



کنترل فازی تطبیقی امپدانس بازوی رباتیک با رویکرد کنترل ولتاژ

دانشجو : مصطفى اخيانى

استاد راهنما : پروفسور محمد مهدی فاتح

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهريور ۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : برق و رباتیک گروه : کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مصطفی اخیانی تحت عنوان : کنترل فازی تطبیقی امپدانس بازوی رباتیک با رویکرد 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	اساتيد راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

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 :

تقديم به

پدر و مادرم

بزرگانی که به من آموختند:

« برای هر پرسشی، بی شک پاسخی یافت خواهد شد »

تشکر و قدردانی

با سپاس فراوان از استاد گرانقدرم، جناب پروفسور محمدمهدی فاتح، که بدون راهنماییهای دقیق، صبر و شکیبایی و حمایتهای بیاندازه ایشان، ارائه این رساله مقدور نبود. امیدوارم این اثر، گوشهای از زحمات ایشان را جبران نموده باشد. تشکر فراوان از خانوادهام که در تمام مراحل پشتیبان من بودند، مخصوصاً برادرم سینا اخیانی که در تدوین این اثر کمک شایانی نمود. از دوستان خوبم، آقای امیرحسین کوهستانی و آقای عیسی عبدی سپاسگزارم که هیچ گاه لطف خود را از من دریغ ننمودند و از تمام کسانی که مرا در انجام این امر همراهی نمودند و نامی از آنها برده نشده است، خالصانه تشکر میکنم. اینجانب مصطفی اخیانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی کنترل دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایاننامه کنترل فازی تطبیقی امپدانس بازوی رباتیک با رویکرد کنترل ولتاژ تحت راهنمائی پروفسور محمد مهدی فاتح متعهد میشوم :

- تحقيقات در اين پاياننامه توسط اينجانب 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 پایاننامه 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 نتایح اصلی پایان نامه تأثیرگذار بودهاند در مقالات مستخرج از پایاننامه رعایت میگردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان امه ، 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.

تاريخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامههای رایانهای، نرم-افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود میباشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
 - استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایاننامه بدون ذکر مرجع مجاز نمیباشد.

چکیدہ

در این پایاننامه، طراحی کنترلکننده فازی تطبیقی امیدانس با راهبرد کنترل ولتاژ جهت کنترل تعامل بازوی رباتیک با محیط ارائه میشود. کنترل امپدانس پیشنهادی یک روش مدون جهت تضمین پایداری و عملکرد مناسب تعامل ربات با محیط ارائه می کند و از این نظر نسبت به روش کنترل ترکیبی نیرو/موقعیت برتری دارد. همچنین بر عدمقطعیتهای مدل دینامیکی و سینماتیکی بازوی رباتیک، عدمقطعیت مدل دینامیکی محرکهها و اغتشاشات خارجی نظیر عکسالعمل محیط غلبه می-نماید. از آنجا که کنترل امپدانس مبتنی بر خطای مدل موقعیت نسبت به روش مبتنی بر خطای مدل نیرو ارجحیت دارد، در کنترل پیشنهادی از روش تطبیقی جهت کنترل امپدانس استفاده شده است. در هیچکدام از روشهای کنترل امپدانس قبلی، عدمقطعیت سینماتیکی و ماتریس ژاکوبین مطرح نشده است. بنابراین به روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی بعنوان یک روش موفق در کنترل فضای کار در حضور عدمقطعیت سینماتیکی بازوی رباتیک توجه شده است. این روش که با راهبرد کنترل گشتاور است می تواند انتخاب مناسبی برای اجرای کنترل امپدانس مبتنی بر خطای مدل موقعیت باشد. در این پایاننامه یک روش کنترل تطبیقی نوین با راهبرد کنترل ولتاژ جهت غلبه بر عدم-قطعیتهای سینماتیکی ارائه میشود و با روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی مقایسه می گردد. در پایان، کنترلکننده فازی تطبیقی با راهبرد کنترل ولتاژ جهت دستیابی به سطح لغزش انتگرالی غیرخطی تطبیقی، ارائه میشود. تحلیل و شبیهسازی روشهای فوق بر روی بازوی رباتیک دو رابط نشان میدهد که کنترل فازی تطبیقی با اندازه گیریهای کمتر، پایداری و عملکرد بهتری را هم در كنترل موقعيت فضاى كار و هم در كنترل امپدانس مبتنى بر موقعيت تضمين مىكند. كلمات كليدى: بازوى رباتيك، كنترل اميدانس، كنترل تطبيقي، عدمقطعيت سينماتيكي، كنترل

فازى تطبيقى

4 - 1	•
معدمه	•

(-

11	: سینماتیک و دینامیک ربات)
	-) ، ربات) ، ربات
) شینمانیک مستقیم و ماریش را توبیق
۱۴) سينماتيک معکوس
۱۵) مدل دینامیکی بازوی رباتیک
) مدل دینامیکی بارو در قصای آراد
۱۹) مدل دینامیکی محرکه ها
لتاژ ۲۰	 -) معادلات بازو به همراه موتورهای مجهز به راه انداز و
٢٣	: کنترل امپدانس -)

.....

۱

	6 × 67
	-) ہی امپدانس
	-) معادل و نورتن
	-) کاربرد امپدانس در حوزه رباتیک
79) كارهاى غيرتماسى
۲۸) کارهای تماسی
) ت انعطاف
) کارهای نیازمندِ نیرو
	-) مفهوم کنترل امپدانس
٣٧) پایداری و عملکرد در کنترل امپدانس
	-) كنترل امپدانس ربات

۴۵) راهبرد کنترل گشتاور
) کنترل امپدانس ر مبنای خطای مدل نیرو
) کنترل امپدانس ر مبنای خطای مدل
۵۵) راهبرد كنترل ولتاژ
) كنترل امپدانس ى ى مدل يرو
) کنترل امپدانس ر مبنای خطای مدل
	-) نق امپدانس <u>ی</u>
۶٠	- -) تحقق با مشتق گیری از نیرو
۶٠	- -) تحقق بدون مشتق گیری از نیرو

: کنترل تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار با عدم قطعیت دینامیکی و ۶۳ سينماتيكي ------راهبرد كنترل گشتاور -) كنترل ردگيرى ژاكوبين تطبيقى..... - -) کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی ربات در تعامل با محیط.......................... -) راهبرد كنترل ولتاژ....... ا بررسی قانون کنترل در $|u_{eqi}| < u_{i,\max}$) ا بررسی قانون کنترل در (- - -- - -) يل پايدارى..... ا بررسی عملکرد در $\left|u_{i,eq}
ight| \geq u_{i,\max}$) بررسی عملکرد در (- - --) مثال بازوی دو رابط و روش -) روش كنترل ردگیری ژاكوبین تطبیقی...... ۷۵ -) روش پیشنهادی..... ۷۷ - -) مقايسه روش ها..... ٧٧

¥9	د کنترل فازی تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار ۹		5 :	(
	یت دینامیکی و	ی بازوی رباتیک در حضور	 ل فازی	كنتر	(-
۸۱	اور	ازی تطبیقی با راهبرد کنترل گشت	كنترل ف	(-	-
۸۳	كنترل ولتاژ	ازی تطبیقی پیشنهادی با راهبرد آ	كنترل ف	(-	-



فهرست اشكال

۱۲	شکل ۲-۱ : بازوی رباتیک (از نوع دو-رابط)
۱۷	شکل ۲-۲ : بازوی رباتیک در تعامل با محیط
۱۹	شکل ۲-۳ : مدل شماتیک موتور DC مغناطیس دائم (برای هر مفصل)
۲۰	شکل ۲-۴ : نمودار بلوکی موتور DC مغناطیس دائم (برای هر مفاصل)
74	شکل ۳-۱ : شبکه تک-قطبی
۲۵	شکل ۳-۲ : سیستم جرم-فنر-دمپر
۲۵	شکل ۳-۳ : مدل شبکهای تعامل ربات و محیط (در یک راستا)
۲۶.	شکل ۳-۴ : (الف و ب) معادل تونن و نورتن محیط ، (ج و د) معادل تونن و نورتن ربات
۲۷	شکل ۳-۵ : امپدانس ظاهری ربات کنترل موقعیت شده (در یک جهت مختصاتی)
۲۸	شکل ۳-۶ : مدل نورتن و تونن برای کارهای غیرتماسی
۲۹	شکل ۳-۷ : کار قرار دادن قطعه در حفره مربوطه
۳۰	شکل ۳-۸ : مدل امپدانس برای حرکت انعطاف پذیر (در یک راستا)
۳١	شکل ۳-۹ : مدل امپدانس برای حرکت انعطاف پذیر
۳١	شکل ۳-۱۰ : کاربرد براده برداری از سطوح
٣٣	شکل ۳-۱۱ : (الف)معادل تونن محيط، (ب) معادل نورتن محيط
۳۵	شکل ۳-۱۲ : کنترل امپدانس ترکیبی برای کارهای نیازمندِ نیرو
۳۶.	شکل ۳-۱۳ : سیستم جرمی خالص
۳۷	شکل ۳-۱۴ : نمایش سیستم های جفت شده بصورت آرایش پسخورد
۳۸	شکل ۳-۱۵ : نمایش سیستم های جفت شده بصورت امپدانس های خطی تغییرناپذیر با زمان
4.	شکل ۳-۱۶ : نحوه اجرای کنترل امپدانس، (الف) پسخورد نیرو، (ب) پسخورد موقعیت
4.	شکل ۳-۱۸ : نمودار مکان هندسی ریشه ها
47	شکل ۳-۱۸ : ناحیه مجاز برای مکان صفر در امپدانس تعمیم یافته
41	شکل ۳-۱۹ : حلقه کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل نیرو (حلقه بسته)
۵۰	شکل ۳-۲۰ : کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت در فضای مفصلی
۵١	شکل ۳-۲۱ : کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت در فضای کار
۵۶.	شکل ۳-۲۲ : حلقه کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت با راهبرد کنترل ولتاژ در فضای مفصلی
۵٨	شکل ۳-۲۳ : حلقه کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت با راهبرد کنترل ولتاژ در فضای کار
۶۰.	شکل ۳-۲۴ : تحقق امپدانس تعمیم یافته با مشتق گیری از نیرو
۶١.	شکل ۳-۲۵ : تحقق کانونیکال کنترل پذیر امپدانس تعمیم یافته
٨۶.	شکل ۵-۱ : نمایش گروه های فازی ورودی
٨۶.	شکل ۵-۲ : نمایش گروه های فازی خروجی
٩٣	شکل ۶-۱ : ربات دو رابط و مسیر مرجع دایره ای
۹۵	شکل ۶-۲ : مقایسه ردگیری مسیر دایره ای
٩۶.	شکل ۶-۳ : مقایسه نرم خطای ردگیری مسیر مرجع دایره ای
٩٧	شکل ۶-۴ : مقایسه نرم خطای ردگیری مسیر مطلوب امپدانس
٩٨	شكل ۶-۵ : ولتاژ موتورها در روش كنترل ردگيري ژاكوبين تطبيقي

۹۸	شکل ۶-۶ : جریان موتورها در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی
۹۹	شکل ۶-۲ : پارامترهای سینماتیکی تخمین زده شده در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی
۹۹	شکل ۶-۸ : پارامترهای دینامیکی تخمین زده شده در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی
۹۹	شکل ۶-۹ : پارامترهای تخمین زده شده مربوط به مدل محرکه ها در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی
۱۰۰	شکل ۶-۱۰ : ولتاژ موتورها در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی
۱۰۰	شکل ۶-۱۱ : جریان موتورها در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی
۱۰۱	شکل ۶-۱۲ : پارامترهای خطای سینماتیکی تخمین زده شده در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی
۱۰۱	شکل ۶-۱۳ : مقاومت های آرمیچر تخمین زده شده در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی
۱۰۱	شکل ۶-۱۴ : پارامترهای تخمین زده شده در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی
۱۰۲	شکل ۶-۱۵ : ولتاژ موتورها در روش کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی
۱۰۲	شکل ۶-۱۶ : جریان موتورها در کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی
۱۰۳	شکل ۶-۱۷ : پارامترهای خطای سینماتیکی تخمین زده شده در روش کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی
۱۰۳	شکل ۶-۱۸ : پارامترهای تخمین زده شده فازی ۱ در کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی
۱۰۳	شکل ۶-۱۹ : پارامترهای تخمین زده شده فازی ۲ در کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی
۱۰۴	شکل ۶-۲۰ : کنترل ربات دو رابط در تعامل با یک سطح سخت
۱۰۵	شکل ۶-۲۱ : مقایسه ردگیری مسیر مطلوب امپدانس در برخورد با سطح سخت
۱۰۶	شکل ۶-۲۲ : مقایسه نیروی تماس در تعامل با سطح سخت
۱۰۷	شکل ۶-۲۳ : مقایسه نرم خطای ردگیری مسیر مطلوب امپدانس
۱۰۸	شکل ۶-۲۴ : اثر عکس العمل مدل نشده محیط در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی
۱۰۹	شكل ۶-۲۵ : ولتاژ موتورها در تعامل (كنترل ردگیری ژاكوبین تطبیقی)
۱۰۹	شکل ۶-۲۶ : جریان موتورها در تعامل (کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی)
۱۱۰	شکل ۶-۲۷ : پارامترهای سینماتیکی تخمین زده شده در تعامل (روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی)
۱۱۰	شکل ۶-۲۸ : پارامترهای دینامیکی تخمین زده شده در تعامل (روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی)
۱۱۰.(ر	شکل ۶-۲۹ : پارامترهای تخمین زده شده مربوط به محرکه ها در تعامل (روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی
۱۱۱	شكل ۶-۳۰ : ولتاژ موتورها در تعامل (كنترل تطبيقي پيشنهادي)
۱۱۱	شکل ۶-۳۱ : جریان موتورها در تعامل (کنترل تطبیقی پیشنهادی)
۱۱۲	شکل ۶-۳۲ : پارامترهای خطای سینماتیکی تخمین زده شده در تعامل (کنترل تطبیقی پیشنهادی)
117	شکل ۶-۳۳ : مقاومت های آرمیچر تخمین زده شده در تعامل (کنترل تطبیقی پیشنهادی)
117	شکل ۶-۳۴ : پارامترهای تخمین زده شده در تعامل (کنترل تطبیقی پیشنهادی)
۱۱۳	شکل ۶-۳۵ : ولتاژ موتورها در تعامل (کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی)
۱۱۳	شکل ۶-۳۶ : جریان موتورها در تعامل (کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی)
114	شکل ۶-۳۷ : پارامترهای خطای سینماتیکی تخمین زده شده در تعامل (کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی)
114	شکل ۶-۳۸ : پارامترهای تخمین زده شده فازی ۱ در تعامل
114	شکل ۶-۳۹ : پارامترهای تخمین زده شده فازی ۲ در تعامل

فهرست جداول

٨٧	جدول ۵-۱ : قوانین فازی
٩٢	جدول ۶-۱ : پارامترهای ربات دو رابط
٩٢	جدول ۶-۲ : پارامترهای موتور DC مغناطیس دائم $i=1,2$
٩٣	جدول ۶-۳ : پارامترهای امپدانس تعمیم یافته

فهرست علائم و اختصارات

x,A	بردار، ماتریس (حالت پررنگ)
الت مورب)	اسکالر، عنصری از بردار یا ماتریس هم نام (ح
N	شبکه
<i>f</i>	تابع (در حالت کلی)
$\sigma(\cdot)$	تابع كليدزنى
<i>S</i>	متغير لاپلاس
Z(s)	امپدانس
ω	متغير حالت مدل امپدانس
G(s)	ﺗﺎﺑﻊ ﺗﺒﺪﯾﻞ
<i>e</i>	متغير خطا
<i>z</i>	متغير حالت
A, B, C, D	ماتریسهای مربوط به معادلات حالت

متغیرها و پارامترهای الکتریکی

<i>u</i>	ولتاژ الكتريكي
<i>I</i>	جريان الكتريكي
<i>R</i>	مقاومت
<i>L</i>	اندوكتانس
<i>C</i>	ظرفيت خازن
<i>K</i> _{<i>m</i>}	ثابت گشتاور موتور
<i>K</i> _{<i>b</i>}	ثابت نیرو محرکه معکوس موتور

متغیرها و پارامترهای مکانیکی (فضای مفصلی)

i بعد فضای مفصلی	n
۔ موقعیت زاویہای	θ
موقعیت مفصل	q
کشتاه.	τ
	T
همان اینتر شی	0

<i>r</i>	ثابت چرخدنده
D (q)	ماتریس اینرسی ربات
$\mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$	بردار گشتاورهای کوریولیس و گریز از مرکز
$\mathbf{g}(\mathbf{q})$	بردار گشتاورهای گرانشی
$\mathbf{h}(\mathbf{q})$	تبدیل سینماتیک مستیم
$\mathbf{J}(\mathbf{q})$	ماتريس ژاكوبين ربات

متغیرها و پارامترهای مکانیکی (فضای کار)

<i>m</i>	بعد فضای کار
<i>x</i>	موقعيت
V	سرعت
<i>F</i>	نيرو
<i>l</i>	طول
<i>M</i>	 جرم
<i>B</i>	۔ ضریب اصطکاک ویسکوز
<i>K</i>	تابت فنر
<i>g</i>	ثابت جاذبه
M (x)	ماتریس اینر سے ریات
$\mu(\mathbf{x},\dot{\mathbf{x}})$	بردار نیروهای کوربولیس و گریز از مرکز
p (x)	بردار نیروهای گرانشی

زيرنويسها

$(.)_{o}$	مربوط به خروجی
$(.)_{ir}$	مربوط به ورودی
$\left(. ight)_{s}$	مربوط به مود لغزشی
$(.)_r$	سيگنال مرجع
$(.)_d$	سيگنال مطلوب
$(.)_{co}$	$_m$ سيگنال فرمان
$(.)_{ds}$	$_s$ سیگنال اغتشاش

$(.)_{eq}$	معادل
$(.)_u$	عدم قطعيت.
$\left(. ight)_{i}$ فطری ($i=1,,n$) بردار یا ماتریس قطری ($i=1,,n$	عنصر i-ام از
$\left(. ight) _{j}$ قطری ($j=1,,m$) بردار یا ماتریس قطری (عنصر j -ام از
عيت، تناسبی	مربوط به موق
$\left(. ight)_v$	مربوط به سر
$(.)_I$	انتگرالی
$(.)_E$	الكتريكى
$\left(.\right)_{M}$	مکانیکی، جر
(.) _m	مربوط به موت
دانس	مربوط به امپ
$(.)_R$	مربوط به رباد
(.) _e	مربوط به مح
(.) _a	مربوط به آرم
$\left(. ight)_{c}$	مربوط به مر آ
$(.)_f$	مربوط به نير

بالانويسها

$(.)^T$	ترانهاده
$(.)^{-1}$	معكوس ماتريس ¹
$\left(. ight) ^{l}$.	مربوط به قانون <i>ا</i> -ام سیستم فازی



-) مقدمه

امروزه شاهد گسترش بکارگیری رباتها در عرصههای مختلف صنعت، پزشکی، عملیات جستجو و نجات، سرگرمی و خدمات هستیم. با این سیر پیشرفت، پیشبینی میشود رباتها بتوانند جای انسان-ها را در انجام امور بگیرند. هم اکنون رباتها در حوزههای مختلفی نظیر صنایع خودروسازی، عمل-های جراحی از راه دور، تحقیقات فضایی و غیره بکار گرفته میشوند. در حالت کلی و فارغ از نوع کاربرد، کارهایی که ربات میتواند انجام دهد را میتوان به دو دسته کارهای غیرتماسی و تماسی تقسیم نمود [۱]. کارهایی مانند پاشیدن رنگ در دسته کارهای غیرتماسی قرار میگیرند و هدف در انجام این گونه امور، صرفاً کنترل موقعیت ربات در یک مسیر از پیش تعیین شده است.

اما اکثر کارها مانند جابجایی و قرار دادن اجسام، به هم بستن^۱ قطعات، سمبادهکاری، تمیزکاری، جراحی و غیره، ماهیتاً نیازمند ِ تماس و تعامل ربات با محیط است. در کارهای تماسی، تنها با کنترل موقعیت ربات نمیتوان کار را به انجام رساند، زیرا کوچکترین انحراف از مسیر مطلوب میتواند منجر به ظهور نیروهای عکسالعمل بسیار بزرگ همراه با نتایج فاجعهآمیز گردد، مخصوصاً در تعامل با انسان که مسئله ایمنی بسیار حائز اهمیت است [۲]. بنابراین کنترل تعامل ربات با محیط، هدف بنیادی این کارها را تشکیل میدهد به گونهای که ربات رفتاری انعطاف پذیر و سازگار با محیط از خود نشان دهد [۳].

انعطاف پذیری را می توان به دو روش غیرفعال و فعال کنترل کرد. در روش غیرفعال، ساختار مکانیکی ربات توسط عناصری انعطاف پذیر تجهیز می شود که برای انجام کارهای مختلف، باید دوباره تنظیم و طراحی گردند. واضح است که این روش در تعامل ربات با محیط متغیر مانند انسان، ناتوان است. اما در روش فعال، رفتار ربات بصورت نرمافزاری کنترل می شود. این روش توانایی های ربات را به شکل چشمگیری افزایش می دهد [۴].

دو روش عمده کنترل فعال انعطاف به نام کنترل ترکیبی نیرو/موقعیت و کنترل امپدانس تاکنون ارائه

¹ assembly

شدهاند [۴–۶]:

- ۱) کنترل ترکیبی نیرو/موقعیت: در این روش فضای کاری ربات به دو زیرفضای مجزا و متعامد کنترل موقعیت و کنترل نیرو تقسیم می شود، زیرا امکان کنترل توأم موقعیت و نیرو در یک راستا امکان پذیر نیست. در جهتهایی که حرکت ربات آزاد است (حرکت غیرمقید)، موقعیت کنترل می شود و در جهتهایی که ربات با محیط درگیر می شود (حرکت مقید)، کنترل نیرو صورت می گیرد. بنابراین، از یک ماتریس انتخاب جهت تفکیک راستای کنترل موقعیت و کنترل نیرو استفاده می شود.
- ۲) کنترل امپدانس: در این روش، کنترل موقعیت و کنترل نیرو بطور مستقیم انجام نمی شود. هدف، کنترل رفتار ربات بر اساس یک رابطه دینامیکی بین نیروی تماس و موقعیت می باشد. این رابطه دینامیکی که بنیان این روش را تشکیل می دهد، امپدانس مکانیکی نامیده می شود.

در کنترل ترکیبی، نادیده گرفتن مسئله پایداری در تعامل یک ایراد اساسی به حساب میآید که به دینامیک جفتشده^۲ ربات با محیط مربوط میشود. بعبارت دیگر، مفهوم امپدانس ربات در این روش به رسمیت شناخته نمیشود [۷]. از طرف دیگر، کنترل امپدانس بدون نیاز به ماتریس انتخاب و

کلیدزنی، رفتار ربات را هم در حرکت مقید و هم در حرکت غیرمقید کنترل می کند [۸]. مفهوم امپدانس ریشه در نظریه عمومی شبکهها دارد. رفتار یک شبکه تکقطبی توسط دو متغیر توان، یعنی متغیر تلاش و متغیر جریان قابل توصیف است [۹]. رابطه بین متغیر تلاش و متغیر جریان، بصورت امپدانس تعریف می شود [۳]. هوگان در [۸] با بهره گرفتن از این مفهوم و معرفی کنترل امپدانس، اهمیت آنرا در تعامل ربات و محیط نشان داد. با در نظر گرفتن مفهوم امپدانس، کنترل موقعیت در فضای آزاد، می تواند بعنوان حالت خاصی از کنترل امپدانس در نظر گرفته شود که در آن

 2 coupled

مدونی مدل نموده و مسئله پایداری تماس را به شکل مؤثرتری مورد بررسی قرار داد [۳]. اگر محیط غیرفعال باشد، انتخاب یک مدل امپدانس غیرفعال برای ربات میتواند پایداری تعامل را تضمین کند [۱۰].

انتخاب مناسب امپدانس برای ربات، علاوه بر پایداری، در کیفیت تعامل نیز تأثیر به سزایی دارد. مدل امپدانس مرسوم که در [۸] معرفی شد، اگر چه پایداری جفتشده را تضمین می کند اما در تعامل با محیطهای سخت، میتواند رفتار نوسانی از خود نشان دهد. بنابراین در [۱۱] مدل امپدانس تعمیم-یافته ارائه شد تا بتوان شرایط لازم برای رفتار حلقه بسته مناسب را تأمین کرده و برای نیرو نیز مستقیماً فرمان صادر شود. امپدانس تعمیمیافته مشتق نیروی تماس را نیز به همراه خود دارد.

کنترل امپدانس در کارهایی که نیاز به حرکت انعطافپذیر دارند، توانایی خود را به خوبی نشان داده است. این روش، بر روی سیستمهای تعلیق خودرو نیز نتایج رضایت بخشی را به همراه آورده است [۱۳, ۱۳]. امپدانس تعمیمیافته نیز در اسمبل کردن قطعات بکار گرفته شده است تا نیرو از حد مجاز خارج نشود [۱۴–۱۶]. اگر چه در تحقیقاتی که امپدانس تعمیمیافته را بکار بردهاند، بخاطر گریز از مشتق گیری و مسئله تقویت نویز، آنرا از امپدانس تعمیمیافته حذف کردهاند.

هر چند که کنترل امپدانس مرسوم و تعمیمیافته، در حرکت انعطاف پذیر خوب عمل میکند، در کارهای نیازمند ِ نیرو همچنان جای کار دارد. اندرسون و اسپانگ در [۷] محیط را بر اساس مدل امپدانس به سه دسته جرمی، مقاومتی و خازنی تقسیم نمودند. بر مبنای این طبقهبندی و با استفاده از اصل دوگانی نشان دادند که کنترل تعامل مؤثرتر با انتخاب امپدانس ربات بصورت دوگان امپدانس محیط امکان پذیر است. این ایده نشان میدهد که چرا کنترل امپدانس در ترکیب با کنترل تناسبی-انتگرالی نتیجه بهتری را در تنظیم نیرو کسب میکند [۱۷]. بر اساس این طبقهبندی، کنترل ترکیبی امپدانس معرفی شد تا از ادغام کنترل ترکیبی و کنترل امپدانس، کنترل نیرو نیز محقق شود [۷]. روش کنترل امپدانس ردگیری نیرو نیز با ادغام کنترل ترکیبی و کنترل امپدانس، میدانس، به شکلی دیگر سعی در بهبود ردگیری نیرو در روش امپدانس دارد [۱۸–۲۰]. در تعامل ربات با محیط، انتخاب مناسب امپدانس مطلوب ربات امری حیاتی است، اما در مرحله نخست، کنترل ربات باید به اندازهای دقیق انجام شود که رفتاری مطابق با امپدانس مطلوب تعیین شده از خود نشان دهد. در [۱] کنترل امپدانس ربات به دو دسته کنترل امپدانس بر مبنای نیرو (گشتاور) و کنترل امپدانس بر مبنای موقعیت تقسیم شده است. راهبرد مبتنی بر موقعیت ابتدا برای کنترل امپدانس رباتهای صنعتی ارائه شد، چرا که محرکههای ربات مجهز به کنترل موقعیت و سرعت بودند [۱]. اما طبقهبندی مذکور تا حدی دارای ابهام است، زیرا که روشهایی ارائه شدهاند که با راهبرد کنترل گشتاور به اجرای کنترل امپدانس مبتنی بر موقعیت می پردازند [۲۱]. در این پایان-نامه، طبقهبندی بر مبنای ۴ دسته ارائه می گردد. طبقهبندی بر اساس نحوه کنترل ربات، دو راهبرد کنترل گشتاور و کنترل ولتاژ را شامل می شود و کنترل امپدانس نیز بر اساس معیار عملکرد، به دو دسته مبتنی بر خطای مدل نیرو و مبتنی بر خطای مدل موقعیت تقسیم می شود.

پیچیدگی، غیرخطی بودن و حضور تزویج در دینامیک ربات، باید جبران شود تا ربات امپدانس مطلوب را از خود نشان دهد. در [۸] روشی بر مبنای گشتاور محاسباتی (خطیسازی پسخوردی) برای اجرای کامل مدل امپدانس پیشنهاد شد. مزیت این روش، پرهیز از حل مسئله سینماتیک معکوس ربات بود. این روش که در دسته راهبرد کنترل گشتاور و کنترل امپدانس مبتنی بر خطای مدل نیرو قرار می-گیرد، مبنای کار بسیاری از مقالات قرار گرفته است [۷, ۱۱, ۱۴, ۱۵, ۱۷, ۲۲]. ولی فرض غیرواقعیِ معلوم بودن مدل دقیق ربات، پیادهسازی آنرا دچار اشکال میکند. عدم قطعیت مدل دینامیکی و سینماتیکی ربات، عدم قطعیت در مدل محرکهها و همچنین تأثیر تعامل با محیط، از مسائلی است که در عملکرد کنترل امپدانس ربات ایجاد اختلال میکند. بنابراین، استفاده از روشهای مقاوم و تطبیقی جهت غلبه بر عدمقطعیتها و اجرای کنترل امپدانس مورد توجه است.

با راهبرد کنترل گشتاور و مبتنی بر خطای مدل نیرو، تاکنون کنترل کنندههای امپدانس مقاوم متنوعی ارائه شدهاند که می توان به روش تخمین تأخیر زمانی [۱۸-۲۰, ۲۳]، کنترل مود لغزشی [۲۴–۲۴] و کنترل ساختار متغیر جهت رسیدن به مدل^۳ [۲۶, ۲۲, ۲۸] اشاره کرد. متأسفانه روش کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل نیرو در انتخاب روش کنترل ربات، محدودیتهای زیادی ایجاد می کند و از طرفی اجازه استفاده از کنترل کنندههای تطبیقی را نمی دهد. به همین خاطر، استفاده از روشهای مبتنی بر خطای مدل موقعیت برتری دارد، زیرا دست طراحان را برای انتخاب هر نوع کنترل کنندهای باز می گذارد. از طرف دیگر، بخاطر آزادی در انتخاب پارامترهای کنترل حلقه داخلی موقعیت، می توان اثر عدم قطعیتها را نسبت به روشهای مبتنی بر خطای مدل نیرو کاهش داد [۲۹]. در روشهای مبتنی بر خطای مدل موقعیت، حلقه داخلی کنترل موقعیت ربات وظیفه دارد موقعیت مطلوب خروجی مدل امپدانس را دنبال کند تا امپدانس مطلوب محقق شود [۱]. در روش دیگر، می-قوان با استفاده از فیلترهای پایین گذر مسیر مطلوب امپدانس را برای حلقه داخلی کنترل موقعیت فراهم نمود [۰۰–۳۲].

