., Wang D., (1992) "A unified approach to variable structure control of robot manipulators", *American Control Conf.(Chicago)*, pp. 1482-1486.
- [24] Yoshikawa T., (1987) "Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators-Description of Hand Constraints and Calculation of Joint Driving Force", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, RA-3(5).

- [25] Yoshikawa T., (1998) "Hybrid Impedance Control in Constraint Coordinates Using a Disturbance Observer", Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control.
- [26] Giordano V., Topalov A.V., Kaynak O., Turchiano B., (2004) "Sliding-mode approach for on-line neural identification of robotic manipulators", 5th Asian Control Conference., Vol.3, pp. 2060- 2065.
- [27] Sadati N., Ghadami R., Bagherpour M., (2005) "An adaptive neural network sliding controller for robotic manipulators" IEEE International Conference on Industrial Technology, pp.1246-1251.
- [28] Xuemei R., Rad A.B., Lewis F.L, (2007), "Neural Network-Based Compensation Control of Robot Manipulators with Unknown Dynamics," American Control Conference, pp.13-18.
- [29] Cohen M. , and Flash T.,(1991) "Learning impedance parameters for robot control using an associative search network," IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 7, pp. 382–390.
- [30] Katic D., Vukobratovic M., (1994) "Learning impedance control of manipulation robots by feedforward connectionist structures", in Proc. IEEE Conf. Robot. Automat., pp. 45–50.
- [31] Chien M.C., Huang, A.C., (2004) "Adaptive impedance control of robot manipulators based on function approximation technique", Robotica., 22, pp. 395–403.
- [32] Yanan Li., Shuzhi S., (2013) "Neural networks impedance control of robots interacting with environments", IET Control Theory Appl., Vol. 7, Iss. 11, pp. 1509–1519.
- [33] Bhasin S., Dupree K.,(2011) "Neural Network Control of a Robot Interacting With an Uncertain Viscoelastic Environment", IEEE transactions on control systems technology, vol. 19, no. 4.
- [34] Tarokh M., and Bailey S.,(1997) "Adaptive fuzzy force control of manipulators with unknown environment parameters", Journal of Robotic Systems 14, No. 5, pp. 341–353.
- [35] Marques S.J.C., Baptista L.F.,(2011) "Neural Network Control of a Robot Interacting With an Uncertain Viscoelastic Environment", IEEE transactions on control systems technology, vol. 19, no. 4.
- [36] Harkawy A. B.,(2004) "An Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control Scheme for Robotic Systems ", In Proceedings of the First International Conference on Informatics in Control.

- [37] Fateh M.M.,(2008) "On the voltage based control of electrical manipulators", International Journal of Control, Automation and System, Vol. 6, No.5, pp. 702–712.
- [38] Fateh M.M.,(2010) "Robust control of electrical manipulators by joint acceleration", International Journal of Innovative Computing, Information and Control", Vol. 6, No. 12, pp. 5501-5510.
- [39] Fateh M.M., (2009) "Robust control of electrical manipulators by reducing the effects of uncertainties", World Applied Sciences Journal, Vol. 7, pp.161–167.
- [40] Fateh M.M., (2010) "Robust fuzzy control of electrical manipulators", Journal of Intelligent and Robotic Systems", Vol. 60, No. (3), pp. 415-434.
- [41] Fateh M.M., BabaghasabhaR., (2013) "Impedance control of robots using voltage control strategy", J. Nonlinear Dyn.
- [42] Tadjine M.,ChekirebH.,Djemai,M. (2003) "On a sliding mode control andobserver of inductionmotor," in Proc. IEEE Int. Conf. Syst.,Man, Cybern.Oct. 5–8, pp. 1371–1377.
- [43] AstromK. J.,WittenmarkB.,(1994) "Adaptive Control", 2nd ed. NewYork: Addison-Wesley.
- [44] NarendraK. S., AnnaswamyA. M.,(1989) "Stable Adaptive Systems". EnglewoodCliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [45] ChanS. P. GaoW. B.,(1989) "Variable structure model reaching controlstrategy for robot manipulators", IEEE Inf. Conf. Robotics and Automation.
- [46] GES.,Slee T.H.,Zhu G.,HongF.,(2001) "Variable structure control of adistributed-parameter flexible beam", J. Robot. Syst., Vol, 18, pp. 17-20.
- [47] YAO,B. CHAN,S. P. AND WANG,D. (1992)"A unified approach to variable structure control of robot manipulators", American Control Conf. (Chicago), pp. 1482-1486.
- [48] KimY. K., JeonG. J., (2004)"Error reduction of sliding mode control usingsigmoid-type nonlinear interpolation in the boundary layer," Int. J.Control Syst., vol. 2, no. 4, pp. 523–529, Dec.
- [49] XinW. L.,(1996) "A Course in Fuzzy Systems and Control". EnglewoodCliffs, NJ: Prentice-Hall.

- [50] Lee C. C., (1990) "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller, part I and part II," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 20, no. 3, pp. 404–435, Mar./Apr.
- [51] Jafari A., Ryu J., (2013) "Sliding Mode Hybrid Impedance Control of Robot Manipulators Interacting With Unknown Environments Using VSMRC Method", Robotics (ISR), 44th Int.
- [52] Shahnazi R., Akbarzadeh R., (2008) "PI Adaptive Fuzzy Control With Large and Fast Disturbance Rejection for a Class of Uncertain Nonlinear Systems", IEEE Transaction On Fuzzy Systems, vol. 16, no. 1.
- [53] Slotine J.J.E., Li W., (1991) "Applied nonlinear control", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [54] <http://lsro.epfl.ch>.
- [55] Xin W. L., (1996) "A Course in Fuzzy Systems and Control". Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall,

Abstract

This paper presents a robust hybrid impedance controller for electrically driven robot manipulators. The contribution of this article is overcoming uncertainties including manipulator, actuator and interaction dynamics applying the following hierarchical approach. The control law is designed based on the voltage control strategy (VCS) which compensates the manipulator dynamics effectively. Uncertainties related to the actuator models are estimated by adaptive fuzzy systems, and a variable structure model reaching control (VSMRC) in the sliding mode copes with the unknown dynamics of the interaction between manipulator and environment so that the desired impedance model is governed. Moreover, a PI control structure is employed to attenuate chattering phenomenon. Also, the uncertainty upper bound which is a challenging problem in most robust algorithms is not required in this work. A stability analysis is presented to drive the adaptation laws and guarantee the boundedness of all state variables. In contrast with previous approaches, this controller is more robust and less computational. Simulation results reveal the effectiveness of the proposed method applied on a SCARA robot driven by permanent magnet dc motors.

Keyword : Hybrid impedance control, Voltage control strategy, Variable structure control, Adaptive fuzzy approximator, PI controller