کنترل کنندههای موقعیت ربات را بر مبنای نوع مختصات، میتوان به کنترل فضای مفصلی و کنترل فضای کار تقسیم نمود. کنترل موقعیت در فضای مفصلی به محاسبه سینماتیک معکوس ربات نیاز دارد، که در صورت در دسترس بودن مدل سینماتیک، میتوان از آن برای اجرای کنترل امپدانس بهره برد [۳۳, ۳۴]. اما پیچیدگی محاسبات سینماتیک معکوس باعث میشود که طراحان به کنترل فضای کار روی آورند. در [۳۵] با تعریف مسیر مرجع امپدانس مطلوب و استفاده از روش تطبیقی اسلوتین-لی [۳۶]، کنترل کنندهای تطبیقی جهت اجرای کنترل امپدانس ارائه شده است. در روشهای کنترل تطبیقی ربات، نیاز به محاسبه ماتریس رگرسور دینامیکی است. در [۲۱] برای جلوگیری از محاسبات ماتریس رگرسور دینامیک ربات، کنترل امپدانس تطبیقی بر مبنای تخمین تابع را پیشنهاد میکند و این روش در [۳۷] با در نظر گرفتن دینامیک محرکهها و انعطاف پذیری مفاصل ربات تعمیم داده شده است. این دو روش نیز بر مبنای روش تطبیقی اسلوتین–لی قرار دارد. اگر چه روش تخمین تابع معرفی شده در [۳۲] مستقل از مدل است، ولی نیاز به محاسبات بسیار طولانیتری نسبت به

³ variable structure model reaching control

ماتریس رگرسور دینامیکی دارد. عیب این روش برای کنترل موقعیت ربات در فضای مفصلی اصلاح شده است [۳۸] اما برای بکارگیری آن در کنترل امپدانس، به تغییرات بیشتری نیاز دارد. روش های مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور، مستقیماً با دینامیک ربات سروکار دارند که بسیار حجیم، پیچیده، غیرخطی و با تزویج همراه است و محاسبات کنترل را بسیار طولانی میکند. از طرفی در اکثر تحقیقات این حوزه، دینامیک محرکه ها نادیده گرفته میشود. با مطرح شدن راهبرد کنترل ولتاژ برای ربات های میکند. از طرفی در اکثر ربات های میزندی میکند. از طرفی در اکثر در اکثر موقورها و با تزویج همراه است و محاسبات کنترل را بسیار طولانی میکند. از طرفی در اکثر ربات های موزه، دینامیک محرکه ها نادیده گرفته میشود. با مطرح شدن راهبرد کنترل ولتاژ برای رباتهای مجهز به موتورهای DC، مسئله کنترل ربات به کنترل ساده سیستم خطی و بدون تزویج موتورها تقلیل پیدا کرد [۳۹]. ایده این روش، در جبران اثرات دینامیکهای ربات از طریق حذف دینامیک جریان موتورها در سیستم کنترل نهفته است. بدین ترتیب، کنترل مستقل از دینامیکهای دینامیک مکای مکای مکای میانی می میشود.

بر همین اساس، کنترل امپدانس با راهبرد کنترل ولتاژ ارائه شد [۴۰] که کنترل امپدانس را به شکلی مؤثرتر از روش مرسوم در [۸] به اجرا می گذارد. این روش نیز در دسته کنترل امپدانس مبتنی بر خطای مدل نیرو قرار می گیرد و همانند [۸] عدمقطعیت در نظر گرفته نشده است.

در حوزه کنترل موقعیت ربات در فضای مفصلی با راهبرد کنترل ولتاژ، کارهای زیادی صورت گرفته است که میتوان به کنترل مقاوم با تقریب فازی تطبیقیِ عدمقطعیت [۴۱]، کنترل فازی ریز-تنظیم^۴ [۴۲]، کنترل فازی مقاوم دقیق [۴۳] و کنترل فازی تطبیقی مستقیم غیرمتمرکز [۴۴] اشاره کرد. در شرایطی که مدل سینماتیکی بازوی رباتیک، قطعیت داشته باشد، این روشها گزینههای مناسبی برای کنترل امپدانس مبتنی بر خطای مدل موقعیت هستند.

تا جایی که مورد مطالعه قرار گرفته است، در هیچکدام از تحقیقات انجام شده در حوزه امپدانس، صحبتی از عدمقطعیت سینماتیکی و ماتریس ژاکوبین به میان نیامده است. واضح است که هیچ کمیت فیزیکی بطور دقیق نمیتواند معین شود. عدمقطعیت در پارامترهای سینماتیکی مانند طول رابطها، تأثیر مخرب مستقیم در کنترل موقعیت در فضای کار دارد. بنابراین، لحاظ کردن آن،

 $^{^4}$ fine-tuning fuzzy control

مخصوصاً در کنترل امپدانس حیاتی است. در حوزه کنترل گشتاور، شرایطی فراهم شده است تا با استفاده از ماتریس ژاکوبین تقریبی بتوان کنترل تنظیم را به انجام رساند [۴۵, ۴۵]. با راهبرد کنترل ولتاژ نیز، روش مقاوم بر مبنای تخمین تأخیر زمانی برای کنترل ردگیری موقعیت ربات در فضای کار و با در نظر گرفتن ماتریس ژاکوبین تقریبی ارائه شده است [۴۷]. این روش در عین سادگی، بسیار مؤثر عمل میکند. تنها نقص آن استفاده از سرعت فضای کار است که به راحتی در دسترس نیست. در دسترس بودن این متغیر به عنوان فرض در بسیاری از تحقیقات انجام شده حوزه کنترل گشتاور در کنترل امپدانس و همچنین کنترل موقعیت در فضای کار منظور شده است.

معادلات سینماتیکی ربات بخاطر وابستگی به هندسه ربات، با دقت زیادی قابل استخراج است و از طرفی نسبت به پارامترهای سینماتیکی خطی هستند. اما در دینامیک ربات بصورت غیرخطی ظاهر میشوند و همین عامل مانعی بر سر راه استفاده از روشهای تطبیقی مرسوم برای جبران عدمقطعیت سینماتیکی است. بنابراین روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی جهت کنترل موقعیت ربات در فضای کار و در حضور عدمقطعیت دینامیکی و سینماتیکی بازوی رباتیک ارائه گردید [۴۸]. در [۴۹] با اضافه کردن عدمقطعیت دینامیکی محرکهها، ایده ژاکوبین تطبیقی را گسترش دادند. این ایده الهامبخش بسیاری از کارها قرار گرفته است.

با این حال این روش نیز در حوزه کنترل گشتاور قرار می گیرد و شدیداً به مدل دینامیکی ربات وابسته است. در این پایاننامه نشان خواهیم داد که با راهبرد کنترل ولتاژ و استفاده از روش تطبیقی می توان اثرات عدمقطعیت سینماتیکی را به شکلی سادهتر از [۴۹] جبران نموده و کنترل را مستقل از مدل ربات به انجام رساند. از طرفی، نقص وابستگیِ محاسبات به سرعت فضای کار نیز مرتفع خواهد شد. همچنین، نشان خواهیم داد که می توان این ایده را جهت اجرای کنترل امپدانس تعمیم یافته بدون نیاز به مشتق نیرو مورد استفاده قرار داد.

با این حال، وابستگی کنترل به مدل دینامیکی موتورها و مخصوصاً دینامیکهای مدل نشده باقی می-ماند. در این حوزه روشهای هوشمند میتوانند جهت جبران این نقص بکار گرفته شوند. یکی از روشهای هوشمند، کنترل فازی است که در تقریب توابع توانایی به سزایی دارد [۵۰, ۵۱] و در ترکیب با کنترل تطبیقی میتواند بسیار قدرتمند باشد [۵۲]. در [۴۱–۴۴] تأثیر مثبت استفاده از کنترل فازی تطبیقی جهت تقریب عدمقطعیتها در فضای مفصلی نشان داده شده است. اما تاکنون کنترل فازی تطبیقی برای کنترل موقعیت در فضای کار و مخصوصاً جبران عدمقطعیتهای سینماتیکی استفاده نشده است. در حوزه کنترل گشتاور، از شبکههای عصبی چند لایه و بر مبنای ژاکوبین تطبیقی در [۴۸]، جهت کنترل فضای کار بهره گرفته شده است [۵۳]. اما در طراحی سیستمهای کنترل فازی و تنظیم پارامترهای غیرخطی، میتوان از منطق فازی و دانش فرد خبره استفاده کرد که این امر در طراحی شبکههای عصبی مقدور نیست. تا جایی که اطلاع داریم، تنها یک روش کنترل مود لغزشی فازی جهت جبران عدمقطعیت دینامیکی و سینماتیکی بازوی رباتیک با روش کنترل مود لغزشی فازی جهت جبران عدمقطعیت هینامیکی و سینماتیکی بازوی رباتیک با

در این پایان نامه، با استفاده از ایده کنترل تطبیقی معرفی شده با راهبرد کنترل ولتاژ، یک سیستم کنترل فازی تطبیقی ارائه خواهد شد که بتواند یک کنترل موقعیت غیرمتمرکز⁶ را در فضای کار فراهم کند. همچنین نشان خواهیم داد که تعداد اندازه گیریها در این روش کم می شود و در نهایت، از این ایده برای اجرای امپدانس تعمیمیافته استفاده خواهد شد.

⁵ decentralized control



-) مقدمه

در تمامی کاربردهای ربات، انجام کار مشخص توسط ربات منجر به کنترل مجری نهایی در راستای مسير مطلوب مىشود. كنترل موقعيت مجرى نهايي نيازمند تحليل دقيق خصوصيات ساختار مكانيكي بازوی ربات و محرکهها است. هدف این تحلیل دستیابی به مدل ریاضی سیستم رباتیک است. در این فصل، به دو حوزه اصلی مدلسازی ربات، یعنی سینماتیک و دینامیک (شامل دینامیک محرکه-ها) می پردازیم [۲] که پایه طراحی سیستمهای کنترل در این پایاننامه را تشکیل میدهد.



شکل ۲-۱ : بازوی رباتیک (از نوع دو-رابط)

-) سىنماتىك رىات

تحلیل سینماتیکی، حرکت بازوی رباتیک را نسبت به یک دستگاه مختصات مرجع مورد بررسی قرار میدهد بدون آنکه تأثیر نیروها (گشتاورها) را در ایجاد آن در نظر بگیرد.

- -) سينماتيک مستقيم و ماتريس ژاکوبين

بازوی رباتیک متشکل از رابطهای صلب است که بوسیله مفصلهای دورانی یا کشویی به هم متصل شدهاند. کل این ساختار را زنجیره سینماتیکی مینامند که یک سر این زنجیره متصل به زمین و ثابت است و به سر دیگر آن ابزار یا مجری نهایی متصل می شود. ساختار مکانیکی بازو، با تعداد درجات آزادی مشخص می شود که هر درجه آزادی متناظر با تغییر در وضعیت یک مفصل و تعریف یک متغیر مفصلی است. متغیرهای مفصلی را در قالب بردار q می توان نمایش داد:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 & \cdots & q_n \end{bmatrix}^T \tag{1-T}$$

که در آن n نماینده تعداد درجات آزادی (تعداد مفاصل) بازو است و q_i زاویه دوران برای مفصل دورانی یا جابجایی برای مفاصل کشویی است. فضایی که بردار \mathbf{q} در آن تعریف میشود، فضای مفصلی نامیده میشود. فضایی که کار بازو در آن تعریف میشود، موسوم به فضای کار (فضای عملیاتی یا فضای دکارتی) است. بردار توصیف کننده وضعیت مجری نهایی در فضای کار را با نماد \mathbf{x} بصورت زیر نمایش می دهند:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_m \end{bmatrix}^T \tag{(Y-Y)}$$

که در آن m بعد فضای کار و x_j مولفه مختصاتی را در فضای کار نشان میدهد. بردار x در حالت f x در حالت کلی شامل موقعیت بازو x_p و جهت گیری مجری نهایی $x_ heta$ است:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p^T & \mathbf{x}_\theta^T \end{bmatrix}^T$$
(°-۲)

$$\mathbf{x} = \mathbf{h}(\mathbf{q}) \tag{f-T}$$

که در آن $\mathbb{R}^n o \mathbb{R}^n$ در حالت کلی تابعی غیرخطی است که متغیرهای فضای کار را بر حسب متغیرهای مفصلی محاسبه می کند. این تابع وابسته به هندسه ربات است.

۲-۲-۱-۲) ماتریس ژاکوبین در اکثر روشهای کنترل ربات، مخصوصاً کنترل در فضای کار، لازم است که رابطه تحلیلی بین سرعت حرکت مفاصل و سرعت حرکت مجری نهایی محاسبه شود. این رابطه با مشتق گیری از تابع سینماتیک مستقیم نسبت به زمان بدست می آید:

(۵-۲)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$$

که در آن
$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{m imes n}$$
 ماتریس ژاکوبین نامیده میشود و بصورت زیر بدست میآید:

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \tag{F-T}$$

ماتریس ژاکوبین یکی از مهمترین ابزارهای تحلیلی ربات محسوب می شود که بخش اصلی را در کنترل فضای کار تشکیل می دهد. ماتریس ژاکوبین در واقع در حکم تبدیل فضای مفصلی به فضای کار ظاهر می شود و ارتباط بین نیروی وارده بر مجری نهایی \mathbf{F} و گشتاور منتجه بر مفاصل $\mathbf{\tau}$ نیز توسط ماتریس ژاکوبین توصیف می شود (رابطه (۲-۲۳)). همچنین با مشتق گیری از (۲-۵) رابطه بین شتاب مفصلی و مجری نهایی بدست می آید:

(۲-۷)
$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$$
 (۲-۲) که در آن $\dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})$ مشتق ماتریس ژاکوبین نسبت به زمان است.
خاصیت ۲-۱: ماتریس ژاکوبین نسبت به پارامترهای سینماتیکی \mathbf{p}_k خطی است [۴۸]:
 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{y}_J^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{p}_k$

که در آن $\mathbf{y}_{_J}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\in \mathbb{R}^{n_k imes m}$ ماتریس رگرسور ژاکوبین نامیده میشود.

سیستمهای کنترل تطبیقی و قوانین تطبیق بسیار حائز اهمیت است^۱.

در این پایاننامه فرض شده است که بازو افزونگی سینماتیکی ندارد (m = n) و حرکت آن محدود به فضایی است که شامل نقاط تکین نمیشود. بنابراین رتبه ماتریس ژاکوبین کامل خواهد بود. از این رو می توان روابط معکوس (۲-۵) و (۲-۲) را بصورت زیر محاسبه نمود:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}}$$
(٩-٢)

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \left(\ddot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right)$$
(1.-7)

-) دینامیک سیستم رباتیک

استخراج مدل دینامیکی بازوی رباتیک و سیستم محرکه نقش مهمی را در تحلیل ساختار و حرکت بازو و طراحی سیستم کنترل (مخصوصاً در راهبرد کنترل ولتاژ) دارد. در این بخش دینامیک بازو و بعضی از خواص مهم آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سپس دینامیک محرکههای الکتریکی معرفی خواهد شد.

- -) مدل دینامیکی بازوی رباتیک

۲–۳–۱–۱) مدل دینامیکی بازو در فضای آزاد مدل دینامیکی بازو، توصیفی از ارتباط بین گشتاورهای مفصلی و حرکت بازو را ارائه میدهد. در اینجا از معادلات بدست آمده توسط فرمول بندی اویلر-لاگرانژ استفاده شده است [۲]. با این رویکرد، معادلات حرکت میتواند به شکل سیستماتیک و مستقل از دستگاه مختصات مرجع بدست آید. معادلات حرکت اویلر-لاگرانژ به شکل زیر است:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau}_R \tag{11-T}$$

که در آن $\mathbf{q}\in\mathbb{R}^n$ بردار نیروهای تعمیمیافته، $oldsymbol{ au}_R\in\mathbb{R}^n$ بردار نیروهای تعمیمیافته و تابع

^۱ به عنوان مثال رجوع شود به روابط (الف- ۱) و (الف- ۲) در بازوی رباتیک دو رابط

K لاگرانژین سیستم L اختلاف انرژی پتانسیل P و جنبشی K را نشان میدهد:

$$L = K - P \tag{117-1}$$

در استخراج دینامیک بازوی رباتیک، \mathbf{q} بردار متغیرهای مفصلی و $\boldsymbol{\tau}_R$ بردار گشتاور مربوط به مفاصل است. لاگرانژین سیستم بازو می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = K(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - P(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{D}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - P(\mathbf{q})$$
(17-7)

که در آن $\mathbf{D}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ ماتریس اینرسی بازو است. با استفاده از تعریف $\mathbf{D}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n imes n}$ ، معادلات دینامیکی بازوی رباتیک در فضای مفصلی با n درجه آزادی بدین صورت بدست میآید: $\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_{R}$ (۱۴-۲)

که در آن
$$\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$$
 بردار کوریولیس و گریز از مرکز و $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{D}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} - \frac{1}{2}\dot{\mathbf{q}}^T \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}}\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$ که در آن $\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{Q}$ بردار گریز از مرکز و $\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \frac{\partial P(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n$

خاصیت ۲-۲: ماتریس اینرسی D(q)، یک ماتریس متقارن و معین مثبت است. علاوه بر آن، از پایین و بالا نیز کراندار است [۲]، یعنی:

$$\lambda_{\min} \left(\mathbf{D}(\mathbf{q}) \right) \mathbf{I}_n \leq \mathbf{D}(\mathbf{q}) \leq \lambda_{\max} \left(\mathbf{D}(\mathbf{q}) \right) \mathbf{I}_n$$
 (۱۵-۲)
که در آن $\left(\bullet \right) \, \mathbf{D}(\mathbf{q}) \, \mathbf{Q}_{\min} \left(\bullet \right)$ به ترتیب معرف حداقل و حداکثر مقدار ویژه ماتریس $\mathbf{D}(\mathbf{q})$
است. می توان اسکالرهای ثابت و مثبتی مانند $\Delta_D' \, \mathbf{b} \, \mathbf{c} \, \mathbf{D}''$ یافت به گونهای که محدوده ($\mathbf{p}(\mathbf{q}) \, \mathbf{c}$ را مشخص کنند:

$$\delta'_D \mathbf{I}_n \le \mathbf{D}(\mathbf{q}) \le \delta''_D \mathbf{I}_n \tag{19-1}$$

خاصیت ۲-۲: ماتریس
$$\mathbf{S}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})=rac{1}{2}\dot{\mathbf{D}}(\mathbf{q})-\mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$$
 پادمتقارن است [۲]، یعنی:

$$\mathbf{y}^T \mathbf{S}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{y} = \mathbf{0}$$
 , $\forall \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ (1Y-Y)

خاصیت ۲-۴: سمت چپ معادله (۱۴-۲) نسبت به پارامترهای دینامیکی
$$\mathbf{p}_D \in \mathbb{R}^{n_d}$$
 مثل: جرم رابطها، ممان اینرسی، ضرائب میرایی و غیره، خطی است [۲] و میتوان آنرا بصورت زیر نوشت:
 $\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{y}_D^T(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}},\ddot{\mathbf{q}})\mathbf{p}_D$ (۱۸-۲)

که در آن
$$\mathbf{y}_D(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}},\dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{n_d imes n}$$
 که در آن پامیده میشود.

۲-۳-۲) مدل دینامیکی بازو در تعامل با محیط

تعامل ربات با محیط باعث بوجود آمدن نیرو در مجری نهایی یا ابزار می شود. این نیرو در حالت کلی بصورت:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_x & f_y & f_z & n_x & n_y & n_z \end{bmatrix}^T$$
(19-7)

نمایش داده می شود که در آن $\begin{bmatrix} r_x & f_y & f_z \end{bmatrix}^T$ بردار نیرو و $\begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix}^T$ بردار گشتاور وارد بر مجری نهایی را توصیف می کنند.



شکل ۲-۲ : بازوی رباتیک در تعامل با محیط

با توجه به (۵-۲) رابطه بین جابجایی مجازی مجری نهایی $\delta \mathbf{x}$ که توسط نیروی \mathbf{F} ایجاد شده و جابجایی مجازی مفصلی $\delta \mathbf{q}$ متناظر با آن بصورت زیر بیان می شود:

	فصل ۲: سینماتیک و دینامیک ربات
$\delta \mathbf{x} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \delta \mathbf{q}$	(۲ ۲)
ير بدست میآيد:	کار مجازی δW سیستم بصورت ز
$\delta W = \mathbf{F}^T \delta \mathbf{x} - \mathbf{\tau}^T \delta \mathbf{q}$	(71-7)
صل است. با جایگذاری (۲-۲۰) در (۲-۲۱) داریم:	که در آن ⊤ گشتاور اعمالی به مفا
$\delta W = \left(\mathbf{F}^T \mathbf{J}(\mathbf{q}) - \boldsymbol{\tau}^T \right) \delta \mathbf{q}$	(77-7)
برابر صفر است، رابطه زیر قابل استخراج است:	در حالت تعادل که کار انجام شده
$\mathbf{ au} = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{F}$	(7٣-7)
در نقش تبدیل نیروهای مجری نهایی به گشتاور مفاصل ظاهر می-	که نشان میدهد ترانهاده ژاکوبین
	شود.
م شود، گشتاور عکس العملی ناشی از نیروی تعاملی در مفاصل ربات	زمانی که ربات با محیط درگیر می
رکت بازوی رباتیک (۲-۱۴) در تعامل با محیط بصورت زیر در می-	ظاهر میشود. بنابراین معادلات حر
	آید:
$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F} = \boldsymbol{\tau}_{R}$	(74-7)
سمت مجری نهایی بر محیط است. از این پس، معادلات (۲-۲۴)	که در آن F نیروی وارد شده از
- در طراحی کنترل امپدانس در نظر گرفته میشوند.	بعنوان معادلات اصلي بازوي رباتيك

در بعضی مراجع، معادلات (۲-۲۴) را با استفاده از روابط سینماتیک معکوس (۲-۹) و (۲-۱۰)، در فضای کار بازنویسی میکنند [۷]:

$$\mathbf{D}_{x}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_{x}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{g}_{x}(\mathbf{q}) + \mathbf{F} = \mathbf{J}^{-T}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau}_{R}$$
(۲۵-۲)
که در آن $\mathbf{D}_{x}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$ ، $\mathbf{D}_{x}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$ بصورت زیر هستند:

$$\begin{split} \mathbf{D}_x(\mathbf{q}) &= \mathbf{J}^{-T}(\mathbf{q}) \mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{C}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= \mathbf{J}^{-T}(\mathbf{q}) \Big[\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{D}(\mathbf{q}) \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}) \Big] \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \end{split}$$

(79-7)

$$\mathbf{g}_{x}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}^{-T}(\mathbf{q})\mathbf{g}(\mathbf{q})$$

- -) مدل دینامیکی محرکه ها

برای به حرکت انداختن سیستم رباتیک، به گشتاور تولیدی محرکهها نیاز است. بنابراین برای کامل شدن مدلسازی، بررسی دینامیک محرکهها به همراه دینامیک بازو الزامی است. در این پایاننامه، محركههای الكتریكی از نوع موتورهای DC مغناطیس دائم مورد بررسی قرار می گیرند [۲]. هر مفصل ربات به یک موتور DC مغناطیس دائم مجهز است. شار استاتور این نوع موتورها از طریق آهنربای دائم تأمین می شود و کنترل گشتاور روتور (au_m) از طریق جریان آرمیچر (${f I}_a$) صورت می-گیرد. گشتاور تولیدی موتور از طریق چرخدندههای کاهشی به مفصل مربوطه ربات اعمال میشود.

بخش مدار الكتريكي موتورها از معادله ديفرانسيل زير تبعيت مي كند⁷ (شكل ۲-۳) : -۲)

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{I}_a + \mathbf{L}\mathbf{I}_a + \mathbf{K}_b\mathbf{\theta}_m \tag{1}$$



شکل ۲-۳ : مدل شماتیک موتور DC مغناطیس دائم (برای هر مفصل)

که در آن $\mathbf{\dot{\theta}}_m\in\mathbb{R}^n$ بردار ولتاژ موتورها، $\mathbf{I}_a\in\mathbb{R}^n$ بردار جریان آرمیچرها، $\mathbf{\dot{\theta}}_m\in\mathbb{R}^n$ بردار سرعت زاویهای روتورها و ماتریسهای قطری $\mathbf{R}, \mathbf{L}, \mathbf{K}_b \in \mathbb{R}^{n imes n}$ به ترتیب از چپ به راست، معرف مقاومت و اندوکتانس آرمیچرها و ثابت نیروی محرکه معکوس موتورها میباشد. در حضور چرخدندهها، ارتباط بین زاویه مفاصل و موقعیت زاویه روتورها بصورت زیر است: $\mathbf{q} = \mathbf{r} \boldsymbol{\theta}_m$ $(\gamma \lambda - \gamma)$

^۲ نمادهای پررنگ معرف بردار یا ماتریس و نمادهای مورب، نماینده یک عنصر از بردار یا ماتریس قطری هم نام میباشد.

که ماتریس قطری $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^{n \times n} = \mathbf{r}$ ضرایب چرخدندههای هر مفصل را در خود جای داده است. معادلات دیفرانسیل حاکم بر بخش مکانیکی موتورها بصورت زیر است : $\mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{\Theta}}_m + \mathbf{B}_m \dot{\mathbf{\Theta}}_m + \mathbf{r} \mathbf{\tau}_R = \mathbf{\tau}_m$ (۲۹-۲) (۲۹-۲) که در آن ماتریسهای قطری $\mathbb{R}^{n \times n} = \mathbb{R}_m$, \mathbf{J}_m , $\mathbf{B}_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$ موتورها و چرخدندهها، $\mathbf{T}_m \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاور تولیدی موتورها و $\mathbf{T}_R \in \mathbb{R}^n$ بردار گشتاور باری است که ربات بر موتورها تحمیل می کند (مطابق رابطه (۲۰-۲)). $\mathbf{T}_m = \mathbf{K}_m \mathbf{I}_a$ (۲۰-۲) که ماتریس قطری $\mathbf{K}_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ثابت گشتاور موتورها را نشان می دهد. که ماتریس قطری $\mathbf{K}_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$ نامید.

تصوير كشيد.



شکل ۲-۴: نمودار بلوکی موتور DC مغناطیس دائم (برای هر مفاصل)

معادلات بازو به همراه موتورهای مجهز به راه انداز ولتاژ
 موتورهای محمز به راه اندازهای ولتاژ بعنوان محرکههای مفصلی استفاده شوند و اندوکتانس آرمیچر
 موتورهای DC با راهاندازهای ولتاژ بعنوان محرکههای مفصلی استفاده شوند و اندوکتانس آرمیچر
 موتورهای DC با راهاندازهای ولتاژ بعنوان محرکههای مفصلی استفاده شوند و اندوکتانس آرمیچر
 موتورهای DC با راهاندازهای ولتاژ بعنوان محرکههای مفصلی استفاده شوند و اندوکتانس آرمیچر
 موتورهای DC با راهاندازهای ولتاژ بعنوان محرکههای مفصلی استفاده شوند و اندوکتانس آرمیچر
 موتورهای DC با راهاندازهای ولتاژ بعنوان محرکههای مفصلی استفاده شوند و اندوکتانس آرمیچر
 موتورهای DC با راهاندازهای ولتاژ بعنوان محرکههای مفصلی مفصلی استفاده شوند و اندوکتانس آرمیچر
 مورهای DC با راهاندازهای ولتاژ بعنوان محرکههای مفلی معاد (۲۰-۲۲) و معادلات موتور (۲-۲۷)-

$$\left(\mathbf{J}_{m}\mathbf{r}^{-2} + \mathbf{D}(\mathbf{q})\right)\ddot{\mathbf{q}} + \left(\mathbf{B}_{m}\mathbf{r}^{-2} + \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\right)\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F} = \mathbf{K}_{m}\mathbf{r}^{-1}\mathbf{I}_{d}$$
که می توان آنرا به شکل سادهتر زیر نوشت:

$$\mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_{a} + \mathbf{R}\mathbf{I}_{a} + \mathbf{K}_{b}\mathbf{r}^{-1}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{u} \tag{(7)-7}$$

برای سادگی، معادلات دینامیکی (۳۱-۳) را میتوان بصورت زیر نوشت: $\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \left(\mathbf{B}' + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\right)\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{F} = \mathbf{H}'_a \mathbf{I}_a$ $\mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_a + \mathbf{R}\mathbf{I}_a + \mathbf{K}_a \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{u}$ (۳۲-۲) $\mathbf{D}(\mathbf{r})$ $\mathbf{D}(\mathbf{r})$ $\mathbf{D}(\mathbf{q}) = \mathbf{u}$ $\mathbf{D}(\mathbf{q}) = \mathbf{u}$ $\mathbf{D}(\mathbf{q}) = \mathbf{u}$ $\mathbf{J}_a + \mathbf{R}\mathbf{I}_a + \mathbf{K}_a \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{u}$ $\mathbf{J}_m \mathbf{r}^{-1} \cdot \mathbf{K}_a = \mathbf{K}_b \mathbf{r}^{-1}$ ماتریس میرایی و (\mathbf{p}) فرم فشردهتر $\mathbf{J}_m \mathbf{r}^{-2} + \mathbf{D}(\mathbf{q})$ \mathbf{u} \mathbf{u}

$$\begin{split} \left(\mathbf{J}_m \mathbf{r}^{-2} + \mathbf{D}(\mathbf{q}) \right) \ddot{\mathbf{q}} + \left(\mathbf{B}_m \mathbf{r}^{-2} + \mathbf{K}_m \mathbf{R}^{-1} \mathbf{K}_b \mathbf{r}^{-2} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^T(\mathbf{q}) \mathbf{F} \\ &= \mathbf{K}_m \mathbf{r}^{-1} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u} \end{split} \tag{74-7}$$

$$\begin{split} \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \left(\mathbf{B} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\right)\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F} &= \mathbf{H}_{a}\mathbf{u} \end{split} \tag{70-7} \\ \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \left(\mathbf{B} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\right)\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F} &= \mathbf{H}_{a}\mathbf{u} \end{aligned}$$



-) مقدمه

در این فصل ابتدا مفهوم امپدانس مکانیکی و نمایش شبکهای معرفی خواهد شد. سپس کاربرد امپدانس در حوزه رباتیک و نمایش کاربردهای مختلف بصورت مدل امپدانس ارائه میشود. مفهوم پایداری و عملکرد در کنترل امپدانس و مزیت امپدانس تعمیمیافته بر مدل امپدانس مرسوم بررسی خواهد گردید. روشهای مختلف کنترل امپدانس بر مبنای یک طبقهبندی جدید مرور شده و در نهایت دو نوع تحقق مختلف برای مدل امپدانس تعمیمیافته ارائه خواهد شد.

-) معرفی امپدانس مکانیکی

در تمام سیستمهای فیزیکی که قابل نمایش بصورت پارامتر-فشرده هستند، تنها دو نوع متغیر برای توصیف رفتار آنها نیاز است : متغیر تلاش و متغیر جریان (شکل ۳-۱). متغیر جریان نماینده حرکت در سیستم است و متغیر تلاش عامل این حرکت را توصیف میکند [۹]. امپدانس نگاشتی است از فضای جریان به فضای تلاش که میزان مقاومت سیستم را در برابر حرکت نشان میدهد.



در مدلسازی سیستمهای مکانیکی نیز میتوان از مدل شبکهای بهره برد. در سیستمهای مکانیکی، نیرو در نقش متغیر تلاش و سرعت در نقش متغیر جریان ظاهر می شود. بطور مثال، معادله دینامیکی یک سیستم جرم-فنر-دمپر (شکل ۳-۲)، مطابق قانون دوم نیوتن بصورت رابطه (۳-۱) توصیف می-شود :

$$F = M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = M\dot{V} + BV + K\int Vdt \tag{1-7}$$

x معرف جرم، B ضریب اصطکاک ویسکوز، K ثابت فنر، F نیروی وارد بر جرم، x موقعیت جرم و M موقعیت جرم و $V = \dot{x}$ بیانگر سرعت انتقالی جرم است.



امپدانس مکانیکی (Z_M) این سیستم در حوزه لاپلاس بصورت نسبت تبدیل لاپلاس نیرو به تبدیل لاپلاس سرعت تعریف می شود :

$$Z_M(s) \triangleq \frac{F(s)}{V(s)} = Ms + B + \frac{K}{s} \tag{7-7}$$

تعریف امپدانس در حوزه لاپلاس تنها به سیستمهای خطی تغییرناپذیر با زمان محدود می شود. تعریف زیر جامعیت بیشتری دارد و انواع مختلف سیستمهای مکانیکی را در برمی گیرد [۳] :

- تعریف ۳-۱ (امپدانس و ادمیتانس): امپدانس مکانیکی که از قطب یک شبکه دیده می شود، عملگری دینامیکی است که در آن سرعت بعنوان ورودی و نیرو بعنوان خروجی است. بدین ترتیب ادمیتانس نیز بعنوان یک عملگر دینامیکی با ورودی نیرو و خروجی سرعت خواهد بود.
-) **معادل تونن و نورتن** می توان تعامل ربات و محیط را بصورت دو شبکه جفت شده در نظر گرفت (شکل ۳-۳) و هر شبکه پیچیده از عناصر فعال و غیرفعال مکانیکی را بصورت معادل های تونن و نورتن نمایش داد [۷] (شکل ۳-۴). در اینجا، F نیروی وارده از سمت ربات به محیط است و V سرعت ربات را در فضای کار مشخص می کند.



رفتاری که محیط و ربات در تعامل با هم از خود نشان میدهند، در قالب امپدانس مدل می شود. در

مدل ربات، منابع نیرو (F_r) و سرعت (V_r) ، در حکم نیروها و سرعتهای فرمانی هستند که از سیگنال مرجع نیرو و موقعیت تبعیت میکنند و در مدل محیط، منابع F_e و V_e نقش اغتشاشات محیطی را دارند.



از آنجا که در ربات با کنترل موقعیت (x) سروکار داریم، در مراجع، عموماً امپدانس بصورت رابطه بین نیرو و موقعیت نیز تعریف می شود. از این پس در این پایان نامه، امپدانس با تعریف زیر نیز بکار گرفته خواهد شد [۱]:

$$G_R(s) \triangleq sZ_R(s) = \frac{F(s)}{x(s)} \tag{7-7}$$

-) کاربرد امپدانس در حوزه رباتیک

کاربردهای ربات بر اساس تعامل با محیط به دو دسته کلی کارهای غیرتماسی و کارهای تماسی تقسیم میشود [۱]. به کمک مفاهیم شبکه و امپدانس میتوان این کارها را به آسانی مدل و طبقه-بندی نمود. در این بخش، به توضیح این طبقهبندیها پرداخته و مثالی جهت شفاف شدن کاربرد امپدانس ارائه می گردد.

- -) کارهای غیر تماسی

کارهایی مانند پاشیدن رنگ و جوشکاری که ربات صرفاً باید مسیری از پیش تعیین شده را دنبال کند، در دسته کارهای غیرتماسی قرار می گیرند. بعبارت دیگر، ربات حرکتی بدون قید در فضای آزاد دارد و نیرویی از سمت محیط بر آن وارد نمی شود. بنابراین تنها عامل تأثیر گذار بر عملکرد کنترل (کنترل موقعیت)، دینامیک خود سیستم رباتیک است [۱].

مثال) فرض کنیم x بردار موقعیت مجری نهایی ربات در فضای کار باشد و \mathbf{x}_r مسیری است که ربات باید آنرا دنبال کند و کنترل کننده موقعیتی برای ربات طراحی شده که معادله حلقه بسته زیر را ارضا مي كند: $(\ddot{\mathbf{x}}_r - \ddot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_n(\dot{\mathbf{x}}_r - \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_n(\mathbf{x}_r - \mathbf{x}) = \mathbf{0}$ (f - T)اگر ماتریس.های قطری $\mathbf{K}_n, \mathbf{K}_n \in \mathbf{R}^{m imes m}$ معین مثبت باشند، معادله فوق حکم می کند که خطای ردگیری موقعیت $\Delta \mathbf{x}_r = \mathbf{x}_r - \mathbf{x}$ به صفر میل کند. رابطه (۳-۴) در واقع حالت خاصی از شکل کلی معادله دیفرانسیل زیر است : $\mathbf{M}_{R}(\ddot{\mathbf{x}}_{r}-\ddot{\mathbf{x}})+\mathbf{B}_{R}(\dot{\mathbf{x}}_{r}-\dot{\mathbf{x}})+\mathbf{K}_{R}(\mathbf{x}_{r}-\mathbf{x})=\mathbf{F}$ $(\Delta - \nabla)$ که در آن امپدانس محیط صفر است و نیرویی از سمت ربات به محیط وارد نمی شود (${f F}={f 0}$). معادله (۵-۳) بیان می کند که معادله حلقه بسته (۳-۴) در واقع امپدانس ظاهری است که ربات کنترلشده از خود نشان میدهد (شکل ۳-۵). ماتریسهای $\mathbf{M}_R, \mathbf{B}_R, \mathbf{K}_R \in \mathbb{R}^{m imes m}$ کنترل جرم ظاهری، میرایی ظاهری و ضریب سختی ظاهری ربات هستند. این ماتریسها عموماً بصورت قطری انتخاب می شوند که معادلات حلقه بسته (۳-۴) و (۳-۵) بصورت غیرمتمرکز باشند.

	x_r		x
F_r	B_R	M_R	<i>F=0</i>

شکل ۳-۵: امپدانس ظاهری ربات کنترل موقعیت شده (در یک جهت مختصاتی)

برای هر کدام از جهتهای مختصاتی، مدل امپدانس را می توان بصورت زیر نوشت : $\left(M_Rs^2 + B_Rs + K_R
ight)\left(x_r - x
ight) = G_R(s)\left(x_r - x
ight) = F$ (۶-۳)
معادله (۳-۶) را می توان بصورت مدل نور تن مطابق شکل ۳-۶(الف) نمایش داد. دوگان این نمایش



- -) کارهای تماسی

ربات در بسیاری از کاربردها مجبور است بصورت مکانیکی با محیط خود در تماس باشد و بر روی آن کار انجام دهد. از آنجا که ربات و محیط متقابلاً بر هم نیرو وارد میکنند، صرفاً با کنترل موقعیت ربات نمی توان کار را به انجام رساند، زیرا تنها یک انحراف کوچک از مسیر طراحی شده، می تواند منجر به نیروهای بزرگ شود [۲]. کارهای تماسی را می توان به دو دسته کلی حرکت انعطاف پذیر ^۱ و کارهای نیازمند ِ نیرو^۲ تقسیم نمود [۱].

۳-۴-۲)) حرکت انعطاف پذیر

کارهایی نظیر گرفتن و جایگذاری قطعات در این دسته جای میگیرند. این کارها اصولاً از جنس کنترل موقعیت هستند ولی بخاطر عدمقطعیت در تعیین دقیق موقعیت تماس با محیط، حرکت مقید شده و نیرو ظاهر میشود [۱]. لازم به ذکر است که نمیتوان با نیروی عکسالعمل همانند اغتشاش خارجی برخورد کرد، زیرا نادیده گرفتن آن میتواند منجر به آسیب رسیدن ابزار یا قطعه کار گردد. بنابراین کنترل باید به گونهای صورت گیرد که ربات در برابر محیط حرکتی انعطاف پذیر از خود نشان دهد و برای جلوگیری از اعمال نیروی غیرمجاز، از مسیر از پیش طراحی شده منحرف شود [۲۲]. اولین کاربردهای کنترل امپدانس محدود به این دسته از کارها میشدند [۳]. مثال بعد، نشان میدهد

¹ compliant motion

² essential force tasks

که مدل امپدانس بدون استفاده از کلید، میتواند هم در فضای آزاد و هم در حالت مقید رفتار انعطافپذیر را برای ربات فراهم کند.

مثال) فرض کنیم ربات وظیفه دارد قطعهای را در حفره مشخصی قرار دهد (شکل ۳-۷). هدف، همانند مثال قبل، کنترل موقعیت نقطه انتهایی (x) در مسیر از پیش طراحی شده (x,) است. مسئله از جایی متفاوت می شود که ربات در تعیین موقعیت حفره (
$$x_e$$
) خطا داشته باشد. در این صورت مجری نهایی نیروی F را از به سطح تماس وارد خواهد کرد. سطح کار می تواند بصورت یک سطح سخت مدل شود [۱۱]:
 $\mathbf{F} = \mathbf{K}_e \left(\mathbf{x} - \mathbf{x}_e \right) = \mathbf{K}_e \mathbf{x} + \mathbf{F}_e$ (Y-۳)
 $\mathbf{F} = \mathbf{K}_e \left(\mathbf{x} - \mathbf{x}_e \right) = \mathbf{K}_e \mathbf{x} + \mathbf{F}_e$ (Y-۳)
 $\mathbf{V} = \mathbf{K}_e \left(\mathbf{x} - \mathbf{x}_e \right) = \mathbf{K}_e \mathbf{x} + \mathbf{F}_e$ (Y-۳)
 $\mathbf{Y} = \mathbf{K}_e \left(\mathbf{x} - \mathbf{x}_e \right) = \mathbf{K}_e \mathbf{x} + \mathbf{x}_e$ محیط، بردار $\mathbf{x}_e \in \mathbb{R}^{m \times m}$ موقعیت محیط و $\mathbf{x}_e = -\mathbf{K}_e \mathbf{x}_e$
 $\mathbf{x}_e = -\mathbf{K}_e \mathbf{x}_e$
 $\mathbf{x}_e \mathbf{x}_e \mathbf{x}_e$ (rec) نشان می دهد.
 $\mathbf{x}_e \mathbf{x}_e \mathbf{x}_e$

اگر ربات به گونهای کنترل شود که رفتاری مطابق رابطه (۳-۵) از خود نشان دهد، با تنظیم مناسب پارامترهای امپدانس \mathbf{G}_R میتوان به گونهای کار مربوطه را انجام داد که نیروی تماس از محدوده مشخصی بیشتر نشود. فرض کنیم انحرافی در کنترل موقعیت بوجود آید که قطعه با لبه محدوده مشخصی بیشتر نشود. فرض کنیم اندرافی در کنترل موقعیت بوجود آید که قطعه با لبه محدوده مشخصی $\mathbf{x}_R(\mathbf{x}_r - \mathbf{x}_e) \approx \mathbf{F}$ (۸-۳)

بنابراین، با کوچک کردن \mathbf{K}_R میتوان نیروی \mathbf{F} را کاهش داد. بعبارت دیگر، ربات باید در برابر یک سطح سخت، رفتاری نرم از خود نشان دهد. متناسب با آن، میتوان ماتریس ضرایب \mathbf{B}_R و \mathbf{M}_R را برای دستیابی به حالت گذرای مطلوب تنظیم نمود. شکل ۳-۸ مدل امپدانس را برای این نوع کار به نمایش میگذارد. در اینجا، مدل امپدانس محیط $\mathbf{K}_e(s) = \mathbf{K}_e$ میباشد.



مدل امپدانس مرسوم (۳-۵) که در غالب کارهای ارائه شده مورد استفاده قرار می گیرد، دارای نواقصی است که در بخش (۳–۵–۱) به تفصیل در مورد آن صحبت خواهد شد. از این رو، برای انجام بهتر کارهای تعاملی مدلهای مختلفی برای امپدانس ارائه شده است.

از نواقص امپدانس (۳-۵) می توان به امکان نوسانی شدن نیروی تماس هنگام برخورد با محیط اشاره کرد. در [۱۱] امپدانس تعمیم یافته بصورت زیر معرفی شده است تا نقص نوسان نیرو را برطرف کند: (۳) می است (۳) می از (۳) می می افته بصورت زیر معرفی شده است تا نقص نوسان نیرو را برطرف کند:

$$\mathbf{M}_{R}(\mathbf{x}_{r} - \mathbf{x}) + \mathbf{B}_{R}(\mathbf{x}_{r} - \mathbf{x}) + \mathbf{K}_{R}(\mathbf{x}_{r} - \mathbf{x}) = \mathbf{B}_{f}(\mathbf{F} - \mathbf{F}_{r}) + \mathbf{K}_{f}(\mathbf{F} - \mathbf{F}_{r})$$
(9-7)

 $\mathbf{F}_r \in \mathbb{R}^m$ ماتریس میرایی نیرو و $\mathbf{B}_f \in \mathbb{R}^{m imes m}$ ماتریس میرایی نیرو و $\mathbf{K}_f \in \mathbb{R}^{m imes m}$ که در آن محدود کردن و کنترل بیشتر نیروی تماس به مدل امپدانس اضافه شده نیروی مرجع است که برای محدود کردن و کنترل بیشتر زیر بدست میآید: است. با این وصف، مدل امپدانس تعمیم یافته بصورت زیر بدست میآید:

$$\mathbf{G}_{R}(s) = \left(\mathbf{B}_{f}s + \mathbf{K}_{f}\right)^{-1} \left(\mathbf{M}_{R}s^{2} + \mathbf{B}_{R}s + \mathbf{K}_{R}\right)$$
(1.-7)

بنابراین مدل امپدانس تعمیمیافته برای کارهایی که نیاز به حرکت انعطافپذیر دارند بصورت نمایش داده شده در شکل ۳-۹ است.



شکل ۳-۳ : مدل امپدانس برای حرکت انعطاف پذیر

لازم به ذکر است که در این رویکرد، \mathbf{F}_r هنگام درگیر شدن ربات با محیط باید ظاهر شود. امپدانس تعمیم یافته بصورت عملی برای به هم بستن قطعات الکترونیکی اجرا شده و نتایج خیلی خوبی از آن گرفته شده است [۱۴–۱۶]. اما در این مقالات از قسمت مشتق نیرو صرفنظر کردهاند و امپدانس تعمیم یافته را بصورت زیر به اجرا گذاشتهاند:

$$\mathbf{M}_{R}\left(\ddot{\mathbf{x}}_{r}-\ddot{\mathbf{x}}
ight)+\mathbf{B}_{R}\left(\dot{\mathbf{x}}_{r}-\dot{\mathbf{x}}
ight)+\mathbf{K}_{R}\left(\mathbf{x}_{r}-\mathbf{x}
ight)=\mathbf{K}_{f}\left(\mathbf{F}-\mathbf{F}_{r}
ight)$$
 (۱۱-۳)
علت این امر، بخاطر نیاز به مشتق گیری از نیروی تماسی است و از آنجا که اندازه گیری نیرو میتواند با
نویز همراه باشد، با مشکل تقویت نویز روبرو میشویم.

۳-۴-۲) کارهای نیازمند ِ نیرو

در برخی از کارها مانند برادهبرداری از سطوح، لازم است تماس ربات با محیط حفظ شود. بعبارت دیگر ربات باید نیروی مشخصی را جهت انجام کار به محیط اعمال کند و علاوه بر موقعیت، نیروی تماس نیز باید کنترل گردد زیرا جدا شدن ابزار از سطح کار، منجر به ناقص شدن عمل مورد نظر می-شود.



برای اینکه کار برادهبرداری بصورت کامل انجام شود، مجری نهایی باید مسیر مرجع x, x را دنبال کرده و در عین حال نیروی F, را در جهت عمود بر سطح قطعه کار وارد کند. در روش کنترل ترکیبی نیرو/موقعیت، فضای کار به دو زیر فضای کنترل موقعیت و کنترل نیرو تفکیک میشود و بین کنترل موقعیت و کنترل نیرو کلیدزنی دارد، زیرا نمیتوان نیرو و موقعیت را همزمان در یک راستا کنترل موقعیت و کنترل نیرو کلیدزنی دارد، زیرا نمیتوان نیرو و موقعیت را نیروی تماس تضمین نمیشود و این یکی از نواقص دیگر امپدانس (۳-۵) و (۳-۹) تنظیم دقیق نیروی تماس تضمین نمیشود و این یکی از نواقص دیگر امپدانس (۳-۵) است که امپدانس تعمیم-نیروی تماس تضمین نمیشود و این یکی از نواقص دیگر امپدانس (۳-۵) است که امپدانس تعمیم-نیرو کارایی بهتری دارد [۱]. اندرسون و ایپانگ در [۲, ۲] شرایط لازم برای کنترل نیرو را در روش کنترل امپدانس توضیح میدهند.

بدین منظور امپدانس محیط را به سه دسته تقسیم می کنند:

تعریف ۳-۲: امپدانس Z(s) در حوزه لاپلاس :

- (Z(s) = Ms (مانند Z(s) = Ms) (مانند Z(s) = 0
-) مقاومتی است اگر و تنها اگر B = |Z(0)| = B (مانند: C(s) = Ms + B

(
$$Z(s)=rac{K}{s}$$
 (مانند: $\left|Z(0)
ight|=+\infty$) کازنی است اگر و تنها اگر $=+\infty$

امپدانس محیطهای خازنی و جرمی، دوگان یکدیگرند، از این نظر که معکوس یک سیستم جرمی، خازنی و معکوس یک سیستم خازنی، بصورت جرمی است. دوگان یک محیط مقاومتی نیز، یک محیط مقاومتی است، به عبارت دیگر خود دوگان⁴ میباشد.

 3 inertial 4 self-dual

در [۲, ۷] نشان داده می شود که برای داشتن خطای حالت دائم صفر (موقعیت یا نیرو) به ازای ورودی پله، کنترل امپدانس ربات باید بر مبنای اصل دوگانی^۵ طراحی شود: **اصل دوگانی:** ربات باید به گونهای کنترل شود که بصورت دوگان محیط خود رفتار کند. نمایش کنترل موقعیت ربات در تعامل با محیط، بصورت منبع سرعت (شبکه نورتن) و کنترل نیرو بصورت منبع نیرو (شبکه تونن) است. پس بنا بر اصل دوگانی، برای کنترل نیرو، معادل نورتن و برای کنترل موقعیت، معادل تونن برای محیط پیشنهاد می شود (شکل ۳-۱۱).



شكل ٣-١١ : (الف)معادل تونن محيط، (ب) معادل نورتن محيط

در شکل ۲-۱۱(الف)، سرعت ربات V را می توان بصورت زیر محاسبه نمود:

$$V = \frac{Z_R}{Z_R + Z_e} V_r + \frac{1}{Z_R + Z_e} \left(F_r - F_e \right) \tag{17-7}$$

با فرض $F_r - F_e = 0$ و به کمک قضیه مقدار نهایی، خطای حالت دائم سرعت به ازای ورودی پله واحد $F_r - F_e = 0$

$$e_{vss} = \lim_{s \to 0} s\left(V_r - V\right) = \lim_{s \to 0} \frac{Z_e(s)}{Z_R(s) + Z_e(s)} \tag{17-7}$$

از رابطه فوق میتوان نتیجه گرفت که در تعامل با محیط خازنی (
$$\infty=\infty$$
) نمیتوان موقعیت را
به خوبی کنترل نمود، چون حرکت ربات از طرف محیط مقید میشود و خواهیم داشت: ا $e_{vss}=1$

⁵ duality principle

پس برای محیطهای جرمی ($0 = 0 = (Q_e(0) = 0$)، خطای حالت دائم تنها زمانی صفر خواهد شد که امپدانس ربات بصورت دوگان محیط، یعنی غیر جرمی ($0 \neq 0 = Z_R(0)$) باشد. در برابر محیط مقاومتی ($Z_e(0) = B$) نیز، برای اینکه خطای حالت دائم سرعت، کاهش یابد، امپدانس ربات باید غیر جرمی انتخاب گردد و در حالتی که امپدانس ربات بصورت خازنی باشد، خطای حالت دائم صفر خواهد بود. در کنترل نیرو، مطابق شکل ۳-۱۱(ب)، نیروی تماس را می توان بدین صورت حساب کرد:

$$F = \frac{Z_e}{Z_R + Z_e} F_r + \frac{Z_R Z_e}{Z_R + Z_e} \left(V_r + V_e \right) \tag{14-7}$$

با فرض $V_r+V_e=0$ و با توجه به قضیه مقدار نهایی، خطای حالت دائم نیرو $V_r+V_e=0$ با فرض $e_{fss}=\lim_{t\to 0}\left(F_r-F\right)$

$$e_{fss} = \lim_{s \to 0} s\left(F_r - F\right) = \lim_{s \to 0} \frac{Z_R(s)}{Z_R(s) + Z_e(s)} \tag{12-7}$$

رابطه فوق نشان میدهد که کنترل نیروی تماس در برابر محیط جرمی نمی تواند به خوبی انجام شود، چرا که حرکت از طرف محیط مقید نیست و داریم: $1 = e_{fss}$. در تعامل با محیطهای خازنی و مقاومتی، کافیست که امپدانس ربات غیر خازنی انتخاب شود تا خطای حالت دائم نیرو صفر شود. با این توضیحات، مدل امپدانس (۳-۵) و امپدانس تعمیم یافته (۳-۹) از نوع خازنی هستند و بنابراین برای تنظیم نیرو در برابر محیطهای خازنی نمی توانند نتیجه مناسبی را ارائه کنند. برای تنظیم نیرو در از ۲] جهت بهبود تنظیم نیرو، مدل امپدانس زیر پیشنهاد شده است: $\mathbf{M}_{R}(\ddot{\mathbf{x}}_{r}-\ddot{\mathbf{x}}) + \mathbf{B}_{R}(\dot{\mathbf{x}}_{r}-\dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_{R}(\mathbf{x}_{r}-\mathbf{x}) = \mathbf{K}_{f}(\mathbf{F}-\mathbf{F}_{r}) + \mathbf{K}_{I}\int_{0}^{t}(\mathbf{F}-\mathbf{F}_{r})d\tau$ (۱۶-۳) که در آن \mathbf{K}_{f} ماتریس تناسبی نیرو و \mathbf{K}_{I} ماتریس انتگرالی نیرو نامیده میشوند. امپدانس فوق در

$$\mathbf{Z}_{R}(s) = \left(\mathbf{K}_{f} + \mathbf{K}_{I}\frac{1}{s}\right)^{-1} \left(\mathbf{M}_{R}s + \mathbf{B}_{R} + \mathbf{K}_{R}\frac{1}{s}\right)$$
(1Y-T)

واضح است که
$$\mathbf{K}_I^{-1}\mathbf{K}_R = \mathbf{V}_R(0) = \mathbf{K}_I^{-1}$$
 بوده و نشاندهنده مقاومتی بودن آن است. بنابراین کنترل نیرو را
میتواند بهتر از مدلهای امپدانس قبلی به اجرا گذارد و نیازی به کلیدزنی بین مدلهای مختلف
امپدانس نیست. مدل امپدانس (۲۰–۱۷) را نیز میتوان بصورت شکل ۳–۱۱ نمایش داد.
در [۷] کنترل امپدانس ترکیبی ارائه شده است تا مزایای هر دو روش کنترل امپدانس و کنترل
ترکیبی نیرو/موقعیت را داشته باشد. در این نوع کنترل، ربات در راستایی که با محیط خازنی در
تماس است، کنترل نیرو و در راستایی که حرکت آزاد دارد، کنترل موقعیت میشود. بنابراین در
راستای کنترل موقعیت باید امپدانس خازنی و با فرمان موقعیت و در راستای کنترل نیرو، امپدانس
غیر خازنی و فرمان نیرو تعریف شود. به تبع آن و مشابه روش کنترل موقعیت و کنترل نیرو تخییر حالت
(1) نیز تعریف شود تا در تعامل با محیطهای مختلف، بین کنترل موقعیت و کنترل نیرو تغییر حالت
دهد. در شکل ۲–۱۲ حلقه کنترل امپدانس ترکیبی نشان داده شده است. امپدانسهای انتخاب شره
در [۷] بصورت زیر هستند:



شکل ۳-۱۲ : کنترل امپدانس ترکیبی برای کارهای نیازمندِ نیرو

روش دیگری با عنوان کنترل امپدانس ردگیری نیرو ارائه شده است که به شکل دیگری نقص کنترل امپدانس را در ردگیری نیرو جبران میکند [۱۸-۲۰]. از آنجا که این روش نیز به تفکیک فضای کار

 $^{^{6}}$ selection matrix

به دو زیرفضای متعامد نیرو و موقعیت نیاز دارد و در آن از کلید استفاده شده است، از نظر ساختاری همانند کنترل امپدانس ترکیبی عمل میکند.

-) مفهوم كنترل امپدانس

تغییر امپدانس یک سیستم با استفاده از عناصر غیرفعالی مثل فنر و دمپر، محدودیتهای زیادی دارد و طراحان را به سمت استفاده از روشهای فعال سوق میدهد [۱]. مثال زیر نشان میدهد که چطور میتوان بصورت فعال و تغییر دینامیکهای سیستم، امپدانس ظاهری سیستم را تغییر داد:

مثال) جرمی مطابق شکل ۳-۱۳ را در نظر بگیرید. بر مبنای قانون دوم نیوتن، معادله حاکم بر رفتار جرم M بصورت رابطه (۱۹-۳) توصیف میشود : $F_{com} - F = M\ddot{x} \longrightarrow F_{com} = G(s)x + F$ (۱۹-۳) Com = G(s)x + F (۱۹-۳) Com = G(s)x + F (۱۹-۳) Com = -mF (۱۹-۳) $F_{com} = -mF$ $F_{com} = -mF$ (۲۰-۳) $F_{com} = -mF$ (۲۰-۳) $F_{com} = -mF$

$$\left(\frac{M}{1+m}\right)\ddot{x} = -F \tag{(Y1-Y)}$$



رابطه (۲۱-۳) نشان میدهد جرم ظاهری سیستم از دید ناظر خارجی به $\frac{M}{1+m}$ تغییر کرده است. بنابراین به کمک پسخورد نیرو می توان امپدانس ظاهری سیستم را تحت کنترل در آورد [۲]. به همین ترتیب، برای اینکه امپدانس ظاهری سیستم مطابق رابطه (۳-۶) شود، باید نیرویی مطابق

امپدانس ربات نیز به همین منوال قابل کنترل است، با این تفاوت که برای محقق کردن امپدانس مطلوب، با یک جرم ساده سروکار نداریم و دینامیکهای پیچیده، حجیم، غیرخطی و با تزویج ربات کنترل امپدانس را به مسئلهای ویژه تبدیل میکند.

- -) **پایداری و عملکرد در کنترل امپدانس**

سیستمی مانند ربات که تحت شرایط کنترل موقعیت در فضای آزاد پایدار است، هنگام تعامل با سیستم دیگر میتواند رفتار ناپایداری را از خود نشان دهد. بنابراین مهمترین موضوع در کنترل امیدانس تضمین پایداری است.

به دو سیستم مانند $S_1 = S_2 = S_2$ که در تعامل با یکدیگر قرار دارند، سیستمهای جفت شده میگویند و می توان آنها را بصورت آرایش پسخورد نمایش داد (شکل ۳-۱۴). شکل ۳-۱۴(الف) تعامل در سیستم مکانیکی با سرعت مشترک و شکل ۳-۱۴(ب) حالت نیرو مشترک را نمایش می دهد [۳].



شکل ۳-۱۴ : نمایش سیستم های جفت شده بصورت آرایش پسخورد

از آنجا که مطالعه این پایان نامه، محدود به امپدانسهای خطی تغییرناپذیر با زمان میباشد، نمایش شکل ۳-۱۴ را میتوان بصورت مدلهای تابع تبدیل امپدانس نشان داد. شکل ۳-۱۵ حالت چندمتغیره تعامل ربات با محیط را نمایش میدهد. از آنجا که فرض بر مستقل بودن مدل امپدانس برای هر راستای مختصاتی است، تحلیلها برای سادگی در حالت اسکالر انجام می شود. در فرم اسکالر، متغیرهای نمایش داده شده بصورت مورب، نماینده یک عنصر از متغیر یا ماتریس قطری هم نام به فرم پررنگ هستند.



شکل ۳-۱۵ : نمایش سیستم های جفت شده بصورت امپدانس های خطی تغییرناپذیر با زمان

تحلیلهای پایداری در این بخش تنها به تعامل ربات با محیطهای غیرفعال می پردازد. در سیستمهای خطی تغییرناپذیر با زمان، غیرفعال بودن متناظر با تابع تبدیل حقیقی مثبت است [۵۵]: تعریف ۳-۳ (سیستم غیر فعال): سیستم تعریف شده توسط تابع امپدانس (*Z*(s) غیرفعال (حقیقی و مثبت) است اگر و تنها اگر [۳]:

- .) (۱) هیچ قطب ناپایداری نداشته باشد. Z(s)
- ۲) قطبهای موهومی Z(s) ساده بوده و ماندههای حقیقی مثبت داشته باشند. (۲Z(s) به ازای $0 \ge 0$ داشته باشیم: $0 \ge Re \{Z(j\omega)\} \ge 0$

اگر $Z_e(s)$ حقیقی مثبت باشد، معکوس آن $Z_e^{-1}(s)$ نیز حقیقی مثبت است [۳]. با این وصف محیط متشکل از جرم و فنر غیرفعال است. در [۱۰] شرط لازم و کافی برای پایداری جفت شده ربات با محیط غیرفعال ارائه شده است:

تعریف ۳-۴ (پایداری جفتشده): شرط لازم و کافی برای تضمین پایداری یک سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان پایدار که با یک محیط خطی تغییرناپذیر با زمان غیرفعال جفت شده است، این است که امپدانس سیستم حقیقی مثبت یا بعبارت دیگر، سیستم غیرفعال باشد. می توان نشان داد که مدل امپدانس مرسوم (۳-۶) از نوع غیرفعال است و در تعامل با محیطهای غیرفعال پایداری جفت شده را تضمین خواهد کرد:

$$\begin{split} Z_{R}(s) &= M_{R}s + B_{R} + \frac{K_{R}}{s} = \frac{M_{R}s^{2} + B_{R}s + K_{R}}{s} \\ Z_{R}^{-1}(s) &= \frac{s}{M_{R}s^{2} + B_{R}s + K_{R}} \end{split} \tag{77-7}$$

$$\operatorname{Re}\left\{Z_{R}(j\omega)\right\} = \frac{B_{R}}{\omega} \ge 0 \quad , \quad \forall \omega \ge 0 \tag{74-7}$$

پس ثابت می شود که امپدانس مرسوم و معکوس آن در (۳-۲۳) در تعامل با محیطهای غیرفعال پایداری جفت شده خواهد داشت.

از آنجا که بخشی از فرایند کنترل امپدانس مربوط به کنترل موقعیت ربات است، مدل امپدانس مرسوم بصورت زیر مبنای کار قرار می گیرد:

$$\mathbf{M}_{R}\left(\ddot{\mathbf{x}}_{r}-\ddot{\mathbf{x}}\right)+\mathbf{B}_{R}\left(\dot{\mathbf{x}}_{r}-\dot{\mathbf{x}}\right)+\mathbf{K}_{R}\left(\mathbf{x}_{r}-\mathbf{x}\right)=\mathbf{F}$$
(YΔ-Y)

که تابع تبدیل امپدانس $G_R(s)$ بصورت زیر تعریف می شود:

$$G_R(s) = \frac{F(s)}{x(s)} = M_R s^2 + B_R s + K_R \tag{79-7}$$

مدل امپدانس ربات همانند شکل ۳–۱۵ میتواند به دو صورت اجرا شود که بطور مفصل در بخش کنترل امپدانس ربات (-9) به آن خواهیم پرداخت. در اینجا، صرفاً به نمایش آنها بسنده می کنیم (شکل ۳–۱۶). از این طریق میتوان عملکرد تعامل ربات را با تابع تبدیل $G_R(s)$ را با محیط مورد ارزیابی قرار داد.



شكل ٣-١8 : نحوه اجراى كنترل امپدانس، (الف) پسخورد نيرو، (ب) پسخورد موقعيت

در این پایان نامه، محیط بصورت یک سطح سخت با ضرایب سختی K_e مدل می شود [۱۱]. بنابراین داریم:

$$F = K_e(x - x_e) \tag{Y-T}$$

با انتخاب امپدانس (۳-۲۶) برای ربات، نمودار مکان هندسی ریشههای معادله حلقه بسته



بصورت شکل ۳-۱۷ خواهد بود. $1+K_e G_R^{-1}(s)=0$

شکل ۳-۱۷ : نمودار مکان هندسی ریشه ها

از شکل ۳-۱۷ در مییابیم که با افزایش K_e ، بخش موهومی قطبهای حلقه بسته بزرگ خواهد شد که نشانه نوسانات زیاد است. نوسانات زیاد نیرو میتواند هم به سطح و هم به ابزار آسیب برساند. یک

راه، انتخاب مناسب پارامترهای امپدانس ربات است به گونهای که قطبها دارای ضریب میرایی مناسب باشند.

اما در [۱۱] مشکل قطبهای نوسانی را با ارائه مدل امپدانس تعمیم یافته حل کرده است. مدل
امپدانس تعمیم یافته با توجه به (۳-۹) و با فرض
$$\mathbf{F}_r = \mathbf{0}$$
 بصورت میباشد:

$$\mathbf{M}_{R}\left(\ddot{\mathbf{x}}_{r}-\ddot{\mathbf{x}}\right)+\mathbf{B}_{R}\left(\dot{\mathbf{x}}_{r}-\dot{\mathbf{x}}\right)+\mathbf{K}_{R}\left(\mathbf{x}_{r}-\mathbf{x}\right)=\mathbf{B}_{f}\dot{\mathbf{F}}+\mathbf{K}_{f}\mathbf{F}$$
(YA-Y)

بنابراین تابع تبدیل $Z_R(s)$ در حوزه لاپلاس بدین صورت بدست میآید:

$$Z_R(s) = \frac{M_R s^2 + B_R s + K_R}{s \left(B_f s + K_f \right)} \tag{79-7}$$

باید پایداری جفت شده را تضمین کند، یعنی باید غیرفعال باشد. پس شروط ارائه شده در $Z_R(s)$ تعریف ۳-۳ باید چک شوند:

 M_R ابرای اینکه $Z_R(s)$ و $Z_R^{-1}(s)$ هیچ قطبی در سمت راست نداشته باشند، تمامی ضرائب M_R (۱) برای اینکه B_f ، K_R ، B_R ، (۱) میار مثبت باشند (معیار روث–هورویتز)

) مانده قطب ساده
$$s=0$$
 برابر $rac{K_R}{K_f}$ و مثبت است. (۲

۳) با توجه به:

$$\begin{split} \operatorname{Re}\left\{Z_{R}(j\omega)\right\} &= \frac{B_{f}M_{R}\omega^{2} - B_{f}K_{R} + B_{R}K_{f}}{\left(B_{f}\omega\right)^{2} + K_{f}^{2}} \end{split} \tag{(٣-٣)} \end{split}$$

$$(\mathfrak{m}, \mathfrak{m}) \quad (\mathfrak{m}, \mathfrak{m}$$

از طرفی با توجه به (۳-۲۹)، تابع تبدیل
$$\,G_R^{-1}(s)\,$$
 بصورت زیر بدست میآید:

$$G_{R}^{-1}(s) = \frac{B_{f}s + K_{f}}{M_{R}s^{2} + B_{R}s + K_{R}}$$
(٣١-٣)

اولین شرط برای جلوگیری از ظاهر شدن قطبهای نوسانی در معادله حلقه بسته

باشند. $M_R s^2 + B_R s + K_R = 0$ معادله معادله $M_R s^2 + B_R s^2 + K_R = 0$ معادله باشند. $M_R s^2 - 4 M_R s^2$ مربط زیر باید برقرار باشد: $B_R^2 - 4 M_R K_R \ge 0$ (۳۲-۳) $1 + K_e G_R^{-1}(s) = 0$ محادله 0 = (s) درست انتخاب شود، ریشههای معادله $0 = (s) - K_f / B_f$ بانابراین اگر مکان صفر $M_R s^2 - 4 M_R s^2$ محاز برای مکان صفر در شکل ۳-۱۸ با توجه به همواره قطبهای حقیقی خواهند داشت. ناحیه مجاز برای مکان صفر در شکل ۳-۱۸ با توجه به





Real Axis (seconds⁻¹)

شکل ۳-۱۸ : ناحیه مجاز برای مکان صفر در امپدانس تعمیم یافته

با این وصف، حد پایین $\frac{B_f}{K_f}$ بصورت زیر بدست میآید:

$$\frac{B_f}{K_f} > \frac{2M_R}{B_R + \sqrt{B_R^2 - 4M_RK_R}} \ge 2\frac{M_R}{B_R} \tag{(77-7)}$$

c, [11] Tigs index and the set of the se

مقایسه روشهای ابداعی در این پایان نامه با روشهای نمونه پیشین، بر مبنای عملکرد حلقه کنترل در پیادهسازی امپدانس تعمیم یافته قرار دارد. بعبارت دیگر، امپدانس تعمیم یافته (۳-۲۸) بعنوان مدل مرجع انتخاب شده است. در بخش تحقق امپدانس تعمیم یافته (۳–۷(بعد جزئیات تحقق امپدانس تعمیم یافته، شرح خواهد شد.

-) کنترل امپدانس ربات

مدل امپدانس رفتاری را مشخص می کند که ربات در تعامل با محیط باید از خود نشان دهد. بعبارت دیگر، کنترل کننده ربات وظیفه دارد رفتار حلقه بسته سیستم رباتیک را مطابق مدل امپدانس کند. طبعاً در راستای کنترل، عدمقطعیتهایی حضور دارند که در عملکرد حلقه کنترل ایجاد اختلال می-کنند. دینامیک ربات شدیداً غیرخطی و با تزویج همراه است. غلبه بر اثرات دینامیکی ربات و عدم-قطعیت مدل دینامیکی ربات از ملزومات اجرای کنترل امپدانس میباشد. از آنجا که مدل امپدانس در فضای کار ربات تعریف میشود و کنترل کنندهها در فضای مفصلی عمل میکنند، عدمقطعیت در سینماتیک ربات نیز بر مشکل کار میافزاید. علاوه بر این، حضور محرکهها و عدمقطعیتهای مربوط به آنها نیز پیچیدگی کنترل را دو چندان میکند. با این وصف، حضور عدمقطعیتها در دستیابی به امپدانس مطلوب ایجاد اختلال میکنند، یعنی:

$$\mathbf{G}_{R}(s)\left(\mathbf{x}_{r}-\mathbf{x}\right)=\mathbf{F}+\mathbf{\eta} \tag{(3.17)}$$

که در آن $\mathbf{n} \in \mathbb{R}^m$ معرف کلیه عدمقطعیتهایی است که در منجر به خطا در کنترل امپدانس می-شوند. بنابراین تعریف معیاری که عملکرد حلقه کنترل امپدانس را مورد ارزیابی قرار دهد، الزامی است. بسته به این که چه نوع متغیری (نیرو یا موقعیت) برای توصیف خطای کنترل امپدانس استفاده شود، دو نوع انتخاب به نام خطای مدل نیرو^۷ و خطای مدل موقعیت[^] جهت سنجش وجود دارد [۱]:

⁷ force model error

⁸ position model error

۱) خطای مدل نیرو: در (۳۴-۳) بخش $\mathbf{G}_{R}(s)(\mathbf{x}_{r}-\mathbf{x})$ میتواند در حکم نیروی مطلوبی فرض شود که ربات ملزم است به محیط وارد کند (\mathbf{F}_{d}). پس اختلاف نیروی مطلوب معرفی شده توسط مدل امپدانس و نیروی واقعی تماس، میتواند بعنوان خطای کنترل امپدانس معرفی شود. پس خطای مدل نیرو بدین صورت تعریف میشود:

$$\mathbf{e}_{f}(s) \triangleq \mathbf{F}_{d}(s) - \mathbf{F}(s) = \mathbf{G}_{R}(s) \left(\mathbf{x}_{r}(s) - \mathbf{x}(s) \right) - \mathbf{F}(s) \tag{72-7}$$

 $\mathbf{G}_R(s)$ اگر کنترل کننده ربات به گونهای طراحی شود که $\mathbf{0} \to \mathbf{0}$ ، آنگاه امپدانس مطلوب بر $\mathbf{G}_R(s)$

۲) خطای مدل موقعیت: با ضرب طرفین رابطه (۳-۳۴) در $\mathbf{G}_R^{-1}(s)$ ، داریم:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_r - \mathbf{G}_R^{-1}(s)\mathbf{F} - \eta'$$
 (۳۶-۳)
که در آن $\eta' = \mathbf{G}_R^{-1}(s)\eta$ میباشد. با این نگاه، امپدانس مطلوب میتواند موقعیت مطلوب را
(\mathbf{x}_d) معرفی کند که ربات موظف است آن را دنبال کند. بنابراین خطای مدل موقعیت
بصورت اختلاف موقعیت مطلوب امپدانس و موقعیت واقعی نقطه انتهایی ربات تعریف می-
شود:

$$\mathbf{e}_p(s) \triangleq \mathbf{x}_d(s) - \mathbf{x}(s) = \mathbf{x}_r(s) - \mathbf{G}_R(s)^{-1}\mathbf{F}(s) - \mathbf{x}(s)$$
 (۳۷-۳)
بنابراین کنترل کننده موقعیت ربات باید به گونهای طراحی شود که با حداقل کردن \mathbf{e}_p ، به
امپدانس مطلوب دست یابد.

اما این طبقهبندی دارای ابهام است و نمی توان بعضی از مقالات را در قالب آن گنجاند. بطور مثال، در [۲۱] از روش کنترل گشتاور جهت ردگیری موقعیت مطلوب امپدانس و کاهش خطای مدل موقعیت (\mathbf{e}_p) استفاده شده است. با این وصف نیاز به طبقهبندی جدید احساس می شود. در این پایان نامه، با توجه به نوع خطای کنترل امپدانس، دو روش کلی می تواند ارائه شود:

- کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل نیرو
- ۲) کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت

علاوه بر این، دو حالت کلی تر در کنترل ربات وجود دارد:

- ۱) راهبرد کنترل گشتاور
 - ۲) راهبرد کنترل ولتاژ

که در ادامه دو روش اجرای کنترل امپدانس را با راهبردهای فوق مورد بررسی قرار میدهیم. از آنجا که برخی مقالات ارجاع داده شده در این بخش، مدلهای امپدانس متفاوتی را مورد بررسی قرار دادهاند، صرفاً جهت مقایسه روشهای کنترل امپدانس با هم، مدل امپدانس مطلوب را برای همه بصورت زیر در نظر می گیریم:

$$\mathbf{M}_{R}(\ddot{\mathbf{x}}_{r}-\ddot{\mathbf{x}})+\mathbf{B}_{R}(\dot{\mathbf{x}}_{r}-\dot{\mathbf{x}})+\mathbf{K}_{R}(\mathbf{x}_{r}-\mathbf{x})=\mathbf{F} \tag{(7.17)}$$

پس هدف کنترل، رسیدن ربات به امپدانس $\mathbf{G}_R(s) = \mathbf{M}_R s^2 + \mathbf{B}_R s + \mathbf{K}_R$ است. انتخاب این مدل امپدانس، از کلیت روشهای کنترل امپدانس نمیکاهد.

- -) راهبرد کنترل گشتاور

در این روش، گشتاور لازم جهت غلبه بر دینامیکهای غیرخطی ربات و کنترل آن محاسبه می شود و به همین خاطر، از آن با عنوان روش گشتاور محاسباتی نیز یاد می شود. در اکثر مقالات این حوزه، فرض بر این است که گشتاور مفاصل به خوبی قابل کنترل بوده و در نتیجه از دینامیک محرکهها چشم پوشی می شود. در مقالاتی که دینامیک محرکه را نیز در نظر گرفتهاند، برای حذف دینامیکهای

⁹torque control strategy

¹⁰voltage control strategy

غیرخطی ربات همچنان گشتاور لازم محاسبه شده و سپس ورودی محرکهها را جهت تأمین آن محاسبه میکنند. با این وصف، در این پایاننامه، این روشها نیز در دسته کنترل گشتاور گنجانده شده است.

مدل دینامیکی ربات در تعامل با محیط با توجه به رابطه (۲-۲۴) بصورت زیر است :

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F} = \boldsymbol{\tau}_{R}$$
(٣٩-٣)

که در آن F نیرویی است که ربات به محیط وارد میکند. (۳-۳۹) دینامیک ربات را در فضای مفصلی نشان میدهد. در بعضی مراجع، از معادلات ربات در فضای کار استفاده میکنند [۷]:

$$\mathbf{D}_{x}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_{x}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{g}_{x}(\mathbf{q}) + \mathbf{F} = \mathbf{J}^{-T}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau}_{R}$$
(**f** - **T**)

که این دوهم ارز یکدیگر هستند^{۱۱}.

$$\begin{split} \boldsymbol{\tau}_{R} &= \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \\ &+ \mathbf{J}^{T}(\mathbf{q}) \Big[\mathbf{M}_{R}(\ddot{\mathbf{x}}_{r} - \ddot{\mathbf{x}}) + \mathbf{B}_{R}(\dot{\mathbf{x}}_{r} - \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_{R}(\mathbf{x}_{r} - \mathbf{x}) \Big] \end{split} \tag{F1-T}$$

که در آن لازم است q، q، q، k، x و x اندازه گیری شود که اندازه گیری شتاب مفاصل (q) و سرعت (x) و شتاب مجری نهایی (x) پیچید گیهای زیادی دارد و تا حد ممکن از اندازه گیری آنها خودداری می شود. اما جدا از این موارد، نیروی تماس F بصورت حلقه باز کنترل می شود که برای کنترل تعامل روش مطمئنی نیست. برای داشتن یک کنترل حلقه بسته، اندازه گیری نیروی تماس الزامی است. بنابراین باید قانون کنترل (۲۰) اصلاح شود. روابط (۲-۹) و (۲-۱۰) ارتباط سرعت و

[&]quot; رجوع شود به فصل ۲: سینماتیک و دینامیک ربات، رابطه (۲۵-۲)

شتاب مجری نهایی را با سرعت و شتاب مفاصل بیان میکند:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}}$$
 (47-7)

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \left(\ddot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right)$$
(47-7)

از رابطه (۳-۳۸) نیز شتاب معادل برای مجری نهایی قابل استخراج است:

$$\ddot{\mathbf{x}}_{eq} = \ddot{\mathbf{x}}_r + \mathbf{M}_R^{-1} \left(\mathbf{B}_R (\dot{\mathbf{x}}_r - \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_R (\mathbf{x}_r - \mathbf{x}) - \mathbf{F} \right)$$
(FF-T)

همانطور که از (۳-۴۴) بر میآید، شتاب مطلوب امپدانس به جای نیروی مطلوب امپدانس نشسته است تا با اضافه کردن فیدبک نیرو، از اندازه گیری شتابها نیز جلو گیری شود. پس با توجه به روابط (۳-۳۳) و (۳-۴۴)، قانون کنترل جدید به این صورت پیشنهاد می شود [۸]:

$$\boldsymbol{\tau}_{R} = \mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\left[\ddot{\mathbf{x}}_{eq} - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}\right] + \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F}$$
(°Δ-°)

لازم به ذکر است که در این روش، مسیر مرجع \mathbf{x}_r باید به گونهای طراحی شود که تا دو مرتبه مشتق پذیر باشد و دسترسی به \mathbf{q} ، \mathbf{x} ، \mathbf{x} و \mathbf{F} برای محاسبه قانون کنترل (۳-۴۵) الزامی است. شکل ۳-۱۹ حلقه کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل نیرو را نشان میدهد.



شكل ۳-۱۹ : حلقه كنترل امپدانس بر مبناى خطاى مدل نيرو (حلقه بسته)

معمولاً در تحقیقاتی که صرفاً رویکردی نوآورانه به مدل امپدانس مطلوب دارند، فرض را بر این می-گذارند که عدمقطعیتی وجود ندارد و اثرات غیرخطی ربات کاملاً حذف می شود [۷, ۸, ۱۱, ۱۴, ۱۵, ۱۷, ۲۲]. اما بر همگان روشن است که هیچ مدلی نمی تواند قطعیت کامل داشته باشد. بنابراین، اگر مدل دینامیکی ربات مشخص نباشد، قانون کنترل (۳-۴۵) براساس مدل نامی بصورت زیر خواهد بود:

فصل ٣: كنترل امپدانس

$$\boldsymbol{\tau}_{R} = \overline{\mathbf{D}}(\mathbf{q})\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\left[\ddot{\mathbf{x}}_{eq} - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}\right] + \overline{\mathbf{C}}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \overline{\mathbf{g}}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F}$$
(48-7)

که در آن $\overline{\mathbf{C}}$ ، $\overline{\mathbf{D}}$ و $\overline{\mathbf{C}}$ ، $\overline{\mathbf{D}}$ و (۳-۳) و (۳-۴۹) و (۳-۹۹) معادله حلقه بسته بصورت زیر بدست میآید:

$$\mathbf{M}_{R} \Delta \ddot{\mathbf{x}}_{r} + \mathbf{B}_{R} \Delta \dot{\mathbf{x}}_{r} + \mathbf{K}_{R} \Delta \mathbf{x}_{r} = \mathbf{F} + \mathbf{e}_{f}$$
(۴۷-۳)

که در آن
$$\mathbf{x}_r = \mathbf{x}_r - \mathbf{x}$$
 و خطای \mathbf{e}_f بخاطر عدمقطعیتهای موجود بصورت زیر میباشد:
 $\mathbf{e}_f = \mathbf{M}_R \mathbf{J}(\mathbf{q}) \overline{\mathbf{D}}^{-1}(\mathbf{q}) \Big[(\mathbf{D} - \overline{\mathbf{D}}) \ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{C} - \overline{\mathbf{C}}) \dot{\mathbf{q}} + (\mathbf{g} - \overline{\mathbf{g}}) \Big]$ (۴۸-۳)

بنابراین از رابطه (۳-۴۷) نتیجه میشود که وجود عدمقطعیت مستقیماً در پیادهسازی امپدانس مطلوب ایجاد اختلال میکند. هدف کنترل کننده امپدانس باید حذف گشتاور ناشی از عدمقطعیتهای موجود (τ_u) باشد یا بعبارت دیگر، باید **I** هود (شکل ۳-۱۹). از این رو، غالب مقالات به روشهای مقاوم روی آوردهاند.

یکی از روشهای محبوب مقاوم در کنترل امپدانس، روش تخمین تأخیر زمانی است [۱۹, ۲۰, ۲۳]،
زیرا در عین سادگی و حجم محاسبات نسبتاً کم، در جبران عدمقطعیتها موفق عمل می کند [۲۹].
اما در این روش، علاوه بر پسخوردهای لازم برای قانون کنترل (۳-۴۵)، شتاب مفاصل
$$\ddot{\mathbf{q}}$$
 و گشتاور
اعمالشده \mathbf{r}_R نیز باید اندازه گیری شوند. همین محدودیتهای عملی روش تخمین تأخیر زمانی،
می تواند طراحان را به سمت روشهای دیگر سوق دهد.

در روش مقاوم دیگری از کنترل تناسبی-انتگرالی جهت تخمین استفاده شده است [۲۴, ۲۵]. در [۲۶] بر مبنای روش مود لغزشی، کنترل کنندهای مقاوم برای اجرای امپدانس مطلوب ارائه شده است. این روش، تنها برای امپدانس مرتبه ۱ زیر قابل استفاده است:

$$\mathbf{B}_{R}\left(\dot{\mathbf{x}}_{r}-\dot{\mathbf{x}}\right)+\mathbf{K}_{R}(\mathbf{x}_{r}-\mathbf{x})=\mathbf{F}$$
(۴۹-۳)

از طرفی، مشتق نیروی تماس $\dot{\mathbf{F}}$ به ناچار در محاسبات وارد می شود و از آنجا که اندازه گیری نیرو معمولاً به نویز آلوده است، این روش از نظر عملی دچار اشکال خواهد شد. یک روش جایگزین که هم مقاوم باشد و هم نیازی به اندازه گیری های فراوان نداشته باشد، می تواند کنترل ساختار متغیر جهت

فصل ٣: كنترل امپدانس

رسیدن به مدل^{۱۲} میباشد [۲۸, ۲۷, ۲۸]. در این روش، به غیر از \mathbf{p} , \mathbf{k} , \mathbf{k} , \mathbf{q} \mathbf{r} نیاز به اندازه-گیری دیگری نبوده و تضمین میکند که امپدانس مطلوب (۳-۳۸) را برای ربات محقق کند. اما خود اندازه گیری \mathbf{x} مسئله ساز است و اندازه گیری آن بصورت مستقیم امکان پذیر نیست و استفاده از مشتق گیر نیز مشکل تقویت نویز را به همراه دارد. از طرف دیگر، در هیچکدام از روش هایی که تاکنون بر مبنای خطای مدل نیرو \mathbf{e}_f ارائه شدهاند، از عدم قطعیت سینماتیکی (ماتریس ژاکوبین) صحبتی به میان نیامده و معلوم فرض شده است. در صورتی که در [۴۵] نشان داده شده است که نقص مدل سینماتیک تأثیر مخرب زیادی در عملکرد کنترل در فضای کار دارد.

همچنین روش کنترل ساختار متغیر در اجرای مدلهای امپدانس دیگر محدودیت دارد و برای هر کدام نیاز به تعریف جدیدی از جبرانساز و سطح لغزش دارد. همانطور که در بخش (۳–۵–۱) نشان داده شد، امپدانس تعمیمیافته به امپدانس مرسوم از نظر عملکرد حلقه بسته برتری دارد. روش کنترل ساختار متغیر نیز در پیادهسازی امپدانس تعمیمیافته مجبور به استفاده از مشتق نیرو است. بنابراین در مقالاتی که این مدل را مبنای کار قرار دادهاند از قسمت مشتق نیروی تماس $\dot{\mathbf{F}}$ صرفنظر شده است تا با مسئله تقویت نویز در اندازه گیری نیرو روبرو نشوند [۱۴–۱۶].

با توجه به این نقائص، لزوم وجود روشی برای به اجرا گذاشتن امپدانسهای مختلف احساس می شود. نیاز به کنترل امپدانس رباتهای صنعتی که مجهز به کنترل موقعیت هستند، منجر به روش کنترل امپدانس بر مبنای موقعیت شد [۱] که در این پایاننامه آنرا در دسته کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت طبقهبندی کردهایم.

۳-۶-۱-۲) کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت جرقه ایده کنترل امپدانس مبتنی بر موقعیت زمانی زده شد که قصد داشتند کنترل امپدانس را بر روی رباتهای صنعتی به اجرا گذارند، زیرا رباتهای صنعتی مجهز به تجهیزات سرو^{۱۳} بوده و جهت

¹² Variable Structure Model Reaching Control (VSRMC)

 $^{^{\}rm 13}\,{\rm servo}$ mechanism

ردگیری مسیر مطلوب طراحی شدهاند [۱]. در این رویکرد، مدل امپدانس که در حلقه خارجی قرار \mathbf{F} می گیرد، موقعیت بر اساس میزان نیروی تماس \mathbf{F} می گیرد، موقعیت بر اساس میزان نیروی تماس فراهم می کند. بر این اساس، مدل امپدانس مطلوب (۳–۳۸) برای طراحی مبتنی بر خطای مدل موقعیت باید بصورت زیر بازنویسی شود:

$$\mathbf{M}_{R}\left(\ddot{\mathbf{x}}_{r}-\ddot{\mathbf{x}}_{d}\right)+\mathbf{B}_{R}\left(\dot{\mathbf{x}}_{r}-\dot{\mathbf{x}}_{d}\right)+\mathbf{K}_{R}\left(\mathbf{x}_{r}-\mathbf{x}_{d}\right)=\mathbf{F}$$
($\Delta \cdot -\mathbf{v}$)

که در آن \mathbf{x}_d میکند. اختلاف موقعیت مطلوب $\Delta \mathbf{x}_d(0) = \mathbf{x}_r(0) - \mathbf{x}(0)$ به ازای شرایط اولیه (۵۰- $\mathbf{x}_d(0) = \mathbf{x}_r(0) - \mathbf{x}_d$ $\Delta \mathbf{x}_d(0) = \mathbf{x}_r - \mathbf{x}_d$ $\Delta \mathbf{x}_d(0) = \mathbf{x}_r(0) - \mathbf{x}(0)$ محاسبه شده و سپس موقعیت مطلوب امپدانس از $\mathbf{x}_d = \mathbf{x}_r - \Delta \mathbf{x}_d$

این ایده اگرچه برای رباتهای صنعتی ارائه شد، اما توانست جای خود را بعنوان یکی از روشهای اصلی کنترل امپدانس پیدا کند، زیرا براحتی قابل تعمیم بوده و میتوان کنترل امپدانس را مستقل از نوع مدل امپدانس انتخاب شده به اجرا گذاشت.

برای رباتهایی که مجهز به کنترل کننده موقعیت در فضای مفصلی هستند، لازم است سینماتیک معکوس ربات نیز محاسبه شود تا موقعیت مطلوب در فضای مفصلی \mathbf{q}_d بدست آید [۳۳, ۳۴] (شکل -۳-۲۰).



شکل ۳-۲۰: کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت در فضای مفصلی

اما در کنترل موقعیت در فضای مفصلی، موقعیت مجری نهایی در فضای کار x اندازه گیری نمی شود.

بنابراین کوچکترین نقص در تبدیل سینماتیک معکوس، توسط کنترلکننده جبران نمی شود. از طرفی، برای جلوگیری از محاسبات سینماتیک معکوس، طراحان به سمت کنترل موقعیت در فضای کار می روند که در آن تبدیل سینماتیک (ماتریس ژاکوبین) به داخل حلقه کنترل موقعیت منتقل می-شود (شکل ۳-۲۱).



شکل ۲۱-۳ : کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت در فضای کار

هدف کنترل موقعیت غلبه بر عدمقطعیتهای τ_u و تحقق $\mathbf{G}_c = \mathbf{I}$ است. بعبارت دیگر، ردگیری موقعیت مطلوب \mathbf{x}_d باید کامل صورت گیرد تا امپدانس مطلوب تحقق یابد. یکی از مزایای این روش، آزادی در انتخاب نوع کنترل کننده موقعیت برای حلقه داخلی است. بطور مثال، برای معادلات ربات (۳۹-۳) می توان کنترل زیر را ارائه کرد [۵۶]:

$$\boldsymbol{\tau}_{R} = \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_{eq} + \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F}$$
(2)-7)

که در آن:

$$\ddot{\mathbf{q}}_{eq} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \Big[\ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}_v \left(\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}} \right) + \mathbf{K}_p \left(\mathbf{x}_d - \mathbf{x} \right) \Big]$$
(27-7)

و ماتریسهای بهره $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_v \in \mathbb{R}^{m imes m}$ و ماتریسهای بهره (۳-۵۱) و (۵۱-۵۱) معادله حلقه بسته بصورت زیر بدست میآید:

$$\ddot{\mathbf{e}}_{p} + \mathbf{K}_{v}\dot{\mathbf{e}}_{p} + \mathbf{K}_{p}\mathbf{e}_{p} = \mathbf{0} \tag{\Delta V-V}$$

$$\mathbf{e}_p \triangleq \mathbf{x}_d - \mathbf{x} \tag{(\Delta Y-Y)}$$

$oldsymbol{\sigma} riangleq \dot{f e}_p^{} + oldsymbol{\Lambda} oldsymbol{e}_p^{}$	(۵۸-۳)
	سرعت و شتاب معادل $\dot{\mathbf{x}}_{eq}$ و $\dot{\mathbf{x}}_{eq}$ نیز بدین صورت بدست میآید:
$\dot{\mathbf{x}}_{eq} = \mathbf{\sigma} - \dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{\Lambda} \mathbf{e}$	(۵۹-۳)
$\ddot{\mathbf{x}}_{_{eq}}=\ddot{\mathbf{x}}_{_{d}}+\mathbf{\Lambda}\dot{\mathbf{e}}$	(۶۰-۳)
ع ادلات فضای کار (۳-۴۰) بصورت	یا بوره گرفتن از روابط فوق، قانون کنترل تطبیقی امیدانس برای م

با بهره گرفتن از روابط فوق، قانون کنترل تطبیقی امپدانس برای معادلات فضای کار (۳- ۴۰) بصورت زیر ارائه میشود:

$$\boldsymbol{\tau}_{R} = \mathbf{J}^{T}(\mathbf{q}) \Big[\hat{\mathbf{D}}_{x}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{x}}_{eq} + \hat{\mathbf{C}}_{x}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{x}}_{eq} + \hat{\mathbf{g}}_{x}(\mathbf{q}) + \mathbf{F} + \mathbf{K}_{d} \boldsymbol{\sigma} \Big]$$
(81-7)

که در آن $\mathbf{K}_d > \mathbf{0}_x$ و \mathbf{R}_x و $\hat{\mathbf{R}}_x$ و $\hat{\mathbf{g}}_x$ بترتیب معادلهای تخمینزده شده \mathbf{D}_x ، \mathbf{D}_x و \mathbf{g}_x هستند. با توجه به خاصیت ۲-۴، میتوان رابطه زیر را بدست آورد:

$$\hat{\mathbf{D}}_{x}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{x}}_{eq} + \hat{\mathbf{C}}_{x}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{x}}_{eq} + \hat{\mathbf{g}}_{x}(\mathbf{q}) = \mathbf{y}_{D}^{T}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}},\dot{\mathbf{x}}_{eq},\ddot{\mathbf{x}}_{eq})\hat{\mathbf{p}}_{D}$$
(FY-Y)

که در آن $\hat{\mathbf{p}}_D \in \mathbb{R}^{n_d}$ بردار تخمینزده شده پارامترهای دینامیکی ربات \mathbf{p}_D را نشان میدهد. ماتریس $\mathbf{y}_D(\bullet) \in \mathbb{R}^{n_d imes m}$ نیز ماتریس رگرسور دینامیکی نامیده میشود. با پیشنهاد تابع لیاپانوف بصورت زیر:

$$V = \frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma}^{T}\mathbf{D}_{x}\boldsymbol{\sigma} + \Delta\mathbf{p}_{D}^{T}\mathbf{Q}_{D}^{-1}\Delta\mathbf{p}_{D}$$
(۶٣-٣)

که در آن $\Delta \mathbf{p}_D = \mathbf{p}_D - \hat{\mathbf{p}}_D$ و $\mathbf{Q}_D \in \mathbb{R}^{n_d imes n_d}$ یک ماتریس معینمثبت میباشد، و با در نظر گرفتن قانون تطبیق زیر:

$$\dot{\hat{\mathbf{p}}}_{D} = \mathbf{Q}_{D} \mathbf{y}_{D}^{T} (\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{x}}_{eq}, \ddot{\mathbf{x}}_{eq}) \boldsymbol{\sigma}$$
(۶۴-۳)

نشان داده می شود که σ به صفر میل خواهد کرد. با رسیدن به حالت لغزش طبق رابطه (۵۸-۳)، خطای \mathbf{e}_p و مشتق آن نیز بصورت نمایی به صفر متمایل خواهند شد و امپدانس مطلوب (۳-۳۸) محقق می شود [۳۵].

در روش تطبیقی ارائه شده، لازم است که ساختار کلی دینامیکهای ربات معلوم باشد، زیرا تنها

پارامترهای دینامیکی نامعلوم از طریق قوانین تطبیق تخمین زده میشوند. از این رو، عدمقطعیتهای ناشی از دینامیکهای مدل نشده و اغتشاش خارجی از این طریق جبران نمی شوند و در عملکرد حلقه کنترل اختلال ایجاد می کنند. بنابراین اگر ماتریس رگرسور (•) $\mathbf{y}_D(\bullet)$ در اختیار نباشد، کنترل تطبیقی بر مبنای روش تقریب تابع می تواند مورد استفاده قرار گیرد [۲۱]. این روش، رویکرد آزاد از رگرسور نیز نامیده می شود. ایده اصلی، بر مبنای بسط تابع بر حسب پایههای متعامد یکه قرار دارد که می توان تابعی مانند f(t). را در بازه f(t).

$$f(t) = \sum_{i=1}^{+\infty} w_i \phi_i(t) \tag{$2-$``}$$

که در آن $\phi_i(t)$ بیانگر پایه متعامد یکه و w_i وزن متناظر با آن است. از رابطه (۳-۶۵) به سری فوریه تعمیمیافته یاد میشود. به همین ترتیب، برای دینامیکهای سیستم رباتیک، همانند هر تابعی، می-توان بر مبنای سری فوریه تعمیمیافته تقریب زیر را ارائه نمود:

$$f(t) \approx \sum_{i=1}^{n_f} w_i \phi_i(t) = \mathbf{w}_f^T \mathbf{\Phi}_f(t)$$
(99-T)

که در آن $\begin{bmatrix} T \\ r_{n_{r_{f}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{1} & \cdots & w_{n_{f}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{1} & \cdots & w_{n_{f}} \end{bmatrix} = \int \phi$ بردار پایههای متعامد یکه را تشکیل می دهند. بردار وزنها می توانند با استفاده از قوانین تطبیق بدست آیند. در کتاب [۵۷]، روش تقریب توابع آزاد از رگرسور بصورت کامل شرح داده شده است و به معرفی انتخابهای متنوعی از توابع متعامد پایه پرداخته است. مقاله [۲۱]، برای ربات دو رابط (m = 2 = m = n) از سری فوریه بهره گرفته است و برای هر کدام از درایههای ماتریسهای x, D_x و x و x و (m-1)، ۲۱ جمله اول سری فوریه را در نظر گرفته است که در کل ۲۰۱۰ پارامتر تطبیقی باید محاسبه شوند. این در حالی است که در صورت محاسبه ماتریس رگرسورهای (v_D) برای ربات دو رابط، تنها به ۸ پارامتر جهت تخمین نیاز است (بخش۴–۴–۱). حجم بالای محاسبات در روش تقریب تابع یکی از موانع اصلی بر سر [۳۷]. برای حل این عیب، در [۳۸] روشی برای کنترل موقعیت ربات در فضای مفصلی ارائه شده است که کل عدم قطعیتها با هم تقریب زده می شوند اما برای استفاده از آن در کنترل فضای کار و کنترل امپدانس، نیاز به تغییرات بیشتری دارد.

تا جایی که مقالات مورد بررسی قرار گرفتهاند، در تمام روشهایی که برای کنترل امپدانس ارائه شده-اند، عدم قطعیت ژاکوبین (J(q) (عدم قطعیت سینماتیکی) در نظر گرفته نشده است. عدم قطعیت ژاکوبین بصورت پارامتری است. اما از آنجا که در کنترل فضای کار، بعنوان ماتریس تبدیل ورودی ظاهر میشود، ارائه روش تطبیقی برای آن مسئلهساز است.

تاکنون روشهای متنوعی برای کنترل تطبیقی ربات در فضای کار با در نظر گرفتن عدم قطعیت سینماتیکی ارائه شده است اما این روشها هیچ کدام برای کنترل امپدانس مورد استفاده قرار نگرفته-اند. بنابراین مرور مقالات این حوزه را به فصل ۴ :موکول میکنیم.

- -) راهبرد كنترل ولتاژ

راهبرد کنترل گشتاور، همانطور که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت، مستقیماً به محاسبه گشتاور کنترل می پردازد و از این رو درگیر شدن با مدل دینامیکی ربات، اجتناب ناپذیر است. مدل دینامیکی ربات، پیچیده، حجیم، غیر خطی و با تزویج همراه است و قانون کنترل گشتاور محتاج محاسبات سنگین و طولانی است. از طرفی گشتاور محاسبه شده، ناچاراً از طریق محرکهها باید به مفاصل اعمال شود. بنابراین لحاظ کردن دینامیک محرکهها نیز ضروری است. در رباتهای مجهز به معرکههای الکتریکی، جریان موتورها متناسب با گشتاور مفاصل است. در راهبرد کنترل گشتاور که برای رباتهای با محرکههای الکتریکی ارائه می شود، کل سیستم رباتیک را مرتبه ۲ فرض می کنند و گشتاور لازم را بصورت کنترل جریان یا کنترل ولتاژ تولید می کنند [۲] یا قانون کنترل را برای سیستم مرتبه ۳ با ورودی ولتاژ به سیستم اعمال می کنند [۳۷].

اما با مطرح شدن راهبرد کنترل ولتاژ [۳۹]، محاسبات قانون کنترل به طرز چشمگیری برای رباتهای الکتریکی با محرکههای موتور DC کاهش مییابد. ایده اصلی بر این حقیقت گذاشته شده است که

گشتاور ناشی از دینامیکهای مکانیکی در جریان موتور نمایان میشود (مطابق رابطه اول (۲-۳۱۳)).
بنابراین گشتاورهای ناشی از دینامیک ربات را میتوان بعنوان اغتشاش (بار) در نظر گرفت. همانطور
که در رابطه دوم (۲-۳۱) ارائه شد، داریم:

$$L\dot{I}_a + RI_a + K_b r^{-1} \dot{q} = u$$
(۶۷-۳)
عبارت $L\dot{I}_a + RI_a + K_b r^{-1} \dot{q} = u$
(۶۷-۳)
عبارت $L\dot{I}_a + RI_a + K_b r^{-1} \dot{q}_{cd}$
(۶۷-۳)
قابل حذف است. بعبارت دیگر، قانون کنترل زیر بر مبنای خطیسازی پسخوردی میتواند به (۳-۹۲)
اعمال شود:
 $u = L\dot{I}_a + RI_a + K_b r^{-1} \dot{q}_{cq}$
(۶۸-۳)
که در آن $R = RI_a + K_b r^{-1} \dot{q}_{cq}$
(۶۸-۳)
که در آن $R = \frac{1}{2}$ سرعت فرمانی است که بر حسب کاربرد میتواند برای مفاصل محاسبه شود.
 $K_b r^{-1} (\dot{q}_{cq} - \dot{q}) = 0$
(۶۹-۳) بصورت زیر بدست میآید:
 $K_b r^{-1} (\dot{q}_{cq} - \dot{q}) = 0$
(۶۹-۳)
همانطور که مشهود است معادلات (۳-۹۶) و (۳-۹۶) بصورت غیرمتمرکز، خطی، کم حجم و از مرتبه
(۶۹-۳) میتند و بخاطر سادگی قانون کنترل (۳-۹۸)، محاسبات نیز سریع انجام میشود. با توجه به نتایج
ارائه شده در [۳۹]، ردگیری در این روش بسیار کارآمدتر از روش کنترل گشتاور در فضای مفصلی
است.



شکل ۳-۲۲ : حلقه کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت با راهبرد کنترل ولتاژ در فضای مفصلی

تاکنون کنترل کنندههای موقعیت متنوعی در فضای مفصلی با راهبرد کنترل ولتاژ ارائه شدهاند که
میتوان به کنترل مقاوم با تقریب فازی تطبیقی عدمقطعیت [۴۱]، کنترل فازی ریز-تنظیم [۴۳]،
کنترل فازی مقاوم دقیق [۳۳]، کنترل فازی تطبیقی مستقیم غیرمتمرکز [۴۴] اشاره کرد. این روش-
ها با فرض قطعیت مدل سینماتیک، گزینههای بسیار مناسبی برای کنترل امپدانس بر مبنای خطای
مدل موقعیت در فضای مفصلی هستند (شکل ۳-۲۲).
اما در حضور عدم قطعیتهای سینماتیکی نمیتوان از این روشها استفاده کرد، چرا که تبدیل
معکوس
$$_{x}$$
 به $_{p}$ درست انجام نخواهد شد. از این رو باید به سراغ کنترل در فضای کار رفت.
با استفاده از رابطه سینماتیک سرعت معکوس (۲-۹) داریم :
 $\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{x}$ (۷۰-۳)
که با جایگذاری (۳-۲۰) در معادلات دینامیک الکتریکی (۳-۹۷) خواهیم داشت:
 $\dot{L}a + RI_{a} + K_{b}r^{-1}J^{-1}(q)\dot{x} = u$ (۷۱-۳)
این معادلات، بر اساس طراحی کنترل کنندههای موقعیت در فضای کار را تشکیل میدهند.
 $Error - 7$ (۲۰-۳)
 $R_{r}(\dot{x}_{r} - \dot{x}) + K_{R}(x_{r} - x) = F$
در (۲۰۳)
 $R_{r}(\dot{x}_{r} - \dot{x})$, قانون کنترل ولتاژ زیر پیشنهاد شده است:

$$\mathbf{u} = \mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_{a} + \mathbf{R}\mathbf{I}_{a} + \mathbf{K}_{b}\mathbf{r}^{-1}\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\Big[\dot{\mathbf{x}}_{r} + \mathbf{B}_{R}^{-1}\mathbf{K}_{R}\big(\mathbf{x}_{r} - \mathbf{x}\big) - \mathbf{B}_{R}^{-1}\mathbf{F}\Big]$$
(YT-T)

که با جایگذاری (۳–۷۳) در (۷۳–۷۱)، خطای مدل نیرو مساوی صفر و امپدانس مطلوب محقق می شود. همانطور که از قانون کنترل (۳–۷۲) بر می آید، در روش کنترل امپدانس با راهبرد کنترل ولتاژ، به اندازه گیری های I_a ، I_a ، I و F نیاز است و مشتق نیروی F در آن ظاهر نخواهد شد. محاسبات قانون کنترل ولتاژ (۳–۲۷) بسیار سادهتر و کم حجمتر از قانون کنترل گشتاور (۳–۴۵) می-باشد. علاوه بر آن، تمام دینامیکهای مکانیکی شامل: گشتاورهای ناشی از دینامیک ربات، گشتاورهای \mathbf{I}_a ناشی از نیروی وارد بر مجری نهایی و هر اغتشاش دیگری از جنس مکانیکی، در جریان موتور \mathbf{J}_a ناشی از نیروی و قابل حذف است. بنابراین قانون کنترل ولتاژ، ذاتاً نسبت به دینامیکهای مکانیکی مقاوم است و از این جهت بر قانون کنترل گشتاور برتری دارد.

اما اگر در (۳-۷۱) دینامیکهای موتور نامشخص باشد و از اندوکتانس آرمیچر نیز به دلیل کوچکی صرفنظر شود، رابطه (۳-۷۳) باید بدین صورت نوشته شود:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{R}}\mathbf{I}_a + \bar{\mathbf{K}}_b \bar{\mathbf{r}}^{-1} \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \Big[\dot{\mathbf{x}}_r + \mathbf{B}_R^{-1} \mathbf{K}_R \Delta \mathbf{x}_r - \mathbf{B}_R^{-1} \mathbf{F} \Big]$$
(YF-Y)

 ${f R}$ که در آن ${f R}_r={f x}_r-{f x}_r$ و ${f \overline R}$ به ترتیب مقادیر نامی و معلوم برای ماتریسهای ${f R}_r$ ، ${f R}$ و ${f x}_r={f x}_r-{f x}_r$ و ${f x}_r$ هستند. اضافه شدن عدم قطعیت ژاکوبین، قانون کنترل امپدانس (۳-۷۴) را بدین صورت ${f K}_b$

$$\mathbf{u} = \overline{\mathbf{R}} \mathbf{I}_a + \overline{\mathbf{K}}_b \overline{\mathbf{r}}^{-1} \overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}) \Big[\dot{\mathbf{x}}_r + \mathbf{B}_R^{-1} \mathbf{K}_R \Delta \mathbf{x}_r - \mathbf{B}_R^{-1} \mathbf{F} \Big]$$
(YΔ-Y)

که در آن $\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})$ ماتریس ژاکوبین نامی است. در این صورت خطای \mathbf{e}_f بدین صورت محاسبه میشود: $\mathbf{e}_f = \overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\overline{\mathbf{r}}\overline{\mathbf{K}}_b^{-1} \Big[\mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_a + \Big(\mathbf{R} - \overline{\mathbf{R}}\Big)\mathbf{I}_a + \Big(\mathbf{K}_b\mathbf{r}^{-1}\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) - \overline{\mathbf{K}}_b\overline{\mathbf{r}}^{-1}\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q})\Big)\dot{\mathbf{x}} \Big]$ (۷۶-۳)



شکل ۳-۲۳ : حلقه کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت با راهبرد کنترل ولتاژ در فضای کار

۲-۶-۲) کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت تاکنون روشی برای کنترل امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت با راهبرد کنترل ولتاژ ارائه نشده است. تنها یک کنترل کننده مقاوم برای کنترل موقعیت در فضای کار بار در نظر گرفتن همه عدم قطعیتها، از جمله عدم قطعیت سینماتیکی معرفی شده است. در [۴۷] بر مبنای روش تخمین تأخیر زمانی و در نظر گرفتن ژاکوبین تقریبی، به طراحی کنترل کننده موقعیت مقاوم در فضای کار پرداخته است. در این روش، فقط به اندازه گیریهای x، q و x نیاز است و برای محاسبه قانون کنترل نیازی به جریان موتورها یا ولتاژ ندارد. این کنترل کننده در عین سادگی بسیار کارآمد است و نسبت به بسیاری از قانونهای کنترل گشتاور ارجحیت دارد. اما وابستگی آن به سرعت مجری نهایی x که دسترسی به آن چالش برانگیز است، از نواقص آن محسوب می شود.

هدف این پایاننامه، طراحی یک کنترل کننده تطبیقی است که با راهبرد کنترل ولتاژ بر عدم قطعیت-های دینامیکی و سینماتیکی فائق آید و کنترل امپدانس مبتنی بر خطای مدل موقعیت را به شکلی مؤثرتر از روشهای ارائه شده قبلی به اجرا گذارد. همچنین سعی بر این است که قانون کنترل، بر مبنای اندازه گیریهای در دسترس باشد.

از آنجا که در این پایاننامه، مدل امپدانس تعمیمیافته مبنای مقایسه روشها در کنترل امپدانس مبتنی بر خطای مدل موقعیت قرار می گیرد، لازم است مروری بر نحوه تحقق امپدانس تعمیمیافته داشته باشیم.

-) تحقق اميدانس تعميم يافته

به منظور اجرای امپدانس بر مبنای خطای مدل موقعیت باید معادلات دیفرانسیل مدل امپدانس مدل امپدانس $\Delta \dot{\mathbf{x}}_d(0) = \dot{\mathbf{x}}_r(0) - \dot{\mathbf{x}}(0)$, $\Delta \mathbf{x}_d(0) = \mathbf{x}_r(0) - \mathbf{x}(0)$ و $\mathbf{x}_a \mathbf{x}_a$ یافته (۲۸-۳) به ازای شرایط اولیه $\mathbf{x}_a(0) = \mathbf{x}_r(0) - \mathbf{x}_a(0) = \mathbf{x}_r(0)$ و $\mathbf{F}(0)$ حل شده و مسیر مطلوب امپدانس برای حلقه کنترل داخلی موقعیت تولید شود. مدل امپدانس تعمیمیافته، به دو صورت، قابل تحقق است:

- به کمک مشتق گیری از نیرو
 - ۲) بدون مشتق گیری از نیرو

- -) تحقق با مشتق گیری از نیرو در صورت نیاز به تولید مسیر مطلوب تا مشتق دوم (یعنی x_d ، x_d و x_d)، ملزم به استفاده از مشتق نیرو جهت تحقق هستیم. نمودار بلوکی این تحقق در شکل ۳-۲۴ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۳-۲۴ : تحقق امپدانس تعمیم یافته با مشتق گیری از نیرو

اگرچه این تحقق از نظر محاسبات ساده است ولی مشتق گیری از نیرو، مشکل تقویت نویز را نیز به همراه دارد که به شدت خود را در شتاب مطلوب $\ddot{\mathbf{x}}_d$ نشان خواهد داد. از این رو در کاربردهای عملی امپدانس تعمیمیافته به امپدانس تعمیمیافته از مشتق نیرو استفاده نمی کنند که باعث تقلیل مدل امپدانس تعمیمیافته به مدل امپدانس مرسوم می گردد.

- -) تحقق بدون مشتق گیری از نیرو

در شرایطی که تنها به مسیر مطلوب تا مشتق اول آن (\mathbf{x}_d و \mathbf{x}_d) نیاز باشد، میتوان امپدانس تعمیم-یافته را بدون مشتق گیری تحقق داد. بدین منظور کافیست که تحقق کانونیکان کنترل پذیر معادلات (۲۸-۳) را بدست آوریم:

$$\begin{split} \dot{\mathbf{w}}_z &= \mathbf{A}_z \mathbf{w}_z + \mathbf{B}_z \mathbf{u}_z \\ \mathbf{y}_z &= \mathbf{C}_z \mathbf{w}_z + \mathbf{D}_z \mathbf{u}_z + \mathbf{u}_r \end{split}$$
(۷۷-۳)
ع $\mathbf{u}_r \in \mathbb{R}^{2m}$ و $\mathbf{u}_z \in \mathbb{R}^m$ ورودی های $\mathbf{y}_z \in \mathbb{R}^{2m}$ ، $\mathbf{w}_z \in \mathbb{R}^{2m}$ و $\mathbf{u}_z \in \mathbb{R}^m$ of \mathbf{u}_z - be constructed by $\mathbf{U}_z = \mathbf{U}_z = \mathbf{U}_z$, $\mathbf{U}_z \in \mathbb{R}^{2m \times 2m}$, $\mathbf{U}_z \in \mathbb{R}^{2m \times 2m}$ of $\mathbf{U}_z = \mathbf{U}_z$, \mathbf{U}_z , $\mathbf{U}_z = \mathbf{U}_z$, \mathbf{U}_z ,

$$\mathbf{M}_{R}\ddot{\mathbf{w}} + \mathbf{B}_{R}\dot{\mathbf{w}} + \mathbf{K}_{R}\mathbf{w} = \mathbf{F}$$
(Y٩-٣)

شرایط اولیه $\mathbf{w}(0)$ و $\mathbf{w}(0)$ نیز از رابطه خروجی (۳-۷۷) قابل محاسبه است:

$$\mathbf{w}_{z}(0) = \begin{bmatrix} \mathbf{w}(0) \\ \dot{\mathbf{w}}(0) \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{z}^{-1} \left(\mathbf{y}_{z}(0) - \mathbf{u}_{r}(0) - \mathbf{D}_{z}\mathbf{u}_{z}(0) \right)$$
(A·-Ÿ)

که در آن $\mathbf{y}_z(0)$ ، $\mathbf{u}_z(0)$ و $\mathbf{u}_z(0)$ بصورت زیر میباشند:

$$\mathbf{y}_{z}(0) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(0) \\ \dot{\mathbf{x}}(0) \end{bmatrix} , \qquad \mathbf{u}_{r}(0) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{r}(0) \\ \dot{\mathbf{x}}_{r}(0) \end{bmatrix} , \qquad \mathbf{u}_{z}(0) = \mathbf{F}(0)$$
(A1-7)

لازم به ذکر است که در (۳-۸۰)، \mathbf{C}_z تنها با شرط رؤیت پذیری، معکوس پذیر است، بعبارت دیگر، در امپدانس $Z_R(s)$ نباید حذف صفر و قطب رخ دهد. نمودار بلوکی این تحقق را میتوان در شکل ۳-۲۵ مشاهده نمود.



شكل ٣-٢٥ : تحقق كانونيكال كنترل پذير امپدانس تعميم يافته



-) مقدمه

برای انجام کارهای مختلف، ابزارهای متنوعی برای بازوی رباتیک طراحی میشود. هر ابزار، مدل دینامیکی و سینماتیکی خاص خود را داراست و دینامیک و سینماتیک بازو را تغییر میدهد. بنابراین در حضور عدم قطعیتها، روشهای مبتنی بر مدل کارایی لازم را نخواهند داشت. در بخش (۳-۶)، روشهای کنترل مقاوم و تطبیقی امپدانس جهت غلبه بر عدم قطعیتهای دینامیکی مورد بررسی قرار گرفتند که در هیچ کدام، از عدم قطعیتهای سینماتیکی و ماتریس ژاکوبین صحبتی به میان نیامده است. این بدین معنی است که پارامترهایی مانند طول رابطها، انحراف مفاصل^۱ و همچنین طول ابزار مشخص است اما متأسفانه هیچ پارامتر فیزیکیای را نمیتوان دقیقاً بدست آورد. پس در حضور عدم

در [۴۵, ۴۵] روشهای کنترلی جهت تنظیم موقعیت مجری نهایی در فضای کار بر مبنای ماتریس ژاکوبین تقریبی ارائه شده است. اما این کنترلکنندهها صرفاً برای کنترل تنظیم مناسب هستند. بنابراین در [۴۸] جهت حل مسئله عدم قطعیت سینماتیک و دینامیک بازو، از روش ژاکوبین تطبیقی استفاده کرده است. روش مورد استفاده در [۴۸] جهت تطبیق پارامترهای سینماتیکی، مورد توجه بسیاری از تحقیقات بعدی قرار گرفته و برای کاربردهای مختلف استفاده شده است.

این روش در [۴۹] به بازوهای رباتیک مجهز به موتورهای الکتریکی تعمیم داده شده است تا عدم-قطعیتهای پارامتری در دینامیک بازو و موتورها و همچنین سینماتیک ربات را مرتفع سازد.

روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور قرار دارد و میتواند روش مناسبی برای اجرای کنترل امپدانس مبتنی بر خطای مدل موقعیت باشد. بنابراین در این فصل، به توصیف دقیق این روش خواهیم پرداخت.

همانطور که در بخش (۳-۶-۲-۲) گفته شد، تاکنون روشی تطبیقی جهت غلبه بر عدم قطعیت سینماتیکی با راهبرد کنترل ولتاژ ارائه نشده است. بنابراین، در انتهای این فصل، روش طراحی

¹ joint offsets

کنترل کنندهای تطبیقی مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ معرفی شده و با روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی مقایسه خواهد شد.

-) راهبرد کنترل گشتاور

- -) کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی در [۴۹]، معادلات (۲-۳۵) مبنای طراحی سیستم کنترل تطبیقی قرار میگیرند با این تفاوت که نیروی عکسالعمل محیط در آن لحاظ نمیشود: (۱-۴) $\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{B} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{H}_{a}\mathbf{u}$ که در آن u ولتاژ موتورها و $\mathbf{H}_{a} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ماتریس انتقال قطری است که ولتاژ u را به گشتاور کنترل تبدیل میکند. مطابق رابطه (۲-۵)، سینماتیک سرعت توسط ماتریس ژاکوبین بدین صورت توصیف میشود:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$$
 (7-7)

که مطابق خاصیت ۲-۱، نسبت به پارامترهای سینماتیکی
$$\mathbf{p}_k$$
 خطی است:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{y}_J^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{p}_k \tag{7-4}$$

همچنین، مطابق خاصیت ۲-۴ بخش دینامیک بازو نیز نسبت به پارامترهای دینامیکی \mathbf{p}_D خطی است:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \left(\mathbf{B} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\right)\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{y}_D^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\mathbf{p}_D$$
(f-f)

هدف کنترل موقعیت در فضای کار، ردگیری مسیر مطلوب \mathbf{x}_d است. بنابراین اگر معادلات (۴-۱) با توجه به روابط سینماتیک معکوس (۲-۹) و (۲-۱۰)، به صورت زیر بازنویسی شود:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{x}} + \left(\mathbf{B} + \mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\right)\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{H}_{a}\mathbf{u} \qquad (\Delta-\mathcal{F})$$

در مییابیم که نمیتوان معادلات فوق را بصورت خطی بر حسب پارامترهای سینماتیکی \mathbf{p}_k نوشت، $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})$ نسبت به پارامترهای سینماتیکی خطی نیست. بنابراین کنترل تطبیقی اسلوتین-لی

فصل ۴ : کنترل تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار با عدم قطعیت دینامیکی و سینماتیکی

[۳۶] را نمیتوان بصورت مستقیم برای غلبه بر عدم قطعیتهای دینامیکی و سینماتیکی بکار برد.
عدم قطعیت سینماتیکی منجر به تبدیل ناقص سرعتها میشود و با توجه به (۴-۳) داریم:
(۴-۶)
$$\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_k) \hat{\mathbf{q}} = \mathbf{y}_J^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \hat{\mathbf{p}}_k$$
 ماتریس ژاکوبین تطبیقی و $\hat{\mathbf{x}}$ پارامترهای
که در آن $\hat{\mathbf{x}}$ سرعت فضای کار تخمینی، $(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{p}}_k)$ ماتریس ژاکوبین تطبیقی و $\hat{\mathbf{x}}$ پارامترهای
سینماتیکی تخمینی را معرفی میکند. ایده این روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی در معرفی یک
بردار لغزش تطبیقی بر مبنای سرعت فضای کار تخمینی است که به واسطه آن تطبیق پارامترهای
دینامیکی، سینماتیکی و محرکهها انجام میشود. این سطح لغزش بصورت زیر تعریف میشود:
(۲-۷) $\hat{\mathbf{r}}_{eq} = \hat{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}}_{eq} - \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_k) \hat{\mathbf{q}} - (\mathbf{y}, \mathbf{z})$
که در آن $m \equiv \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} - (\mathbf{y}, \mathbf{z})$
که در آن $m \ge \hat{\mathbf{x}} + \alpha(\mathbf{x}_d - \mathbf{x})$ (۲-۹) نسبت به زمان داریم:
 $\hat{\mathbf{x}}_{eq} = \hat{\mathbf{x}}_{eq} - \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}}_{eq} - \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_k) \hat{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_k)$ در آن $\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}$
که در آن $m \ge 1$ میکالر مثبت است. با مشتق گیری از (۴-۹) نسبت به زمان داریم:
 $\hat{\mathbf{x}}_{eq} = \hat{\mathbf{x}} + \alpha(\mathbf{x}_d - \mathbf{x})$ (۹-۹) نسبت به زمان داریم:
 $\hat{\mathbf{x}}_{eq} = \hat{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf$

و با توجه به رابطه (۲-۱۰) و (۴-۱۰)، شتاب معادل فضای مفصلی $\dot{\mathbf{q}}_{eg}$ بدست میآید:

$$\ddot{\mathbf{q}}_{eq} = \hat{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_k) \left(\ddot{\mathbf{x}}_{eq} - \dot{\hat{\mathbf{J}}}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_k) \hat{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_k) \dot{\mathbf{x}}_{eq} \right)$$
(1)-4)

بدین ترتیب بردار لغزش تطبیقی در فضای مفصلی و مشتق آن را میتوان بصورت زیر تعریف کرد:

$$\boldsymbol{\sigma} = \dot{\mathbf{q}}_{eq} - \dot{\mathbf{q}} \tag{17-f}$$

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \ddot{\mathbf{q}}_{eq} - \ddot{\mathbf{q}} \tag{17-f}$$

فصل ۴: کنترل تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار با عدم قطعیت دینامیکی و سینماتیکی

از (۲-۴) ، (۲-۴) و (۱۲-۴) رابطه بین $\hat{\sigma}_x$ و σ معلوم می شود:

$$\hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_k)\boldsymbol{\sigma} = \left(\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\hat{\mathbf{x}}}\right) + \alpha \left(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}\right) = \hat{\boldsymbol{\sigma}}_x \tag{14-4}$$

بر این اساس، قانون کنترل بر مبنای ماتریس انتقال تقریبی
$$\overline{\mathbf{H}}_a \in \mathbb{R}^{n imes n}$$
 بصورت زیر ارائه می شود:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{H}}_{a}^{-1} \left[\hat{\mathbf{J}}^{T}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_{k}) \left(\mathbf{K}_{v} \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_{p} \mathbf{e} \right) + \mathbf{y}_{D}^{T}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_{eq}, \ddot{\mathbf{q}}_{eq}) \hat{\mathbf{p}}_{D} + \mathbf{y}_{a}^{T}(\mathbf{u}_{o}) \hat{\mathbf{p}}_{a} \right]$$
(12-4)

که در آن $\mathbf{k}_{d} - \mathbf{x}_{d} - \mathbf{k}_{d} - \mathbf{k}_{d} - \mathbf{k}_{d} - \mathbf{k}_{d}$ ماتریسهای بهره مثبت معین هستند. $\hat{\mathbf{p}}_{D}$ مقدار تخمینی \mathbf{p}_{D} است که بصورت زیر به روز می شود:

$$\dot{\hat{\mathbf{p}}}_{D} = \mathbf{Q}_{D} \mathbf{y}_{D}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_{eq}, \ddot{\mathbf{q}}_{eq}) \boldsymbol{\sigma}$$
(19-4)

و قانون تطبیق پارامترهای سینماتیکی نیز بصورت زیر میباشد:

$$\dot{\hat{\mathbf{p}}}_{k} = -\mathbf{Q}_{k}\mathbf{y}_{J}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \Big(\mathbf{K}_{v}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_{p}\mathbf{e} \Big)$$
(14-4)

در (۱۶-۴) و (۱۷-۴)، ماتریس متقارن
$$\mathbf{Q}_b \in \mathbb{R}^{n_d imes n_d}$$
 و $\mathbf{Q}_k \in \mathbb{R}^{n_k imes n_k}$ معین مثبت هستند. در ماتریس $\{u_{o1} \ \cdots \ u_{on}\}$ بردار $\mathbf{y}_a^T(\mathbf{u}_o) = ext{diag}\{u_{o1} \ \cdots \ u_{on}\}$ بصورت زیر محاسبه می شود:

$$\mathbf{y}_{a}^{T}(\mathbf{u}_{o}) = \mathbf{y}_{D}^{T}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_{eq}, \ddot{\mathbf{q}}_{eq})\hat{\mathbf{p}}_{D} + \hat{\mathbf{J}}^{T}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_{k})\left(\mathbf{K}_{v}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_{p}\mathbf{e}\right)$$
(1λ-۴)

و قانون تطبیق مربوط به محرکه برای به روز کردن بردار
$$\hat{\mathbf{p}}_a \in \mathbb{R}^{n imes n}$$
 بصورت زیر ارائه می شود: $\dot{\hat{\mathbf{p}}}_a = \mathbf{Q}_a \mathbf{y}_a(\mathbf{u}_o) \mathbf{\sigma}$

$$\mathbf{p}_a = Tr\left\{\overline{\mathbf{H}}_a\mathbf{H}_a^{-1} - \mathbf{I}
ight\}$$
 که در آن \mathbf{p}_a ماتریس متقارن معین مثبت و بردار \mathbf{p}_a بصورت $\mathbf{Q}_a \in \mathbb{R}^{n imes n}$ است. با پیشنهاد تابع شبه لیاپانوف بصورت زیر [۴۹]:

$$V = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}^{T} \mathbf{D}(\mathbf{q}) \boldsymbol{\sigma} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{p}_{D}^{T} \mathbf{Q}_{D}^{-1} \Delta \mathbf{p}_{D} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{p}_{a}^{T} \mathbf{Q}_{a}^{-1} \mathbf{H}_{a} \overline{\mathbf{H}}_{a}^{-1} \Delta \mathbf{p}_{a} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{p}_{k}^{T} \mathbf{Q}_{k}^{-1} \Delta \mathbf{p}_{k} + \frac{1}{2} \mathbf{e}^{T} \left(\mathbf{K}_{p} + \alpha \mathbf{K}_{v} \right) \mathbf{e}$$

$$(\gamma \cdot - \gamma)$$

که در آن $\mathbf{Q}_{k} = \mathbf{Q}_{k}$ ، $\mathbf{Q}_{k} = \mathbf{Q}_{a} = \mathbf{p}_{a} - \hat{\mathbf{p}}_{a}$ ، $\Delta \mathbf{p}_{D} = \mathbf{p}_{D} - \hat{\mathbf{p}}_{D}$ و $\Delta \mathbf{p}_{a} = \mathbf{p}_{a} - \hat{\mathbf{p}}_{a}$ ، $\Delta \mathbf{p}_{D} = \mathbf{p}_{D} - \hat{\mathbf{p}}_{D}$ که در آن \mathbf{Q}_{k} معین هستند، نشان داده می شود که قانون کنترل (۴-۱۵) و قوانین تطبیق (۴-۱۶)، (۴-۱۷) و

فصل ۴ : کنترل تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار با عدم قطعیت دینامیکی و سینماتیکی

ی مکرایی $\mathbf{x} \to \mathbf{x}_d$ و همچنین محدود شدن متغیرها را تضمین میکنند. $\mathbf{x} \to \mathbf{x}_d$

$$- -)$$

$$كنترل ردگیری ژاكوبین تطبیقی ربات در تعامل با محیط
معادلات (۲۰-۱) حركت ربات را در فضای آزاد توصیف میكند. در كنترل امپدانس باید از معادلات
(۲۵-۲) استفاده نمود كه گشتاور عكس العمل محیط ($\mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F}$) را شامل میشود:
(۳۵-۲) $\mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{\ddot{q}} + (\mathbf{B} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))\mathbf{\dot{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F} = \mathbf{H}_{a}\mathbf{u}$
(۲۱-۴)
 $\mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{\ddot{q}} + (\mathbf{B} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))\mathbf{\dot{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F} = \mathbf{H}_{a}\mathbf{u}$
(۲۱-۴)
 $\mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{F} = \mathbf{y}_{e}(\mathbf{q}, \mathbf{q})$
 $\mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F} = \mathbf{y}_{e}^{T}(\mathbf{q}, \mathbf{f})\mathbf{p}_{k}$
(۲۲-۴)
 $\mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F} = \mathbf{y}_{e}^{T}(\mathbf{q}, \mathbf{f})\mathbf{p}_{k}$
(۲۲-۴)
 \mathbf{V} در آن
 \mathbf{V} در آن
 \mathbf{V} در آن
 \mathbf{V} در آن
 $\mathbf{u} = \mathbf{\bar{H}}_{a}^{-1} [\mathbf{\hat{J}}^{T}(\mathbf{q}, \mathbf{\hat{p}}_{k}) \mathbf{K}_{v} \mathbf{\dot{e}} + \mathbf{K}_{p} \mathbf{e} + \mathbf{F}) + \mathbf{y}_{D}^{T}(\mathbf{q}, \mathbf{\dot{q}}_{eq}, \mathbf{\ddot{q}}_{eq}) \mathbf{p}_{D} + \mathbf{y}_{a}^{T}(\mathbf{u}_{o}) \mathbf{\hat{p}}_{a}$
 $\mathbf{u} = \mathbf{\bar{H}}_{a}^{-1} [\mathbf{\hat{J}}^{T}(\mathbf{q}, \mathbf{\hat{p}}_{k}) (\mathbf{K}_{v} \mathbf{\dot{e}} + \mathbf{K}_{p} \mathbf{e} + \mathbf{F}) + \mathbf{y}_{D}^{T}(\mathbf{q}, \mathbf{\dot{q}}_{eq}, \mathbf{\ddot{q}}_{eq}, \mathbf{\ddot{q}}_{eq}) \mathbf{p}_{D} + \mathbf{y}_{a}^{T}(\mathbf{u}_{o}) \mathbf{\hat{p}}_{a}$
 $\mathbf{u}_{o} = \mathbf{\hat{J}}^{T}(\mathbf{q}, \mathbf{\hat{p}}_{k}) (\mathbf{K}_{v} \mathbf{\dot{e}} + \mathbf{K}_{p} \mathbf{e} + \mathbf{F}) + \mathbf{y}_{D}^{T}(\mathbf{q}, \mathbf{\dot{q}}_{eq}, \mathbf{\ddot{q}}_{eq}) \mathbf{h}_{D}$
 $\mathbf{v}$$$

$$\dot{\hat{\mathbf{p}}}_{k} = \mathbf{Q}_{k} \Big[-\mathbf{y}_{J}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \Big(\mathbf{K}_{v} \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_{p} \mathbf{e} \Big) + \mathbf{y}_{e}(\mathbf{q}, \mathbf{F}) \boldsymbol{\sigma} \Big]$$
(٢Δ-۴)

$$\dot{\hat{\mathbf{p}}}_{D} = \mathbf{Q}_{D} \mathbf{y}_{D} (\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_{eq}, \ddot{\mathbf{q}}_{eq}) \mathbf{\sigma}$$
 (٢۶-۴)

$$\dot{\hat{\mathbf{p}}}_a = \mathbf{Q}_a \mathbf{y}_a(\mathbf{u}_o) \boldsymbol{\sigma} \tag{Y-F}$$

با مقایسه روابط فوق با نظایرشان در (۴-۱۶)، (۴-۱۷) و (۱۹-۴) در مییابیم که تعامل ربات و محیط، باعث اضافه شدن عبارت $\mathbf{y}_e(\mathbf{q},\mathbf{F})$ به قانون تطبیق $\hat{\mathbf{p}}_k$ میشود.

روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی تنها قادر است بر عدم قطعیتهای پارامتری دینامیک ربات فائق آید و یکی از ملزومات این روش، معلوم بودن ساختار دینامیکی ربات است. بطور مثال، اگر در روند طراحی عبارت عکس العمل محیط لحاظ نشود و قانون کنترل (۴-۱۵) به جای (۴-۲۳) به

فصل ۴: کنترل تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار با عدم قطعیت دینامیکی و سینماتیکی

سیستم (۴-۲۱) اعمال شود، در آن صورت مشتق تابع لیاپانوف بدین صورت خواهد بود:

$$\dot{V} = -\boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{B} \boldsymbol{\sigma} - \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}} - \alpha \mathbf{e}^T \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{J}^T(\mathbf{q}) \mathbf{F}$$
(۲۸-۴)

بنابراین در تعامل با محیط که $\mathbf{F} \neq \mathbf{0}$ است، ردگیری موقعیت مطلوب امپدانس دچار اختلال می شود. بعبارت دیگر، قانون کنترل مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور نسبت به دینامیکهای مدل نشده ربات مقاوم نیست.

- -)
$$\mathbf{(empty)}$$
 $\mathbf{(empty)}$ $\mathbf{(empty)}$

که در آن $\mathbf{w}_k = \overline{\mathbf{p}}_k - \mathbf{p}_k$ بردار خطای پارامتری سینماتیک نامیده می شود. بنابراین، از (۳۲-۴) رابطه زیر قابل استخراج است:

فصل ۴ : کنترل تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار با عدم قطعیت دینامیکی و سینماتیکی

$$\dot{\mathbf{q}} = \overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}) \left(\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{y}_J^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{w}_k \right)$$
(٣٣-۴)

از طرفی اگر پارامترهای دینامیکی موتور نیز نامعلوم باشد، از رابطه دوم (۲۹-۴) داریم:

$$\mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_{a} + \hat{\mathbf{R}}\mathbf{I}_{a} + \mathbf{K}_{a}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{y}_{I}^{T}(\mathbf{I}_{a})\Delta\mathbf{p}_{I} + \mathbf{y}_{m}^{T}(\dot{\mathbf{q}})\mathbf{p}_{m} = \mathbf{u}$$
(۳۴-۴)
(۳۴-۴)
که در آن ماتریس ثابت $\mathbf{\bar{K}}_{a}$ مقدار تقریبی متناظر با \mathbf{K}_{a} و $\hat{\mathbf{R}}$ مقدار تخمین زده شده \mathbf{R} است.
ماتریس رگرسور جریان $\{\mathbf{I}_{a1} \cdots \mathbf{I}_{an}\}$ مقدار تقریبی مناظر با $\mathbf{y}_{I}(\mathbf{I}_{a}) = \mathrm{diag}\{I_{a1} \cdots I_{an}\}$ مقدار تخمین زده شده \mathbf{R} است.
ماتریس رگرسور جریان $\{\mathbf{I}_{a1} \cdots \mathbf{I}_{an}\} = \mathrm{diag}\{\mathbf{I}_{a1} \cdots \mathbf{I}_{an}\}$ بردار خطای پارامتری مقاومت
 $\{\mathbf{I}_{n} \mathbf{v} \mathbf{v}_{m}(\dot{\mathbf{q}}) = \mathrm{diag}\{\dot{\mathbf{q}}_{1} \cdots \dot{\mathbf{q}}_{n}\}$
رومیچر و $\{\mathbf{I}_{a} \mathbf{v}_{m} \mathbf{v}_{m}(\mathbf{q}) = \mathrm{diag}\{\mathbf{K}_{a} - \mathbf{K}_{a}\}$ بردار ناشی از ماتریس ثابت \mathbf{K}_{a} است. با جایگذاری (۲۰-۳۳) در (۳۴-۴) معادلات مبنا برای طراحی کنترل کننده تطبیقی بدین صورت بدست میآید:

$$\mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_{a} + \hat{\mathbf{R}}\mathbf{I}_{a} + \overline{\mathbf{K}}_{a}\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q})\left(\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{y}_{J}^{T}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\mathbf{w}_{k}\right) + \mathbf{y}_{I}^{T}(\mathbf{I}_{a})\Delta\mathbf{p}_{I} + \mathbf{y}_{m}^{T}(\dot{\mathbf{q}})\mathbf{p}_{m} = \mathbf{u}$$
(٣Δ-۴)

قانون کنترل تطبیقی مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ جهت ردگیری مسیر مطلوب \mathbf{x}_d بصورت زیر پیشنهاد می گردد:

$$\mathbf{u} = \operatorname{sat}(\mathbf{u}_{eq})$$
$$\mathbf{u}_{eq} = \hat{\mathbf{R}}\mathbf{I}_{a} + \overline{\mathbf{K}}_{a}\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}) \Big[\dot{\mathbf{x}}_{d} + \mathbf{K}_{p} (\mathbf{x}_{d} - \mathbf{x}) + \mathbf{y}_{J}^{T}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \hat{\mathbf{w}}_{k} \Big] + \mathbf{y}_{m}^{T}(\dot{\mathbf{q}}) \hat{\mathbf{p}}_{m}$$
(٣۶-۴)

$$\mathrm{sat}(\mathbf{u}_{eq}) = \begin{bmatrix} \mathrm{sat}(u_{eq1}) & \cdots & \mathrm{sat}(u_{eqn}) \end{bmatrix}^T$$
 که در آن $\mathbf{K}_p \in \mathbb{R}^{m imes m}$ یک ماتریس معین مثبت و

$$\operatorname{sat}(u_{eqi}) = \begin{cases} u_{eqi} & : \left| u_{eqi} \right| < u_{i,\max} \\ u_{i,\max} \operatorname{sgn}(u_{eqi}) & : \left| u_{eqi} \right| \ge u_{i,\max} \end{cases}$$
(٣٧-٢)

که در آن
$$\mathbf{u}_{i, ext{max}}$$
 حداکثر ولتاژ مجاز برای موتور هر مفصل است.

فصل ۴: کنترل تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار با عدم قطعیت دینامیکی و سینماتیکی

$$\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_{P}\mathbf{e} = \mathbf{y}_{J}^{T}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\Delta\mathbf{w}_{k} + \overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\overline{\mathbf{K}}_{a}^{-1}\left(\mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_{a} + \mathbf{y}_{I}^{T}(\mathbf{I}_{a})\Delta\mathbf{p}_{I} + \mathbf{y}_{m}^{T}(\dot{\mathbf{q}})\Delta\mathbf{p}_{m}\right)$$
(٣٨-٢)

که در آن $\mathbf{e} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}_m$ و $\Delta \mathbf{p}_m = \mathbf{p}_m - \hat{\mathbf{p}}_m$ میباشد. تابع شبه لیاپانوف $\Delta \mathbf{p}_m = \mathbf{p}_m - \hat{\mathbf{p}}_m$ و $\Delta \mathbf{w}_k = \mathbf{w}_k - \hat{\mathbf{w}}_k$, $\mathbf{e} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}_d$, رای (۴-۳۸) میتواند بصورت زیر پیشنهاد شود:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{w}_k^T \mathbf{Q}_k^{-1} \Delta \mathbf{w}_k + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{p}_I^T \mathbf{Q}_I^{-1} \Delta \mathbf{p}_I + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{p}_m^T \mathbf{Q}_m^{-1} \Delta \mathbf{p}_m$$
(٣٩-٢)

$$(\mathsf{T} \mathsf{q} - \mathsf{f})$$

$$\begin{split} \dot{V} &= -\mathbf{e}^{T}\mathbf{K}_{p}\mathbf{e} + \mathbf{e}^{T}\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\overline{\mathbf{K}}_{a}^{-1}\mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_{a} + \\ & \left(\mathbf{e}^{T}\mathbf{y}_{J}^{T}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) - \dot{\hat{\mathbf{w}}}_{k}\mathbf{Q}_{k}^{-1}\right)\Delta\mathbf{w}_{k} + \\ & \left(\mathbf{e}^{T}\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\overline{\mathbf{K}}_{a}^{-1}\mathbf{y}_{I}^{T}(\mathbf{I}_{a}) - \dot{\hat{\mathbf{p}}}_{I}\mathbf{Q}_{I}^{-1}\right)\Delta\mathbf{p}_{I} + \\ & \left(\mathbf{e}^{T}\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\overline{\mathbf{K}}_{a}^{-1}\mathbf{y}_{m}^{T}(\dot{\mathbf{q}}) - \dot{\hat{\mathbf{p}}}_{m}\mathbf{Q}_{m}^{-1}\right)\Delta\mathbf{p}_{m} \end{split}$$
(f \cdots - (f)

بنابراین با قرار دادن قوانین تطبیق بصورت زیر:

$$\dot{\hat{\mathbf{w}}}_{k} = \mathbf{Q}_{k} \mathbf{y}_{J}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{e}$$
(۴۱-۴)

 $\dot{\hat{\mathbf{p}}}_{I} = \mathbf{Q}_{I} \mathbf{y}_{J} (\mathbf{I}_{a}) \overline{\mathbf{K}}_{a}^{-1} \overline{\mathbf{J}}^{T} (\mathbf{q}) \mathbf{e}$ (47-4)

$$\dot{\mathbf{\hat{p}}}_{m} = \mathbf{Q}_{m} \mathbf{y}_{m}(\dot{\mathbf{q}}) \overline{\mathbf{K}}_{a}^{-1} \overline{\mathbf{J}}^{T}(\mathbf{q}) \mathbf{e}$$
(۴۳-۴)

$$\dot{V} = -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{e}^T \overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_a^{-1} \mathbf{L} \dot{\mathbf{I}}_a$$
(۴۴-۴)

فصل ۴ : کنترل تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار با عدم قطعیت دینامیکی و سینماتیکی

 II_a توان ورودی به موتور و $K_a \dot{q} I_a$ توان خروجی مکانیکی، RI_a^2 تلفات سیمپیچها و $I_a \dot{I}_a$ مشتق I_a رمانی انرژی مغناطیسی را نمایش میدهند. روابط انرژی از (۴-۴۶) بصورت زیر محاسبه میشود (با شرط 0 = 0):

$$\int_{0}^{t} \left(u - \eta(\tau) \right) I_{a} d\tau = \int_{0}^{t} R I_{a}^{2} d\tau + \frac{1}{2} L I_{a}^{2} + \int_{0}^{t} K_{a} \dot{q} I_{a} d\tau$$
(47-4)

از آنجایی که
$$0 = 0 = 0$$
 از آنجایی که $\int_0^t RI_a^2 d au + rac{1}{2}LI_a^2 \ge 0$ از آنجایی که $\int_0^t RI_a^2 d au + rac{1}{2}LI_a^2 \ge 0$

$$\int_{0}^{t} K_{a} \dot{q} I_{a} d\tau \leq \int_{0}^{t} \left(u - \eta(t) \right) d\tau \tag{$\mathbf{FA-F}$}$$

بنابراین با توجه به اینکه $|u| \leq u_{max}$ و با فرض محدود بودن اغتشاش خارجی $\eta(t)| < \eta_{max}$ مدرجی بنابراین با توجه می اینکه بالای سرعت مفاصل بدین صورت بدست می آید:

$$\dot{q}_{\rm max} = \frac{u_{\rm max} + \eta_{\rm max}}{2} \tag{fq-f}$$

با این وصف،
$$w = u - \eta(t) - K_a \dot{q}$$
 محدود خواهد بود. در این حالت با توجه به (۴-۴۵) داریم: $L\dot{I}_a + RI_a = w$

که با توجه به معیار روث-هورویتز پایدار بوده و چون
$$w$$
 محدود است بنابراین I_a و متعاقباً \dot{I}_a نیز
برای هر موتور محدود خواهد بود [۵۸].

با توجه به محدود بودن
$$\dot{\mathbf{I}}_a$$
 در (۴-۴)، شرط لازم برای $\dot{V}\leq 0$ بصورت زیر بدست میآید:

$$\left\|\mathbf{e}\right\| \geq \frac{\lambda_{\max}(\mathbf{L})\sigma_{\max}(\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q}))}{\lambda_{\min}(\mathbf{K}_p)\lambda_{\max}(\overline{\mathbf{K}}_a)} \left\|\dot{\mathbf{I}}_a\right\| = \mu \left\|\dot{\mathbf{I}}_a\right\| \tag{21-f}$$

که در آن
$$\sigma_{\max}(\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})) = \sqrt{\lambda_{\max}(\overline{\mathbf{J}}\overline{\mathbf{J}}^T)}$$
 معرف بزرگترین مقدار تکین ماتریس ژاکوبین تقریبی
است.

فصل ۴: کنترل تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار با عدم قطعیت دینامیکی و سینماتیکی

باشد، $0 \geq \dot{V}$ خواهد بود و تابع V به حداقل خود که متناظر با $\|\mathbf{i}_a\| = \|\mathbf{i}\|\| = \|\mathbf{i}\|\|$ است، همگرا خواهد شد، زیرا به ازای $\|\mathbf{i}\|\| = \|\mathbf{i}\|$ ، $0 < \dot{V}$ شده و V افزایش خواهد یافت. پس با محدود شدن V، ع، شد، زیرا به ازای $\|\mathbf{a}\| = \|\mathbf{i}\|$ محدود شده و V افزایش خواهد یافت. پس با محدود شدن \mathbf{x} \mathbf{x} ، \mathbf{x} ، \mathbf{x} ، \mathbf{x} ، \mathbf{x} \mathbf{x} , \mathbf{x} , \mathbf{x} , \mathbf{x} , \mathbf{x} \mathbf{x} \mathbf{x} \mathbf{x} \mathbf{x} \mathbf{x} محدود هستند. با محدود شدن \mathbf{x} \mathbf{x} محدود بودن \mathbf{p} و با فرض \mathbf{x} محدود، \mathbf{x} ، \mathbf{x} , \mathbf{x} , \mathbf{x} \mathbf{x} محدود هستند. با محدود شدن \mathbf{x} \mathbf{x} محدود بودن \mathbf{p} محدود بودن \mathbf{p} ، محدود و در نتیجه ژاکوبین نیز محدود خواهد بود. با در نظر گرفتن محدود بودن \mathbf{p} ، محدود بودن \mathbf{i}_a محدود بودن \mathbf{x} بدست میآید. در نهایت با محدود بودن \mathbf{i}_a و \mathbf{x} i \mathbf{x}

$$\left|u_{i,eq}\right| \ge u_{i,\max}$$
 بررسی عملکرد در ناحیه $\left|u_{i,eq}\right| \ge u_{i,\max}$ با جایگذاری (۴-۲۹) در معادلات دیفرانسیل الکتریکی موتورها در (۴-۲۹) خواهیم داشت:

$$\mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_{a} + \mathbf{R}\mathbf{I}_{a} + \mathbf{K}_{a}\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{\eta}(t) = \operatorname{sat}(\mathbf{u}_{eq})$$
(\DeltaY-\mathcal{F})

که در آن η ناشی از خطای پارامتری ژاکوبین تقریبی بصورت زیر است:

$$\mathbf{\eta}(t) = \mathbf{K}_a \overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}) \mathbf{y}_J^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{w}_k \tag{\Delta T-f}$$

از آنجا که \mathbf{w}_k و $\mathbf{\dot{q}}$ محدود بوده و بازو در فضای محدود و دور از نقاط تکین حرکت می کند، پس معکوس ماتریس ژاکوبین تقریبی محدود بوده و $\eta(t)$ محدود به اسکالر مثبت η_{\max} خواهد بود: (۵۴-۴) معکوس ماتریس ژاکوبین تقریبی محدود بوده و ایر ایر محدود به اسکالر مثبت η_{\max}

با اضافه کردن
$$\mathbf{K}_{a}\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q})$$
 به طرفین رابطه (۴-۵۳) داریم:

$$\dot{\mathbf{x}}_{d} - \dot{\mathbf{x}} = \overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\mathbf{K}_{a}^{-1} \left(\mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_{a} + \mathbf{R}\mathbf{I}_{a} + \mathbf{K}_{a}\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}}_{d} + \mathbf{\eta}(t) - \operatorname{sat}(\mathbf{u}_{eq})\right)$$
(20-4)

تابع معین مثبت V را بدین صورت پیشنهاد میدهیم [۴۱]:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{e} \tag{(\Delta F-F)}$$

که در آن $\mathbf{r} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}$ میباشد. مشتق گیری از V نسبت به زمان و جایگذاری (۴-۵۵) نتیجه می-دهد: فصل ۴ : کنترل تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار با عدم قطعیت دینامیکی و سینماتیکی

$$\dot{V} = \mathbf{e}^{T} \left[\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_{a}^{-1} \left(\mathbf{L} \dot{\mathbf{I}}_{a} + \mathbf{R} \mathbf{I}_{a} + \mathbf{K}_{a} \overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{x}}_{d} + \boldsymbol{\eta}(t) \right) - \overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_{a}^{-1} \operatorname{sat}(\mathbf{u}_{eq}) \right]$$
(ΔY - \mathfrak{F})

از آنجا که \mathbf{I}_a ، \mathbf{I}_a ، \mathbf{I}_a ، اسکالرهای مثبتی مانند ρ و \mathbf{y}_a وجود $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})$ از آنجا که \mathbf{J}_a ، \mathbf{I}_a ، \mathbf{I}_a ، \mathbf{I}_a ، \mathbf{I}_a دارند، بگونه ای که:

$$\left\|\mathbf{K}_{a}^{-1}\left(\mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_{a}+\mathbf{R}\mathbf{I}_{a}+\mathbf{K}_{a}\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}}_{d}+\boldsymbol{\eta}(t)\right)\right\|<\rho\tag{(2.4)}$$

$$\left\|\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\mathbf{K}_{a}^{-1}\left(\mathbf{L}\dot{\mathbf{I}}_{a}+\mathbf{R}\mathbf{I}_{a}+\mathbf{K}_{a}\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}}_{d}+\mathbf{\eta}(t)\right)\right\|<\rho_{x}=\sigma_{\max}(\overline{\mathbf{J}})\rho$$
(Δ9-۴)

بنابر (۴-۵۷)-(۴-۵۹)، کافی است راهاندازها بتوانند ولتاژ زیر را برای موتورها تأمین کنند:

$$\operatorname{sat}(\mathbf{u}_{eq}) = \rho \sqrt{m} \frac{\sigma_{\max}(\mathbf{J})}{\sigma_{\min}(\mathbf{\bar{J}})} \mathbf{K}_{a} \operatorname{sgn}\left(\mathbf{\bar{J}}^{-1}(\mathbf{q}) \operatorname{sgn}(\mathbf{e})\right)$$
(\$.-\$)

تا
$$\dot{V} < 0$$
 شده و همگرایی خطا تضمین شود.

$$\operatorname{sat}(\mathbf{u}_{eq}) \ge \mathbf{K}_a \overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}) \rho_x \operatorname{sgn}(\mathbf{e}) \tag{\mathbf{F}1-\mathbf{f}}$$

$$\dot{V} = \mathbf{e}^{T} \left[\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q}) \mathbf{K}_{a}^{-1} \left(\mathbf{L} \dot{\mathbf{I}}_{a} + \mathbf{R} \mathbf{I}_{a} + \mathbf{K}_{a} \overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{x}}_{d} + \mathbf{\eta} \right) - \rho_{x} \operatorname{sgn}(\mathbf{e}) \right]$$
(FY-F)

که با توجه به (۴-۵۹)،
$$V < 0$$
 شده و خطای ردگیری همگرا خواهد شد. از طرفی میتوان نوشت:

$$\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q})\operatorname{sgn}(\mathbf{e}) = \left\|\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q})\operatorname{sgn}(\mathbf{e})\right\|\operatorname{sgn}\left(\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q})\operatorname{sgn}(\mathbf{e})\right)$$
(۶۳-۴)

که با توجه به خواص نرم داریم:

$$\left\|\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q})\operatorname{sgn}(\mathbf{e})\right\| \leq \frac{\sqrt{m}}{\sigma_{\min}(\overline{\mathbf{J}})}$$
(۶۴-۴)

بنابر (۴-۶۴) و (۴-۶۲)، حد بالای ولتاژ موتورها در (۴-۶۱) و با جایگذاری رابطه (۴-۵۹) میتواند بصورت زیر نوشته شود:

$$\operatorname{sat}(\mathbf{u}_{eq}) = \rho \sqrt{m} \frac{\sigma_{\max}(\overline{\mathbf{J}})}{\sigma_{\min}(\overline{\mathbf{J}})} \mathbf{K}_{a} \operatorname{sgn}\left(\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}) \operatorname{sgn}(\mathbf{e})\right)$$
(۶۵-۴)

اگر ولتاژ ورودی موتور مفصلی به اشباع برود، با جایگذاری (۴-۳۷) در (۴-۶۵) داریم:

$$u_{\max}\operatorname{sgn}(u_{eq}) = \rho \sqrt{m} \frac{\sigma_{\max}(\overline{\mathbf{J}})}{\sigma_{\min}(\overline{\mathbf{J}})} K_a \operatorname{sgn}(\overline{e}_q)$$
(FF-F)

که در آن \overline{e}_q عنصر i-ام بردار ($\mathbf{g}_q = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \operatorname{sgn}(\mathbf{e})$ استنباط می شود که رابطه زیر باید برقرار باشد:

$$u_{\max} = \rho \sqrt{m} \frac{\sigma_{\max}(\bar{\mathbf{J}})}{\sigma_{\min}(\bar{\mathbf{J}})} K_a$$
(۶۷-۴)

بنابراین با شروع از خطای $\mathbf{e}(0)$ به شرطی که برای هر موتور رابطه (۴-۶۷) برقرار باشد، خطای ردگیری کاهش خواهد یافت تا جایی که ولتاژ موتورها در محدوده کمتر از $u_{
m max}$ قرار گیرد.

-) مثال بازوی دو رابط و مقایسه روش ها

در این پایان نامه، روشهای معرفی شده برای بازوی رباتیک دو رابط شبیهسازی میشوند و مبنایی برای مقایسه روشها قرار می گیرد. در این بخش روابط ارائه شده در بخشهای (۴–۲–۲) و (۴–۳–۱) با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت با هم مقایسه خواهند شد.

-) روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی
 ماتریس ژاکوبین (J(q) برای بازوی دو رابط مطابق رابطه (الف - ۳) بصورت زیر است:

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} & -l_2 s_{12} \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} & l_2 c_{12} \end{bmatrix}$$
(۶λ-۴)

که در آن $s_1 = \cos(q_1 + q_2)$ و $c_1 = \cos(q_1)$, $s_{12} = \sin(q_1 + q_2)$, $s_1 = \sin q_1$ و بردار $c_{12} = c_{12} = c_{12} + c_{12}$ و بردار پارامترهای سینماتیکی $\mathbf{p}_k = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 \end{bmatrix}^T$ شامل طول رابطها است. بر این اساس، ماتریس ژاکوبین تطبیقی را میتوان بصورت زیر نوشت:

$$\hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_k) \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{y}_J^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \hat{\mathbf{p}}_k = \begin{bmatrix} -\dot{q}_1 s_1 & -\left(\dot{q}_1 + \dot{q}_2\right) s_{12} \\ \dot{q}_1 c_1 & \left(\dot{q}_1 + \dot{q}_2\right) c_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{l}_1 \\ \hat{l}_2 \end{bmatrix}$$
(۶۹-۴)

معکوس ژاکوبین تطبیقی نیز بصورت زیر خواهد بود:

که در آن $s_2 = \sin(q_2)$ است.

$$\hat{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_k) = \frac{1}{\hat{l}_1 \hat{l}_2 s_2} \begin{bmatrix} \hat{l}_2 c_{12} & \hat{l}_2 s_{12} \\ -\hat{l}_1 c_1 - \hat{l}_2 c_{12} & -\hat{l}_1 s_1 - \hat{l}_2 s_{12} \end{bmatrix}$$
(Y - 4)

$$\begin{split} \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_{k}) &= \psi_{J}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{p}}_{k}) + \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\hat{\mathbf{p}}}_{k}) \\ \psi_{J}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{p}}_{k}) &= \begin{bmatrix} -\hat{l}_{1}\dot{q}_{1} \, \mathbf{c}_{1} - \hat{l}_{2} \left(\dot{q}_{1} + \dot{q}_{2} \right) \mathbf{c}_{12} & -\hat{l}_{2} \left(\dot{q}_{1} + \dot{q}_{2} \right) \mathbf{c}_{12} \\ -\hat{l}_{1}\dot{q}_{1}s_{1} - \hat{l}_{2} \left(\dot{q}_{1} + \dot{q}_{2} \right) s_{12} & -\hat{l}_{2} \left(\dot{q}_{1} + \dot{q}_{2} \right) s_{12} \end{bmatrix} \end{split}$$
(Y1-F)

$$\mathbf{y}_{D}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_{eq}, \ddot{\mathbf{q}}_{eq}) = \begin{bmatrix} \ddot{q}_{eq1} & 0 \\ \left(2\ddot{q}_{eq1} + \ddot{q}_{eq2}\right)c_{2} - \left(\dot{q}_{2}\dot{q}_{eq1} + \left(\dot{q}_{1} + \dot{q}_{2}\right)\dot{q}_{eq2}\right)s_{2} & \ddot{q}_{eq1}c_{2} + \dot{q}_{1}\dot{q}_{eq1}s_{2} \\ \ddot{q}_{eq2} & \ddot{q}_{eq1} \\ 0 & \ddot{q}_{eq2} \\ 0 & \ddot{q}_{eq2} \\ \dot{q}_{eq1} & 0 \\ 0 & \dot{q}_{eq2} \\ c_{1} & 0 \\ c_{12} & c_{12} \end{bmatrix}$$
(Y7-F)

.که در آن
$$c_2 = \cos(q_2)$$
 میباشد

اگر در این روش، نیروی عکس العمل محیط $\mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{F}$ نیز وارد شود، با توجه به خاصیت ۲-۲ خواهیم داشت:

$$\mathbf{J}^{T}(\mathbf{q})\mathbf{F} = \mathbf{y}_{e}^{T}(\mathbf{q}, \mathbf{F})\mathbf{p}_{k}$$
$$\mathbf{y}_{e}^{T}(\mathbf{q}, \mathbf{F}) = \begin{bmatrix} -F_{1}s_{1} + F_{2}c_{1} & -F_{1}s_{12} + F_{2}c_{12} \\ 0 & -F_{1}s_{12} + F_{2}c_{12} \end{bmatrix}$$
(YT-F)

فصل ۴: کنترل تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار با عدم قطعیت دینامیکی و سینماتیکی

که در آن $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 \end{bmatrix}^T$ میباشد. بدین ترتیب بردار \mathbf{u}_o نیز از (۴-۲۴) و در نهایت قانون کنترل (۲۳-۴) به همراه قوانین تطبیق (۴-۲۵)–(۲–۲۷) قابل محاسبهاند.

- -) روش پیشنهادی

در این روش، از ژاکوبین تقریبی $\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})$ به جای ژاکوبین تطبیقی $\hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \hat{\mathbf{p}}_k)$ استفاده میشود. بنابراین مشابه (۴۹-۴۹) و (۴۹-۴)، محاسبات $\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})$ و $\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})$ با بردار ثابت $\overline{\mathbf{J}}_2^T$ صورت می گیرد. ماتریس رگرسور جریان بصورت $\{\mathbf{I}_{a1}, I_{a2}\}$ و ماتریس رگرسور سرعت مفاصل نیز از $\mathbf{y}_I(\mathbf{I}_a) = \operatorname{diag}\{I_{a1}, I_{a2}\}$ محاسبه میشود. بدین ترتیب قانون کنترل (۴-۳۹) و قوانین تطبیق تطبیق (۴۱-۴) تا (۴۳-۴) قابل محاسبه است.

- -) مقایسه روش ها

روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی، بر مبنای راهبرد کنترل گشتاور طراحی شده است و همانطور که در بخش (۴–۲–۲) گفته شد، با تغییر در دینامیک بخش مکانیکی ربات، قانون کنترل باید تغییر کند. این در حالی است که روش پیشنهادی ارائه شده بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ، مستقل از دینامیک ربات عمل میکند، زیرا کلیه دینامیکهای مکانیکی اثر خود را در جریان موتورها به نمایش میگذارند و با اندازه گیری و حذف آن، قابل جبران هستند.

محاسبات قانون کنترل (۴-۱۵) و (۲۳-۴) نیازمند محاسبه $\dot{\mathbf{x}}_d$ ، $\dot{\mathbf{x}}_d$ و $\dot{\mathbf{x}}_d$ است. بنابراین مسیر مطلوب باید تا دو مرتبه مشتق پذیر باشد. اما قانون کنترل (۴-۳۶) تنها به \mathbf{x}_d و $\dot{\mathbf{x}}_d$ نیاز دارند و در نتیجه کافی است مسیر یک درجه مشتق پذیر باشد.

برای اجرای قانون کنترل (۴-۳۶) به اندازه گیری \mathbf{q} ، \mathbf{q} و \mathbf{x} و \mathbf{I}_a یاز پیدا خواهیم کرد. قانون کنترل (۴-۱۵) نیازمند اندازه گیری \mathbf{q} ، \mathbf{q} و \mathbf{x} است که \mathbf{x} بصورت مستقیم قابل اندازه گیری نیست. علاوه بر این اگر روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی برای کنترل امپدانس مبتنی بر خطای مدل موقعیت اجرا شود، قانون کنترل (۴-۱۵) اندازه گیری فصل ۴ : کنترل تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار با عدم قطعیت دینامیکی و سینماتیکی

نیروی تماس \mathbf{F} نیز در آن لحاظ شود، در صورتی که روش پیشنهادی (\mathbf{F} - \mathbf{F}) هم برای کنترل موقعیت در فضای آزاد و هم کنترل امپدانس قابل استفاده است. از طرفی اجرای امپدانس تعمیم یافته به روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی، به محاسبه مشتق نیروی تماس ($\dot{\mathbf{F}}$) منجر میشود، در حالی که در روش پیشنهادی مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ نیازی به محاسبه $\dot{\mathbf{F}}$ ندارند (رجوع شود به حالی که در روش پیشنهادی مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ نیازی به محاسبه $\dot{\mathbf{F}}$ ادارند (رجوع شود به حالی که در روش پیشنهادی روش آن کار ا

در (۴-۱۵) و (۴-۲۳) از معکوس ژاکوبین تطبیقی استفاده می شود. با توجه به (۴-۷۰) اگر در حین تطبیق $\hat{\mathbf{p}}_k$ ، یکی از پارامترها صفر شود، در این صورت ماتریس ژاکوبین نقص رتبه پیدا می کند. ولی در روش پیشنهادی (۴-۳۶) ژاکوبین تقریبی بکار می ود که با انتخاب مناسب $\overline{\mathbf{p}}_k$ می توان از تکینگی جلوگیری کرد.

محاسبه ماتریس رگرسور دینامیکی (•) $\mathbf{y}_D(\mathbf{v})$ و ماتریس رگرسور عکس العمل محیط (•) $\mathbf{y}_e(\mathbf{v})$ نیاز به محاسبات بسیار بیشتری نسبت به $\mathbf{y}_I(\mathbf{I}_a)$ و $\mathbf{y}_m(\dot{\mathbf{q}})$ دارد که خود به پیچیدگی محاسبات این روش میافزاید.

برای مثالِ ربات دو رابط، بعد فضای پارامترهای تطبیقی برای روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی الرای مثالِ ربات دو رابط، بعد فضای پارامترهای تطبیقی برای روش کنترل تطبیقی پیشنهادی، این ۱۲ است (n = 2 و $n_D = 8$ ، $n_k = 2$)، در حالی که برای روش کنترل تطبیقی پیشنهادی، این رقم به ۶ کاهش مییابد. تعداد زیاد پارامترهای تطبیقی علاوه بر افزایش حجم محاسبات، سرعت همگرایی را نیز کاهش میدهد.

میزان شناخت اولیه از سیستم در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی (۴-۳۶) تنها به ساختار دینامیک خطی و غیر متمرکز موتورها و $\overline{\mathbf{K}}_a$ و (\mathbf{q}) محدود می شود، اما روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی علاوه بر موارد ذکر شده، به ساختار دقیق دینامیکی بازو نیز احتیاج دارد که بسیار غیرخطی بوده و با تزویج همراه است.



-) مقدمه

روشهای فصل ۴، تنها قادرند بر عدمقطعیتهای پارامتری غلبه کنند و دینامیک مدلنشده مانند $\mathbf{L}\mathbf{I}_a$ **L** \mathbf{I}_a و اغتشاشات خارجی میتوانند در ردگیری موقعیت مطلوب ایجاد خطا کنند. بنابراین در بهترین حالت، خطا از $\|\mathbf{I}_a\|$ کمتر نخواهد شد. یکی از راهحلهای موجود، استفاده از سیستمهای فازی جهت تقریب عدمقطعیتها است. از طرفی وارد شدن ژاکوبین تقریبی ($\mathbf{J}(\mathbf{q})$ در قوانین تطبیق (۴۲-۴) و (۴۲-۴) محاسبات آنها را زیاد میکند.

کنترل فازی بعنوان یک کنترل هوشمند، موفقیتهای ارزشمندی را در کاربردهای مختلف بدست آورده است، زیرا در طراحی کنترل کنندههای فازی به دانش دقیقی از مدل سیستم نیازی نخواهیم داشت. بعبارت دیگر، مستقل از مدل هستند. علت این امر در استفاده سیستم فازی از متغیرهای زبانی و ترکیب قواعد منطق فازی نهفته است که آن را به یک نگاشت غیر خطی تبدیل میکند [۵۰]. بر مبنای قضیه استون-وایرشتراس، سیستمهای فازی بعنوان یک تقریب گر عمومی شناخته میشوند و قادر هستند با دقت دلخواه، هر تابع حقیقی غیرخطی پیوسته را بر روی یک مجموعه بسته محدب تقریب بزنند [۵۵]. اما قضیه استون-وایرشتراس تنها وجود یک سیستم فازی مناسب را تضمین می-کند و مشخص نمیکند که پارامترهای سیستم فازی مطلوب به چه صورتی باید انتخاب شوند. بنابراین در تقریب عدم قطعیتها، استفاده از روشهای آموزش یا تطبیقی برای جستجوی پارامترهای سیستم فازی مطلوب الزامی خواهد بود. در این پایان نامه، به کنترل فازی تطبیقی از نوع ارائه شده در ایم. سیستم فازی مطلوب الزامی خواهد بود. در این پایان نامه، به کنترل فازی تطبیقی از نوع ارائه شده در

در [۵۱] سیستمهای کنترل فازی تطبیقی به دو دسته کلی تقسیم میشوند:

- ۱) کنترل تطبیقی غیر مستقیم: در این راهبرد سیستمهای فازی بعنوان تقریبی از مدل سیستم بکار میرود. بنابراین شناسایی سیستم تحت کنترل، مبنای طراحی سیستم فازی را تشکیل میدهد.
- ۲) کنترل فازی تطبیقی مستقیم: در روش مستقیم، پارامترهای کنترل کننده فازی با هدف

دستیابی به سیستم حلقه بسته مطلوب، تخمین زده میشوند.

۳) ترکیب کنترل فازی مستقیم /غیر مستقیم: این رویکرد، ترکیبی از هر دو روش مستقیم و غیر مستقیم است.

در [۵۲] از روش مستقیم لیاپانوف، جهت طراحی سیستم کنترل فازی تطبیقی استفاده می شود. بدین منظور، یک فرم بسته برای سیستم فازی ارائه می کند که نسبت به پارامترها خطی است.

-) کنترل فازی تطبیقی بازوی رباتیک در حضور عدمقطعیت دینامیکی و سینماتیکی

در حوزه کنترل فازی تطبیقی ربات در فضای مفصلی مقالات بسیاری با راهبرد کنترل گشتاور و کنترل ولتاژ ارائه شده است که میتوان به طراحی سیستم فازی تطبیقی جهت تقریب عدم قطعیت-های سیستم بازوی رباتیک با موتورهای الکتریکی [۴۱]، کنترل فازی تطبیقی مستقیم برای کنترل غیر متمرکز ربات [۴۴] و ترکیب کنترل فازی تطبیقی و تناسبی انتگرالی برای کنترل دقیق ربات [۴۲] اشاره نمود. حوزه کنترل فازی تطبیقی در فضای کار به همراه عدم قطعیتهای سینماتیکی کمتر مورد توجه قرار گرفته است به گونهای که در حوزه کنترل ولتاژ تاکنون کاری صورت نگرفته است.

با راهبرد کنترل گشتاور در [۵۳] شبکههای عصبی چندلایه جهت تخمین پارامترهای ژاکوبین و عدم قطعیتهای دینامیکی بازو و در [۵۴] یک کنترل مود لغزشی فازی با در نظر گرفتن عدم قطعیتهای سینماتیکی و دینامیکی جهت کنترل گشتاور بازوی رباتیک معرفی شده است. در بخش بعد، مقاله [۵۴] را مورد بررسی قرار میدهیم.

- -) کنترل فازی تطبیقی با راهبرد کنترل گشتاور روش [۵۴] تعمیم یافته کنترل مود لغزشی فازی تطبیقی در فضای مفصلی است [۵۹] که در واقع با اضافه کردن ژاکوبین تقریبی، کنترل مقاوم در فضای کار را ایجاد میکند. مبنای طراحی سیستم کنترل در [۵۴] بر معادلات بازو مطابق (۲-۱۴) و جایگذاری (۲-۱۰) در آن قرار می گیرد:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\left(\ddot{\mathbf{x}}-\dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}\right)+\mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}+\mathbf{g}(\mathbf{q})=\boldsymbol{\tau}_{R}$$
(1- Δ)

قانون کنترل معادل au_{eq} در شرایط وجود عدم قطعیت دینامیکی و سینماتیکی بر حسب مدل نامی باید بصورت زیر ارائه گردد:

$$\boldsymbol{\tau}_{eq} = \overline{\mathbf{D}}(\mathbf{q})\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q})\left(\ddot{\mathbf{x}}_{d} - \overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}\right) + \overline{\mathbf{C}}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \overline{\mathbf{g}}(\mathbf{q})$$
(7- $\boldsymbol{\Delta}$)

که در آن $\overline{\mathbf{D}}$, $\overline{\mathbf{D}}$, $\overline{\mathbf{D}}$ و $\overline{\mathbf{J}}$ ماتریس های نامی \mathbf{D} , \mathbf{D} و \mathbf{J} هستند و ماتریس ژاکوبین تقریبی $\overline{\mathbf{J}}$, $\overline{\mathbf{D}}$ نیز غیر تکین فرض می شود. برای تضمین پایداری و جبران عدم قطعیتهای ناشی از $\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})$ پارامترهای تقریبی، قانون کنترل زیر پیشنهاد می شود:

$$\sigma = \dot{\mathbf{e}} + \Lambda \mathbf{e} \tag{(f-\Delta)}$$

که در آن
$$\mathbf{e} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}$$
 و $\mathbf{\dot{e}} = \mathbf{\dot{x}}_d - \mathbf{\dot{x}}$ مىباشد.
۲) قانون کنترل au_{fsm} که رسیدن به سطح لغزش را تضمین میکند، میتواند بدین صورت
انتخاب گردد:

$$\boldsymbol{\tau}_{fsm} = \overline{\mathbf{D}}(\mathbf{q})\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}) \Big(\mathbf{\Lambda} \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_{1} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{K}_{fs}(\boldsymbol{\sigma}) \Big)$$
(\Delta-\Delta)

که در آن
$$\mathbf{K}_1 \in \mathbb{R}^{m imes m}$$
 ماتریسهای قطری ثابت و معین مثبت و $K_{fsj}(\sigma_j)$ بعنوان عنصر $j \dashv n$ از $\mathbf{K}_1 \in \mathbb{R}^{m imes m}$ بردار $\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{fsj}(\sigma_j) & \cdots & K_{fsm}(\sigma_m) \end{bmatrix}^T$ به فرم زیر است:

$$K_{fsi}(\sigma_i) = \frac{\sum_{l=1}^{N} \hat{\mathbf{p}}_{\phi_i}^l \mu_{A_i^l}(\sigma_i)}{\sum_{l=1}^{N} \mu_{A_i^l}(\sigma_i)} = \mathbf{y}_{\phi_i}^T(\sigma_i) \hat{\mathbf{p}}_{\phi_i}^l$$
(۶-۵)

که در آن توابع تعلق (σ_i) بصورت گوسی انتخاب میشوند و مراکز گروههای فازی خروجی که در آن توابع تعلق $\mathbf{K}_{fs}(\sigma_i)$ به جای تابع $\hat{\mathbf{p}}_{\phi} \in \mathbb{R}^N$ به جای تابع $\hat{\mathbf{p}}_{\phi} \in \mathbb{R}^N$ به جای تابع $\hat{\mathbf{p}}_{\phi} \in \mathbb{R}^N$ به روز میشوند. در این طراحی سیستم فازی ($\mathbf{\sigma}_i$) به جای تابع sgn($\mathbf{\sigma}$) در کنترل مود لغزشی قرار می گیرد تا مسئله ناپیوستگی و لرزش' ناشی از آن مرتفع گردد. با پیشنهاد تابع لیاپانوف بصورت زیر [۵۴]:

$$V = \frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma}^{T}\boldsymbol{\sigma} + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{m} \Delta \mathbf{p}_{\phi_{i}}^{T} \Delta \mathbf{p}_{\phi_{i}}$$
(Y- $\boldsymbol{\Delta}$)

و با انتخاب مناسب
$$\mathbf{K}_1$$
 و محاسبه قانون تطبیق بصورت زیر:
 $\dot{\hat{\mathbf{p}}}_{\phi_i} = \sigma_i \mathbf{y}_{\phi_i}(\sigma_i)$ (۸-۵)

محدود شدن متغیرها و دستیابی به مود لغزش و در نتیجه همگرایی $\mathbf{x}
ightarrow \mathbf{x}_d$ اثبات میشود.

- -) کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی با راهبرد کنترل ولتاژ نوآوری روش پیشنهادی در این بخش، مربوط به تعریف یک سطح لغزش انتگرالی غیر خطی بصورت زیر است:

$$\boldsymbol{\sigma} \triangleq \int_0^t \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \Big(\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} \Big) d\tau \tag{9-2}$$

که در آن
$${f r}={f x}_d-{f x}$$
 و ${f e}={f x}_d-{f x}$ است. اگر قانون کنترلی ارائه شود که مود لغزش ${f \sigma}={f 0}$ و $f \phi={f s}$ را فراهم کند، در آن صورت از (۹-۹) داریم: $f \phi={f 0}$

$$\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\left(\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_{p}\mathbf{e}\right) = \mathbf{0} \tag{1.-\Delta}$$

که با فرض غیرتکین بودن ماتریس ژاکوبین، خطای e و مشتق آن بصورت نمایی به صفر همگرا می-شوند. در صورت استفاده از ژاکوبین نامی $\overline{J}(q)$ و اندازه گیری \dot{x} ، در صورت غیرتکین بودن ژاکوبین تقریبی باز هم همگرایی خطای e به سمت صفر تضمین خواهد شد. از آنجا که اندازه گیری \dot{x} مشکل است، سرعت تقریبی $\overline{\dot{x}}$ بدین صورت از اندازه گیری سرعت مفاصل بدست میآید:

 1 chattering

$\overline{\dot{\mathbf{x}}}=\overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$	(11-0)
، مطابق رابطه (۴-۳۲) در سرعت تقریبی وجود دارد:	خطایی که
$\overline{\dot{\mathbf{x}}} - \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{y}_J^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{w}_k$	(17-۵)
بن خطای ردگیری صفر در مود لغزش بصورت زیر خواهد شد:	مانع تضمي
$\overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}) \Big(\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} - \mathbf{y}_J^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{w}_k \Big) = 0$	(18-0)
ی سرعت تقریبی $\overline{{ m \dot{x}}}$ از سرعت تطبیقی $\hat{{ m \dot{x}}}$ بصورت زیر استفاده کنیم:	گر به جای
$\hat{\dot{\mathbf{x}}} = \overline{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{y}_J^T(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\hat{\mathbf{w}}_k$	(14-0)
رت در مود لغزش خواهیم داشت:	در آن صور
$\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} - \mathbf{y}_J^T (\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \Delta \mathbf{w}_k = 0$	(۱۵-۵)
مىباشد. در اين صورت با انتخاب تابع شبه لياپانوف V_1 بصورت زير: $\Delta {f w}_k = {f w}_k - \hat{f w}_k$	که در آن
$V_1(\mathbf{e}, \Delta \mathbf{w}_k) = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{w}_k^T \mathbf{Q}_k^{-1} \Delta \mathbf{w}_k$	(18-0)
بری از آن نسبت به زمان و جایگذاری (۵-۱۵)، $\dot{V_1}$ را بدست میآوریم:	و مشتق گب
$\dot{V}_1 = -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \left(\mathbf{e}^T \mathbf{y}_J^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \hat{\dot{\mathbf{w}}}_k \mathbf{Q}_k^{-1}\right) \Delta \mathbf{w}_k$	(۱۷-۵)
قانون تطبيق سينماتيک بصورت زير:	با انتخاب
$\hat{\dot{\mathbf{w}}}_k = \mathbf{Q}_k \mathbf{y}_J^T(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) \mathbf{e}$	(۱۸-۵)
میشود، یعنی V و به تبع آن \mathbf{e} و $\Delta \mathbf{w}_k$ محدود میشوند. از (۵-۱۵) نتیجه میگیریم که	, $\dot{V_1} \leq 0$
${f x} o {f x}_d$ دود بوده و $\dot{V_1} o 0$ پيوسته يکنواخت خواهد شد. بنابر لم باربالات، $0 \to \dot{V_1}$ و متعاقباً	ė نيز مح
میل خواهد کرد. با فرض محدود بودن \mathbf{x}_d و $\mathbf{\dot{x}}_d$ نیز گرفته میشود. $\mathbf{\hat{w}}_k$	$ ightarrow \mathbf{w}_k$ و
یل سطح لغزش اتگرالی غیرخطی تطبیقی را با توجه به (۵-۹) و (۵-۱۴) بصورت زیر تعریف	با این تحل

٨۴

مىكنيم:

فصل ۵: کنترل فازی تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار $\hat{\mathbf{\sigma}} = \int_{0}^{t} (\hat{\dot{\mathbf{q}}}_{eq} - \dot{\mathbf{q}}) d\tau$ $(19-\Delta)$ که در آن $\hat{\mathbf{q}}_{eq} \in \mathbb{R}^n$ بصورت زیر است: $\hat{\mathbf{q}}_{eq} = \overline{\mathbf{J}}^{-1}(\mathbf{q}) \Big(\dot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{y}_J^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \hat{\mathbf{w}}_k \Big)$ $(\gamma \cdot - \Delta)$ مشتق سطح لغزش نیز از (۵-۱۹) بدست میآید: $\dot{\hat{\sigma}} = \hat{\dot{\mathbf{q}}}_{_{ea}} - \dot{\mathbf{q}}$ $(\gamma)-\Delta)$ با تعريف سطح لغزش بصورت (۵-۱۹) و قانون تطبيق سينماتيك (۵-۱۸) امكان استفاده از كنترل غير متمر کز فراهم می شود. بنابراین برای هر کدام از موتورها با توجه به معادلات (۲-۳۲) داریم: $L\dot{I}_a + RI_a + K_a\dot{q} = u$ $(\gamma\gamma-\Delta)$ که در آن برای جلوگیری از پیچیدگی از اندیس گذاری، از نمادهای مورب استفاده شده است که نماینده عنصر iام از بردار یا ماتریس متناظر هستند. با لحاظ کردن مقدار نامی \overline{K}_a در (۲۲-۵) داريم: ${{\bar K}_{\!\!\!a}}{\dot q}+\eta=u$ (22-0) که در آن عدم قطعیت η بصورت زیر است: $\eta = L\dot{I}_a + RI_a + \left(K_a - \bar{K}_a\right)\dot{q}$ (24-0) قانون کنترل بصورت زیر پیشنهاد می گردد: $u = \operatorname{sat}(u_{eq} + \hat{u}_{\phi})$ $(\Upsilon \Delta - \Delta)$ که در آن تابع (•) همانند (۴-۳۷) و قانون کنترل معادل u_{eq} بصورت زیر تعریف میشود: $u_{eq} = \bar{K}_a \left(\hat{\dot{q}}_{eq} + \alpha \hat{\sigma} \right)$ (28-0) که در آن lpha یک اسکالر مثبت است. اگر با اشباع موتورها مواجه نشویم ($|u| < u_{
m max}$)، معادله حلقه بسته با جایگذاری (۵-۲۵) در (۵-۲۳) بدین صورت بدست میآید: $\bar{K}_a \left(\hat{\dot{q}}_{eq} + \alpha \hat{\sigma} \right) = \eta - \hat{u}_{\phi}$ (27-2)

فصل ۵: کنترل فازی تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار

سیستم فازی تطبیقی \hat{u}_{ϕ} جهت تقریب عدم قطعیت η مورد استفاده قرار می گیرد. بدین منظور یک سیستم فازی با دو ورودی $\hat{\sigma}$ و $\hat{\sigma}$ مشابه (ب- ۱) طراحی می گردد: $\hat{u}_{\phi} = \mathbf{y}_{\phi}^{T}(k_{1}\hat{\sigma},k_{2}\dot{\sigma})\hat{\mathbf{p}}_{\phi}$ (۲۸-۵)

که در آن اسکالرهای $I_{i_{1}}^{N}$ و $I_{i_{2}}^{N}$ مرائب مقیاس برای نرمال کردن ورودیها هستند و $I_{i_{2}}^{N}$ بردار پارامترهای تخمین زده شده فازی و $\mathbb{R}^{N} \ni (\bullet) = \mathbb{R}^{N}$ ماتریس توابع پایه فازی هستند. اگر برای هر پارامترهای تخمین زده شده فازی و $\mathbb{R}^{N} \ni (\bullet) = \mathbb{R}^{N}$ ماتریس توابع پایه فازی هستند. اگر برای هر ورودی $\hat{\sigma}$ و $\hat{\sigma}$ و $\hat{\sigma}$ $\hat{\sigma}$ $\hat{\sigma}$ $\hat{\sigma}$ $\hat{\sigma}$ $\hat{\sigma}$ و $\hat{\sigma}$ و $\hat{\sigma}$ و $\hat{\sigma}$ و $\hat{\sigma}$ $\hat{\sigma}$ $\hat{\sigma}$ $\hat{\sigma}$ $\hat{\sigma}$ $\hat{\sigma}$ و $\hat{\sigma}$ و $\hat{\sigma}$ $\hat{\sigma}$



شکل ۵-۱ : نمایش گروه های فازی ورودی

برای خروجی ۹ گروه فازی از نوع گوسی مطابق شکل ۵-۲ تعریف می شود. VNHNHNMNSPSPMPHVPHZ u_{ϕ} $\hat{p}_{\phi 1}$ $\hat{p}_{\phi 4}$ $\hat{p}_{\phi 7}$ $\hat{p}_{\phi 8}$ $\hat{p}_{\phi 6}$ $\hat{p}_{\phi 2}$ $\hat{p}_{\phi 5}$ $\hat{p}_{\phi 3}$ $\hat{p}_{\phi 9}$

شکل ۵-۲ : نمایش گروه های فازی خروجی

قوانین فازی با هدف دستیابی به مود لغزش میتواند بصورت جدول ۵-۱ ارائه شود.

	جدول ۵-۱ : قوانین فازی						
			$\hat{\sigma}$				
			Ν	Ζ	Р		
	$\dot{\hat{\sigma}}$	Р	NM	PS	VPH		
		Z	NH	Ζ	PH		
		Ν	VNH	NS	PM		

فرض می کنیم سیستم فازی مطلوبی مانند $u_{\phi}^{}$ به گونهای وجود داشته باشد که عدم قطعیت η را با دقت arepsilon تقریب بزند:

$$\eta = u_{\phi} + \varepsilon = \mathbf{y}_{\phi}^{T} (k_{1}\hat{\sigma}, k_{2}\dot{\hat{\sigma}}) \mathbf{p}_{\phi} + \varepsilon$$
(۲۹-Δ)

که در آن ε کراندار و محدود به یک اسکالر مثبت مانند ε_{\max} است. با این وصف معادله حلقه بسته (۵-۲۷) را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\bar{K}_{a}\left(\dot{\hat{\sigma}}+\alpha\hat{\sigma}\right)=\mathbf{y}_{\phi}^{T}\Delta\mathbf{p}_{\phi}+\varepsilon$$
($\mathbf{\tilde{\tau}}$ - $\mathbf{\Delta}$)

که در آن
$$\hat{\mathbf{p}}_{\phi} = \mathbf{p}_{\phi} - \hat{\mathbf{p}}_{\phi}$$
 میباشد. تابع شبه لیاپانوف زیر برای (۵- ۳۰) پیشنهاد میگردد [۴۱]:

$$V_2(\hat{\sigma}, \dot{\hat{\sigma}}, \Delta \mathbf{p}_{\phi}) = \frac{1}{2} \bar{K}_a \left(\dot{\hat{\sigma}} + \alpha \hat{\sigma} \right)^2 + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{p}_{\phi}^T \mathbf{Q}_{\phi}^{-1} \Delta \mathbf{p}_{\phi}$$
(٣١-۵)

که در آن
$$V_{2} \in \mathbb{R}^{N imes N}$$
 یک ماتریس متقارن و معین مثبت است. مشتق V_{2} نسبت به زمان بدین
صورت محاسبه میشود:

$$\dot{V}_{2} = \left(\dot{\hat{\sigma}} + \alpha\hat{\sigma}\right)\bar{K}_{a}\left(\ddot{\hat{\sigma}} + \alpha\dot{\hat{\sigma}}\right) - \Delta\mathbf{p}_{\phi}^{T}\mathbf{Q}_{\phi}^{-1}\dot{\mathbf{p}}_{\phi}$$
(٣٢-۵)

مشتق (۵-۳۰) را می توان بصورت زیر محاسبه نمود:

$$\bar{K}_{a}\left(\ddot{\hat{\sigma}}+\alpha\dot{\hat{\sigma}}\right) = -\mathbf{y}_{\phi}^{T}\dot{\mathbf{p}}_{\phi} + \dot{\mathbf{y}}_{\phi}^{T}\Delta\mathbf{p}_{\phi} + \dot{\varepsilon} \tag{(TT-\Delta)}$$

با جایگذاری (۵-۳۳) در (۵-۳۲) داریم:

$$\dot{V}_{2} = \left(\dot{\hat{\sigma}} + \alpha\hat{\sigma}\right) \left(-\mathbf{y}_{\phi}^{T} \dot{\hat{\mathbf{p}}}_{\phi} + \dot{\mathbf{y}}_{\phi}^{T} \Delta \mathbf{p}_{\phi} + \dot{\varepsilon} \right) - \Delta \mathbf{p}_{\phi}^{T} \mathbf{Q}_{\phi}^{-1} \dot{\hat{\mathbf{p}}}_{\phi}$$
(٣۴-۵)

فصل ۵: کنترل فازی تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار

اگر قانون تطبیق را بصورت زیر در نظر بگیریم:

$$\dot{\hat{\mathbf{p}}}_{\phi} = (\dot{\hat{\sigma}} + \alpha \hat{\sigma}) \mathbf{Q}_{\phi} \mathbf{y}_{\phi}$$
 (۳۵-۵)
با جایگذاری (۵-۵۳) و (۵-۳۰) در (۵-۳۲) و با توجه به اسکالر بودن $\mathbf{y}_{\phi}^{T} \Delta \mathbf{p}_{\phi}$ ، خواهیم داشت:

$$\dot{V}_{2} = -\left(\mathbf{y}_{\phi}^{T}\mathbf{Q}_{\phi}\mathbf{y}_{\phi} + \bar{K}_{a}\right)\left(\dot{\hat{\sigma}} + \alpha\hat{\sigma}\right)^{2} + \left(\dot{\mathbf{y}}_{\phi}^{T}\Delta\mathbf{p}_{\phi} + \dot{\varepsilon} + \varepsilon\right) \tag{77-a}$$

- ۲-۲-۵) تحلیل پایداری از آنجا که ε محدود است، اگر η بصورت یکنواخت پیوسته باشد، درآن صورت می توان اسکالر مثبتی مانند ε یافت به گونهای که:
- $\left| \dot{\mathbf{y}}_{\phi}^{T} \Delta \mathbf{p}_{\phi} + \dot{\varepsilon} + \varepsilon \right| \le \rho_{\varepsilon} \tag{(Y-\Delta)}$

در این صورت شرط کافی برای $\dot{V}_2 \leq 0$ بصورت زیر بدست میآید:

$$\left|\dot{\hat{\sigma}} + \alpha \hat{\sigma}\right| \geq \frac{\rho_{\varepsilon}}{\bar{K}_{a} + \lambda_{\min}\left(\mathbf{Q}_{\phi}\right)} \tag{$\mathbf{TA-\Delta}$}$$

بنابراین
$$V_2$$
 کاهش مییابد تا به حداقل مقدار خود همگرا شود. با این وصف مطابق (۵-۳۱)، $\dot{\sigma}_2$ بنابراین $\dot{\sigma}_{\phi}$ و با فرض محدود بودن $\dot{\phi}_{\phi}$ نیز محدود خواهند شد. با جایگذاری (۵-۳۵) در $\dot{\sigma}$ - $lpha \hat{\sigma}$) در (۳۳-۵) داریم:

$$\bar{K}_{a}\left(\ddot{\hat{\sigma}}+\alpha\dot{\hat{\sigma}}\right)+\mathbf{y}_{\phi}^{T}\mathbf{Q}_{\phi}\mathbf{y}_{\phi}\left(\dot{\hat{\sigma}}+\alpha\hat{\sigma}\right)=\dot{\mathbf{y}}_{\phi}^{T}\Delta\mathbf{p}_{\phi}+\dot{\varepsilon}$$
(٣٩-۵)

که میتوان از آن محدود بودن $\dot{\sigma} + \alpha \dot{\sigma}$ را نتیجه گیری کرد. معادله (۵-۳۹) یک معادله خطی پایدار است که ورودی آن یک مقدار محدود است. بنابراین $\hat{\sigma}$ ، $\dot{\sigma} e$ $\ddot{\sigma}$ نیز محدود خواهند شد. با توجه به است که ورودی آن یک مقدار محدود است. بنابراین $\hat{\sigma}$ ، $\dot{\sigma} e$ $\ddot{\sigma}$ نیز محدود خواهند شد. با توجه به محدود $\hat{\sigma} e$ $\dot{\sigma}$ ، نتیجه می گیریم که e، e e، e e مستند و در نتیجه با توجه به محدود بودن $\hat{\sigma} e$ $\dot{\sigma}$ ، نتیجه می گیریم که e، e e e e نیز محدود هستند و در نتیجه با توجه به محدود محدود $\hat{\sigma} e$ $\dot{\sigma}$ ، نتیجه می گیریم که e، e e e e نیز محدود هستند و در نتیجه با توجه به محدود بودن $\hat{\sigma} e$ $\hat{\sigma}$ و $\hat{\sigma}$ ، محدود شدن e e e می آید. با توجه به فرض حرکت ربات در بودن k محدود و این که ماتریس ژاکوبین دارای رتبه کامل است، محدود بودن p و \hat{r} نتیجه گیری فضای محدود و این که ولتاژ موتورها محدود است، با توجه به تحلیل ارائه شده در بخش (۴–۳–۱–۲)، I_a

فصل ۵: کنترل فازی تطبیقی بازوی رباتیک در فضای کار

 \dot{I}_a و \dot{p} محدود خواهند بود. پس قانون کنترل (۵-۲۵) به همراه قوانین تطبیق (۵-۱۸) و (۵-۳۵) محدود شدن کلیه حالتهای سیستم حلقه بسته را تضمین خواهند کرد.

۵-۲-۲-۲) بررسی عملکرد در ناحیه اشباع موتورها مشابه تحلیل ارائه شده در بخش (۴-۳-۱-۳)، شرط (۴-۶۷) باید برای ولتاژ موتورها برقرار باشد تا خطا در محدوده مشخص قرار گیرد.



-) مقدمه

در فصل ۴ :، ردگیری ژاکوبین تطبیقی با دو رویکرد با دو کنترل موقعیت و کنترل امپدانس معرفی شد. سپس بر مبنای راهبرد کنترل ولتاژ و روش تطبیقی مرسوم، یک روش کنترل تطبیقی جدید برای ربات جدید برای ربات ارائه شد و در فصل ۵ :، نیز یک روش جدید برای طراحی سیستم کنترل فازی تطبیقی جهت غلبه بر عدم قطعیتهای سینماتیکی و دینامیکی پیشنهاد گردید. در این فصل به شبیهسازی و مقایسه عملکرد کنترل کنندههای فوق در کنترل ربات دو رابط میپردازیم. معادلات دینامیکی و سینماتیکی ربات دو رابط و معادلات دینامیکی موتورهای DC مغناطیس دائم در پیوست الف معرفی شده است. مقادیر مربوط به پارامترهای ربات دو رابط در جدول ۶-۱ و موتورهای DC در جدول ۶-۲ بیان شده است [۴۷]:

J (kg.m ²)	m~(kg)	l_c (m)	l (m)	رابط
1.5	6	0.5	1	١
0.5	2	0.5	1	٢

جدول ۶-۱ : پارامترهای ربات دو رابط

i=1,2 جدول ۶-۲ : پارامترهای موتور DC مغناطیس دائم i=1,2

$J_m = 2 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$	$K_m = 0.5$ N.m / A	$L = 10^{-3} H$	$u_{\rm max} = 40 \ V$
$B_m = 10^{-3}$ N.m.s / rad	$K_b=0.5~{\it V.s}$ / rad	$R = 1.2 \ \Omega$	r = 0.02

در تمامی شبیهسازیها، مسیر مرجع \mathbf{x}_r یک دایره با شعاع m = 0.5 m و مرکز $\begin{bmatrix} 0.75 & 0.75 \end{bmatrix}^T$ میباشد

که باید ظرف مدت ۲۰ ثانیه طی گردد. این مسیر بصورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{r}(t) &= \begin{bmatrix} 0.75 + 0.5\cos(\frac{\pi}{10}t - \sin\frac{\pi}{10}t) \\ 0.75 + 0.5\sin(\frac{\pi}{10}t - \sin\frac{\pi}{10}t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$
is the initial initial
پارامترهای مدل امپدانس تعمیم یافته در جدول ۶-۳ ارائه شده است.

جدول ۶-۳ : پارامترهای امپدانس تعمیم یافته					
B_{f}	K_{f}	M_R	B_{R}	K_R	جهت مختصاتی
0.17	1	80	800	1920	j = 1, 2

در این فصل ابتدا عملکرد کنترل کنندههای مذکور در کنترل موقعیت ربات در فضای آزاد و در کنترل



امپدانس و در تعامل با یک سطح سخت مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

شکل ۶-۱: ربات دو رابط و مسیر مرجع دایره ای

-) شبیه سازی کنترل کننده ها در کنترل موقعیت $\overline{\mathbf{H}}_a$ در قانون کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی (AJTC') مطابق رابطه (۲-۱۵)، ماتریس انتقال نامی $\overline{\mathbf{H}}_a$ در قانون کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی (AJTC') مطابق رابطه (۲-۱۵)، ماتریس انتقال نامی یا ۱۶۰ با ۱۶۰٪ مقدار واقعی آن بصورت $\{33,33\}$ و مقدار اولیه پارامترهای سینماتیکی که شامل طول رابطها میشود، با ۵٪ عدم قطعیت، بصورت $\mathbf{T}_a = 1.05 \quad 0.95$ و مقدار اولیه پارامترهای سینماتیکی که شدهاند. ماتریس بهره بصورت $\{\mathbf{k}_v = \text{diag}\{500,500\}$ و $\mathbf{K}_p = \text{diag}\{2.5 \times 10^{-4}, 2.5 \times 10^{-4}\}$ و اسکالر $\mathbf{m} = \mathbf{m}$ در نظر گرفته شدهاند.

 $\hat{\mathbf{p}}_a(0) = \mathbf{0}$ و $\hat{\mathbf{p}}_D(0) = \mathbf{0}$ قوانین تطبیق (۴-۱۹)، (۴-۱۷) و (۱۹-۴)، با در نظر گرفتن شرایط اولیه

¹ Adaptive Jacobian Tracking Control

و ماتریس ضرائب زیر محاسبه می شوند: $\mathbf{Q}_{k} = \operatorname{diag}\left\{0.01, 0.03\right\} , \ \mathbf{Q}_{a} = \operatorname{diag}\left\{0.1, 0.5\right\} ,$ $\mathbf{Q}_{D} = \operatorname{diag}\left\{100, 160, 20, 20, 8 \times 10^{4}, 16 \times 10^{4}, 4 \times 10^{3}, 400\right\}$ قانون کنترل تطبیقی پیشنهادی (TSAC^۲) در (۴-۳۶)، با لحاظ کردن ۴۰٪ عدم قطعیت برای ماتریس نامی و ۵٪ عدم قطعیت برای پارامترهای سینماتیکی نامی $\overline{f K}_a={
m diag}ig\{40,40ig\}$ $\mathbf{K}_{p} = \operatorname{diag}\left\{50, 50
ight\}$ به اجرا گذاشته می شود. ماتریس بهره بصورت $\overline{\mathbf{p}}_{k} = \begin{bmatrix} \overline{l}_{1} & \overline{l}_{2} \end{bmatrix}^{T} = \begin{bmatrix} 1.05 & 0.95 \end{bmatrix}^{T}$ میباشد و قوانین تطبیق (۴-۴۱)-(۴-۴۳) با شرایط اولیه صفر و ماتریسهای ضرائب زیر محاسبه می شوند: $\mathbf{Q}_{k} = \text{diag}\left\{10^{4}, 10^{4}\right\} \ , \ \mathbf{Q}_{I} = \text{diag}\left\{10^{5}, 6 \times 10^{5}\right\} \ , \ \mathbf{Q}_{m} = \text{diag}\left\{10^{4}, 10^{4}\right\}$ برای قانون کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی (TSAFC^r) در (۵-۵)، $\overline{\mathbf{R}}_a$ و $\overline{\mathbf{p}}_k$ مشابه قبل انتخاب می شوند و پارامترهای کنترل بصورت ${f K}_p={
m diag}\left\{50,50
ight\}$ و lpha=2 لحاظ شدهاند. ضرائب مقیاس برای سیستم فازی اول بصورت $k_{11} = 250$ و $k_{12} = 15$ و $k_{12} = 250$ و برای سیستم فازی دوم $k_{21} = 250$ و ۹ میباشد. برای هر ورودی سیستم فازی، ۳ گروه فازی مطابق شکل ۵-۱ و در مجموع $k_{22}=20$ قانون برای هر سیستم فازی مطابق جدول ۵-۱ ارائه می گردد. قوانين تطبيق (۵–۱۸) و (۵–۳۵) نيز با توجه به شرايط اوليه $\mathbf{w}_k(0) = \mathbf{0}$ ، د: $\hat{\mathbf{p}}_{\phi 1} = \hat{\mathbf{p}}_{\phi 2} = \begin{bmatrix} -5 & -2.5 & 0 & -2.5 & 0 & 2.5 & 0 \end{bmatrix}^T$ و ماتریس ضرائب زیر محاسبه می شوند: $\mathbf{Q}_{k} = \operatorname{diag}\left\{2.25, 4.5\right\} \times 10^{4} \ , \ \ \mathbf{Q}_{\phi 1} = \operatorname{diag}\left\{8.4, 0.4, 7.6, 8, 0.8, 8, 7.6, 0.4, 8.4\right\} \times 10^{4}$ $\mathbf{Q}_{\phi 2} = \text{diag} \left\{ 1.2, 0.4, 0.4, 0.8, 0.08, 0.8, 0.4, 0.4, 1.2 \right\} \times 10^5$

معيار مقايسه ردگيرى در روش هاى فوق، ميانگين انتگرال مربع نرم خطا با تعريف زير است:
$$MISE riangleq rac{1}{20} \int_{0}^{20} \left\| e
ight\|^{2} dt$$

² Task-Space Adaptive Control

³ Task-Space Adaptive Fuzzy Control

در شکل ۶-۲ ردگیری مسیر دایرهای برای سه قانون کنترل به نمایش گذاشته شده است. شکل پایین، عملکرد قانونهای کنترل را در شروع حرکت نشان میدهد و دقت کنترل فازی تطبیقی را به نمایش می گذارد. این در حالی است که دو قانون دیگر انحراف زیادی از مسیر مطلوب دارند.



شکل ۶-۲ : مقایسه ردگیری مسیر دایره ای

شکل ۶-۳ نرم خطای ردگیری مسیر مرجع دایره ای ($\|\mathbf{x}_r - \mathbf{x}\| = \|\mathbf{x}_r - \mathbf{x}\|$) را در سه قانون کنترل به نمایش می گذارد. شکل بزر گنمایی شده، دقت ردگیری روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی و روش تطبیقی پیشنهادی را یکسان نشان میدهد. مقدار حداکثر خطا در هر دو روش $^{-4}$ 10⁻⁴ می باشد. در حالی که در کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی این مقدار به $^{-6}$ 6.7 × 10⁻⁶ می رسد.



شکل ۶-۳ : مقایسه نرم خطای ردگیری مسیر مرجع دایره ای

شکل ۶-۴ نرم خطای ردگیری مسیر مطلوب امپدانس را در سه روش مقایسه می کند. میانگین انتگرال مربع خطا در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی 8 5.9× 10^{-8} ، در کنترل تطبیقی پیشنهادی مربع خطا در روش کنترل مازی تطبیقی پیشنهادی 8 10 × 10^{-8} می باشد که نشان دهنده دقت ردگیری روش کنترل فازی تطبیقی است.



شکل ۶-۴ : مقایسه نرم خطای ردگیری مسیر مطلوب امپدانس

شکل ۶-۵ و شکل ۶-۶ به ترتیب ولتاژ و جریان موتورها را در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی نشان میدهند. ولتاژ در محدوده مجاز خود (کمتر از ۴۰ ولت) قرار دارد و تغییرات نرم دارد.



شکل ۶-۵ : ولتاژ موتورها در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی



شکل ۶-۶ : جریان موتورها در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی

پارامترهای تخمینزده شده در روش کنترل ژاکوبین تطبیقی در شکل ۶-۷، شکل ۶-۸ و شکل ۶-۹ به تصویر کشیده شدهاند. این شکلها نشاندهنده سرعت کند همگرایی پارامترها در این روش است.



شکل ۶-۲ : پارامترهای سینماتیکی تخمین زده شده در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی



شکل ۶-۸: پارامترهای دینامیکی تخمین زده شده در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی



شکل ۶-۹: پارامترهای تخمین زده شده مربوط به مدل محرکه ها در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی

شکل ۶-۱۰ ولتاژ و شکل ۶-۱۱ جریان موتورها را در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی نمایش می-دهند. ولتاژها همانند روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی در محدوده مجاز قرار دارد، ولی جریان موتورها در شروع حرکت، از روش مذکور بیشتر شده است.



شکل ۶-۱۰ : ولتاژ موتورها در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی



شکل ۶-۱۱ : جریان موتورها در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی

شکل ۶-۱۲، شکل ۶-۱۳ و شکل ۶-۱۴ پارامترهای تخمینزده شده در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی را نشان میدهد. در این روش نیز همگرایی پارامترها با سرعت کمی انجام میشود.



شکل ۶-۱۲ : پارامترهای خطای سینماتیکی تخمین زده شده در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی







شکل ۶-۱۴ : پارامترهای تخمین زده شده در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی

شکل ۶-۱۵ ولتاژ موتورها را در روش کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی به نمایش میگذارد که نشان-دهنده یک رفتار نرم در کنترل است. شکل ۶-۱۶ نشان میدهد که در شروع حرکت جریان موتورها از حالت کنترل تطبیقی پیشنهادی کمتر است و این بیانگر کنترل بسیار مؤثر آن میباشد، زیرا تحت این شرایط نرم خطا کاهش بیشتری داشته است.







شکل ۴-۱۶ : جریان موتورها در کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی

شکل ۶-۱۷، شکل ۶-۱۸ و شکل ۶-۱۹ تخمین پارامترها در روش کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی را نشان میدهد. همگرایی بسیار سریع، این روش را از دو روش قبلی متمایز میکند.



شکل ۶-۱۷ : پارامترهای خطای سینماتیکی تخمین زده شده در روش کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی



شکل ۶-۱۸ : پارامترهای تخمین زده شده فازی ۱ در کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی



شکل ۶-۱۹ : پارامترهای تخمین زده شده فازی ۲ در کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی

-) شبیه سازی کنترل کننده ها در کنترل امپدانس

جهت بررسی عملکرد کنترل کننده ها در کنترل امپدانس ربات، در مسیر مرجع دایره ای یک سطح سخت با مدل زیر قرار داده می شود:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_{e2}(x_2 - x_{e2}) \end{bmatrix} \quad : \quad if \ x_2 \le x_{e2}$$

که در آن موقعیت سطح $M_{e2}=0.3~m$ و ضریب سختی آن $N\!\!\!\!/m$ آن موقعیت سطح $x_{e2}=0.3~m$ میباشد.



شکل ۶- ۲۰ : کنترل ربات دو رابط در تعامل با یک سطح سخت

پارامترهای قوانین کنترل تطبیقی پیشنهادی در (۴-۳۶) و کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی در (۵-۲۵) مطابق شبیهسازی قبل است. اما همانطور که در بخش (۴–۲–۲) ذکر شد، قانون کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی (۴–۲۳) برای کنترل امپدانس باید استفاده شود. در این بخش، اثر عکس-العمل مدل نشده محیط را در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی (۴–۱۵) مورد بررسی قرار خواهیم داد. شکل ۶-۲۱ ردگیری مسیر مطلوب امپدانس را در برخورد با سطح سخت در روشهای کنترل نشان میدهد که بیانگر عملکرد یکسان آنها هنگام تعامل با محیط است.



مطابق رابطه (۳-۸) نیروی تماس در حالت دائم بصورت $F_2 pprox K_{R2}(x_{r2}-x_{e2})$ قابل محاسبه است. با توجه به $F_2 \approx -96 \; N$ بیروی تماس $K_{R2} = 1920$ و $x_{r2,{
m min}} = 0.25$ ، $x_{e2} = 0.3$ بدست می آید که شکل ۶-۲۲ این نتیجه را تأیید می کند. کنترل کننده های مذکور نیز رفتار تقریباً مشابهی را در تعامل با سطح سخت از خود نشان میدهند.



شکل ۶-۲۲ : مقایسه نیروی تماس در تعامل با سطح سخت

نرم خطای ردگیری مسیر مطلوب امپدانس در شکل ۶-۳۳ نیز مؤید آن است که در لحظه برخورد مجری نهایی با سطح سخت خطای یکسانی در ردگیری اتفاق میافتد. مقدار حداکثر نرم خطا برای کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی 4 میانی در ردگیری اتفاق میافتد. مقدار حداکثر نرم خطا برای کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی 4 میاند. اما کنترل تطبیقی پیشنهادی 4 سرعت بیشتری نرم خطا را تطبیقی پیشنهادی 2 میاد مقدار حداکثر نرم خطا برای کنترل مربع یشنهادی 2 میاد مقدار حداکثر نرم خطا برای کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی از میاد مقدار محال میادی از میاد مقدار محال محال میادی کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی 2 میاد مقدار مربع نرم خطا برای کنترل ماده است. میانگین انتگرال مربع نرم خطا برای کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی 2 میاد محال مربع نرم خطا برای کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی کنتری است. کنترل مربع نرم خطا برای کنترل ماده است. میانگین انتگرال مربع نرم خطا برای کنترل ماده است. میانگین انتگرال مربع نرم خطا برای کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی پیشنهادی 2 میاد است.



شکل ۶-۲۳ : مقایسه نرم خطای ردگیری مسیر مطلوب امپدانس

شکل ۶-۲۴ نشان میدهد که اگر عکسالعمل محیط در مدل دینامیکی ربات لحاظ نشود و قانون کنترل (۴-۱۵) به جای (۴-۲۳) مورد استفاده قرار گیرد، چه تأثیر مخربی در ردگیری مسیر مطلوب امپدانس بوجود خواهد آمد. این شکل بیانگر وابستگی شدید روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی به مدل دینامیکی ربات است.



شکل ۶-۲۴ : اثر عکس العمل مدل نشده محیط در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی

شکل ۶-۲۵ و شکل ۶-۲۶ ولتاژ و جریان موتورها را در برخورد با محیط سخت در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی نشان میدهد. در لحظه برخورد، جهشهای بزرگی در ولتاژ و جریان موتورها بوجود آمده است که اثر نامطلوبی در این روش به حساب میآید.



شکل ۶-۲۷، شکل ۶-۲۸ و شکل ۶-۲۹ تخمین پارامترهای تطبیقی را در روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی نمایش میدهند. در لحظه تماس با سطح سخت، پارامترها تغییر کرده ولی پس از جدا شدن از سطح دوباره به حالت اولیه خود باز می گردند و واگرایی در آنها رخ نمیدهد.



شکل ۶-۲۷ : پارامترهای سینماتیکی تخمین زده شده در تعامل (روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی)



شکل ۶-۲۸ : پارامترهای دینامیکی تخمین زده شده در تعامل (روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی)



شکل ۶-۲۹ : پارامترهای تخمین زده شده مربوط به محرکه ها در تعامل (روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی)

شکل ۶-۳۰ و شکل ۶-۳۱ ولتاژ و جریان موتورها را در کنترل تطبیقی پیشنهادی هنگام درگیر شدن با محیط نشان میدهد. با مقایسه با شکل ۶-۲۵ و شکل ۶-۲۶ در می یابیم که در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی کنترل مؤثرتر انجام شده است، زیرا هنگام برخورد با سطح جهش خیلی کمتری اتفاق افتاده است.



در روش کنترل تطبیقی پیشنهادی مطابق شکل ۶-۳۲، شکل ۶-۳۳ و شکل ۶-۳۴، فرایند تطبیق پارامترها هنگام تعامل با محیط منجر به واگرایی نمی شود.



شکل ۶-۳۲: پارامترهای خطای سینماتیکی تخمین زده شده در تعامل (کنترل تطبیقی پیشنهادی)



شکل ۶-۳۳ : مقاومت های آرمیچر تخمین زده شده در تعامل (کنترل تطبیقی پیشنهادی)



شکل ۶-۳۴: پارامترهای تخمین زده شده در تعامل (کنترل تطبیقی پیشنهادی)

ولتاژ و جریان موتورها در روش کنترل فازی تطبیقی مطابق شکل ۶-۳۵ و شکل ۶-۳۶، نشان می-دهند که این روش در برخورد با محیط، منجر به تولید جهشهای بزرگ نمی شود.



شکل ۶-۳۷، شکل ۶-۳۸ و شکل ۶-۳۹ تطبیق پارامترها را در روش کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی نشان میدهد و همانند دو روش دیگر، همگرایی را هنگام در گیری با محیط حفظ نموده است.



شکل ۶-۳۷: پارامترهای خطای سینماتیکی تخمین زده شده در تعامل (کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی)





نتیجه گیری

کنترل امپدانس بعنوان یک روش مؤثر جهت کنترل تعامل مرور گردید و شرایط لازم برای دستیابی به پایداری تعامل در امپدانسهای خطی تغییرناپذیر با زمان مورد بررسی قرار گرفت. با تحلیل مکان هندسی ریشهها نشان داده شد که مدل امپدانس تعمیمیافته به مدل امپدانس مرسوم در حرکت انعطافپذیر عملکرد بهتری دارد و تحقق امپدانس تعمیمیافته بدون نیاز به مشتق گیری از نیرو ارائه گردید.

روشهای مختلف کنترل امپدانس مورد بررسی قرار گرفتند و مزیت رویکرد مبتنی بر خطای مدل موقعیت بر خطای مدل نیرو مطرح گردید. در کنترل امپدانس به روش تطبیقی، ملزم به استفاده از رویکرد مبتنی بر خطای مدل موقعیت هستیم و در این راستا، عدمقطعیت سینماتیکی بصورت یک مشکل عمده ظاهر میشود. از آنجا که روشهای کنترل امپدانس موجود برای غلبه بر عدمقطعیتهای سینماتیکی جوابگو نبودند، به بررسی روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی پرداختیم که یک روش موفق در کنترل موقعیت در فضای کار میباشد و میتواند بعنوان یک گزینه مناسب جهت اجرای کنترل امپدانس مبتنی بر خطای مدل موقعیت معرفی گردد. از آنجا که این روش مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور است، در برابر عدمقطعیتهای دینامیکی مکانیکی نمیتواند مقاوم باشد و شبیهسازی آن بر روی بازوی رباتیک دو رابط این فرضیه را به اثبات رساند. از این رو یک روش کنترل تطبیقی با راهبرد کنترل ولتاژ پیشنهاد شد که با تحلیل و شبیهسازی انجام شده، ارجحیت آن نسبت به روش کنترل ردگیری ژاکوبین تطبیقی به اثبات رسید. مشاهده شد که روش پیشنهادی در برابر دینامیک-مهای مدلنشده سیستم ضعیف عمل کرده و تطبیق پارامترها در آن به شدت روی یکدیگر تأثیرگذار های مدلنشده سیستم ضعیف عمل کرده و تطبیق پارامترها در آن به شدت روی یکدیگر تأثیرگذار همیتند.

جهت دستیابی به یک کنترل دقیق، مقاوم و مستقل از مدل، روش کنترل فازی تطبیقی با راهبرد کنترل ولتاژ پیشنهاد گردید که با اندازه گیریهای کمتر، کنترل امپدانس مبتنی بر خطای مدل موقعیت را به اجرا گذارد. این روش با تعریف جدید سطح لغزش انتگرالی غیرخطی تطبیقی، تطبیق

فصل ۷: نتیجه گیری و پیشنهادات

پارامترهای مربوط به سینماتیک را از تطبیق پارامترهای دینامیک مجزا کرده و سیستم کنترل فازی تطبیقی با تقریب عدمقطعیتها، مود لغزش را فراهم میکند. تطبیق پارامترهای سینماتیکی در مود لغزش بصورت دقیق انجام میشوند. شبیهسازی بر روی بازوی رباتیک دو رابط، توانایی روش کنترل فازی تطبیقی پیشنهادی را به نمایش گذاشت.

-) پیشنهادات

در این پایاننامه فرضهای مختلفی انجام شده است که بر مبنای آنها میتوان موضوعات زیر را جهت بررسی دقیقتر پیشنهاد داد:

- ۱) ارائه یک کنترل مقاوم جهت غلبه بر ناپیوستگی در عدمقطعیتها
- ۲) اجرای کنترل امپدانس بر روی بازوی رباتیک مجهز به انواع دیگر محرکه
 - ۳) اجرای روشهای پیشنهادی بصورت زمان گسسته
- ۴) بررسی جامعتر مدل های مختلف امپدانس اعم از نوع غیر خطی و متغیر با زمان
 - ۵) بررسی مسئله تکینگی در کنترل تطبیقی در فضای کار
- ۶) تعمیم روشهای پیشنهادی جهت کنترل بازوهای رباتیک با افزونگی سینماتیکی
 - ۷) بررسی مسئله بروز خطا در سیستمهای کنترل امپدانس
- ۸) بررسی روش های هوشمند دیگر در اجرای کنترل امپدانس با عدمقطعیت در سینماتیک بازو
 - ۹) ارائه یک روش جهت تقریب مدل سینماتیک بازو و ماتریس ژاکوبین



(الف)

در این بخش روابط سینماتیک و دینامیک بازوی دو رابط با توجه به روش معرفی شده در [۲] ارائه می شود.

سينماتيك مستقيم:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$
(1)

سينماتيک معکوس:

$$\begin{cases} q_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\pm \sqrt{1 - D^2}}{D} \right) \\ q_1 = \tan^{-1} \left(\frac{x_2}{x_1} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{l_2 \sin q_2}{l_1 + l_2 \cos q_2} \right) \end{cases}$$
(Y - ideal of the second s

که در آن
$$D=\cos q_2=rac{x_1^2+x_2^2-l_1^2-l_2^2}{2l_1l_2}$$
 میباشد.

ماتريس ژاكوبين:

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 - l_2 \sin(q_1 + q_2) & -l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) & l_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$
(7)

معادلات ديناميكي:

(الف- ۴)

$$\begin{split} \mathbf{D}(\mathbf{q}) &= \begin{bmatrix} J_1 + J_2 + M_1 l_{c1}^2 + M_2 (l_1^2 + l_{c2}^2) + 2(M_2 l_1 l_{c2}) \cos q_2 & J_2 + M_2 l_{c2}^2 + (M_2 l_1 l_{c2}) \cos q_2 \\ J_2 + M_2 l_{c2}^2 + (M_2 l_1 l_{c2}) \cos q_2 & J_2 + M_2 l_{c2}^2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= -M_2 l_1 l_{c2} \sin q_2 \begin{bmatrix} \dot{q}_2 & \dot{q}_2 + \dot{q}_1 \\ -\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{g}(\mathbf{q}) &= g \begin{bmatrix} (M_1 l_{c1} + M_2 l_1) \cos q_1 + M_2 l_{c2} \cos(q_1 + q_2) \\ M_2 l_{c2} \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \end{split}$$

 $\mathbf{D}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{\tau}_R$

(ب) فرم بسته یک سیستم کنترل فازی ممدانی با فازیساز منفرد، موتور استنتاج ضرب و غیرفازیساز میانگین مراکز بصورت زیر است [۵۱]:

$$u_{\phi} = \frac{\sum_{l=1}^{N} p^{l} \prod_{i=1}^{n} \mu_{A_{i}^{l}}(z_{i})}{\sum_{l=1}^{N} \prod_{i=1}^{n} \mu_{A_{i}^{l}}(z_{i})}$$
(1 -...)

که در آن p^l نشان
دهنده مرکز گروه فازی خروجی قانون l - lم (B^l) است. عبارت (ب< ۱) نسبت به که در آن p^l نشان
دهنده مرکز گروه فازی خروجی قانون $p_{\phi} = \begin{bmatrix} p_1 & \cdots & p_N \end{bmatrix}^T$ بردار پارامترهی خروجی $u_{\phi} = \mathbf{y}_{\phi}^T(z)p_{\phi}$
(ب- ۲) که در آن بردار رگرسور فازی $\mathbf{y}_{\phi}(z) \in \mathbb{R}^N$ بصورت زیر تعریف می شود:

تابع تعلق گوس: $\mu_{gmf}\left(z,\left[\overline{z},a\right]\right) \triangleq \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\overline{z}}{a}\right)^{2}\right)$ (ب- ۴)

 $\mu_{smf}\left(z, \begin{bmatrix} a, b \end{bmatrix}\right) \triangleq \begin{cases} 0 & z \le a \\ 2\left(\frac{z-a}{b-a}\right)^2 & a < z \le \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{z-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} < z \le b \\ 1 & z > b \end{cases}$ ($\Delta - \psi$)

تابع تعلق z-شكل:

تابع تعلق s-شكل:

$$\mu_{zmf}\left(z, [a, b]\right) \triangleq \begin{cases} 1 & z \le a \\ 1 - 2\left(\frac{z-a}{b-a}\right)^2 & a < z \le \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{z-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} < z \le b \\ 0 & z > b \end{cases}$$
 (F -...)

مراجع

- Vukobratović M., Surdilovic D., and Ekalo Y. (2009), "Dynamics and robust control of robot-environment interaction", Vol. 2, World Scientific Publishing Company Inc., Singapore, pp. 255-404.
- [2] Spong M. W., Hutchinson S., and Vidyasagar M. (2006), "Robot modeling and control", John Wiley & Sons, Inc., USA.
- [3] Hogan N., and Buerger S. P. (2005), Impedance and interaction control, pp. 19.11-19.24, In: "Robotics and automation handbook", Kurfess T. R., CRC press, New York.
- [4] Khalil W., and Dombre E. (2004), "Modeling, identification and control of robots", Butterworth-Heinemann, UK, pp. 377-394.
- [5] Yoshikawa T. (2000), "Force control of robot manipulators", Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on, pp. 220-226, San Francisco, CA.
- [6] Yoshikawa T. (2010) "Multifingered robot hands: Control for grasping and manipulation", Annual Reviews in Control, 34, 2, pp. 199-208.
- [7] Anderson R. J., and Spong M. W. (1988) "Hybrid impedance control of robotic manipulators", Robotics and Automation, IEEE Journal of, 4, 5, pp. 549-556.
- [8] Hogan N. (1985) "Impedance control: an approach to manipulation: parts I–III Trans", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 107, 1, pp. 1-24.
- Brogan W. L. (1991), "Modern control theory", 3rd ed., Prentice Hall, Inc., USA, pp. 1-30.
- [10] Colgate J. E., and Hogan N. (1988) "Robust control of dynamically interacting systems", International Journal of Control, 48, 1, pp. 65-88.
- [11] Lee S., and Lee H. S. (1991), "Intelligent control of manipulators interacting with an uncertain environment based on generalized impedance", Intelligent Control, 1991., Proceedings of the 1991 IEEE International Symposium on, pp. 61-66, Arlington, VA.
- [12] Fateh M. M., and Alavi S. S. (2009) "Impedance control of an active

suspension system", Mechatronics, 19, 1, pp. 134-140.

- [13] Fateh M. M. (2010) "Robust impedance control of a hydraulic suspension system", International Journal of Robust and Nonlinear Control, 20, 8, pp. 858-872.
- [14] Chan S., and Liaw H. (1996) "Generalized impedance control of robot for assembly tasks requiring compliant manipulation", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 43, 4, pp. 453-461.
- [15] Chan S., and Liaw H. (2000) "Experimental implementation of impedance based control schemes for assembly task", Journal of Intelligent and Robotic Systems, 29, 1, pp. 93-110.
- [16] Chen H., and Liu Y. (2013) "Robotic assembly automation using robust compliant control", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 29, 2, pp. 293-300.
- [17] Wang H., Low K. H., and Wang M. Y. (2006), "Combined Impedance/Direct Control of Robot Manipulators", Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, pp. 3605-3610, Beijing.
- [18] Lasky T., and Hsia T. (1991), "On force-tracking impedance control of robot manipulators", *Robotics and Automation*, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on, pp. 274-280, Sacramento, CA.
- [19] Jung S., Hsia T., and Bonitz R. (2001) "Force tracking impedance control for robot manipulators with an unknown environment: theory, simulation, and experiment", The International Journal of Robotics Research, 20, 9, pp. 765-774.
- Jung S., Hsia T. C., and Bonitz R. G. (2004) "Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment", Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 12, 3, pp. 474-483.
- [21] Chien M. C., and Huang A. C. (2004) "Adaptive impedance control of robot manipulators based on function approximation technique", Robotica, 22, 4, pp. 395-403.
- [22] Hogan N. (1987), "Stable execution of contact tasks using impedance control", Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on, pp. 1047-1054.

- [23] Chang P. H., and Jin M. (2006), "Nonlinear target impedance design and its use in robot compliant motion control with time delay estimation", *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on*, pp. 161-166, Paris.
- Hace A., Uran S., Jezernik K., et al. (1997), "Robust sliding mode based impedance control", Intelligent Engineering Systems, 1997. INES'97. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on, pp. 77-82, Budapest.
- [25] Hace A., Jezernik K., and Uran S. (1998), "Robust impedance control", *Control Applications*, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International *Conference on*, pp. 583-587, Trieste.
- [26] Lu Z., Kawamura S., and Goldenburg A. (1995) "An approach to slidingmode based control", Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 11, 5, pp. 754-759.
- [27] Chan S., Yao B., Gao W., et al. (1991) "Robust impedance control of robot manipulators", International Journal of Robotics & Automation, 6, 4, pp. 220-227.
- Yao B., Chan S., and Wang D. (1994) "Unified formulation of variable structure control schemes for robot manipulators", Automatic Control, IEEE Transactions on, 39, 2, pp. 371-376.
- [29] Kang S. H., Jin M., and Chang P. H. (2009) "A solution to the accuracy/robustness dilemma in impedance control", Mechatronics, IEEE/ASME Transactions On, 14, 3, pp. 282-294.
- [30] Mendoza-Gutiérrez M., Reyes F., Bonilla-Gutiérrez I., et al. (2011) "Proportional-derivative impedance control of robot manipulators for interaction tasks", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 225, 3, pp. 315-329.
- [31] Bonilla I., Reyes F., Mendoza M., et al. (2011) "A dynamic-compensation approach to impedance control of robot manipulators", Journal of intelligent & robotic systems, 63, 1, pp. 51-73.
- [32] Mendoza M., Bonilla I., Reyes F., *et al.* (2012) "A Lyapunov-based design tool of impedance controllers for robot manipulators",

Kybernetika, 6, pp. 1136-1155.

- [33] Matko D., Kamnik R., and Bajd T. (1999), "Adaptive impedance force control of an industrial manipulator", *Industrial Electronics*, 1999. ISIE'99. Proceedings of the IEEE International Symposium on, pp. 129-133, Bled.
- [34] Kamnik R., Matko D., and Bajd T. (1998) "Application of model reference adaptive control to industrial robot impedance control", Journal of intelligent & robotic systems, 22, 2, pp. 153-163.
- [35] Lu W.-S., and Meng Q.-H. (1991) 'Impedance control with adaptation for robotic manipulations", Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 7, 3, pp. 408-415.
- [36] Slotine J.-J., and Weiping L. (1988) "Adaptive manipulator control: A case study", Automatic Control, IEEE Transactions on, 33, 11, pp. 995-1003.
- [37] Chien M.-C., and Huang A.-C. (2012) "Adaptive impedance controller design for flexible-joint electrically-driven robots without computation of the regressor matrix", Robotica, 30, 01, pp. 133-144.
- [38] Kai C.-Y., and Huang A.-C. (2013) "A regressor-free adaptive controller for robot manipulators without Slotine and Li's modification", Robotica, 31, 07, pp. 1051-1058.
- [39] Fateh M. M. (2008) "On the voltage-based control of robot manipulators", Int. J. Control. Autom. Syst, 6, 5, pp. 702-712.
- [40] Fateh M. M., and Babaghasabha R. (2013) "Impedance control of robots using voltage control strategy", Nonlinear Dynamics, 74, 1-2, pp. 277-286.
- [41] Fateh M. M., and Khorashadizadeh S. (2012) "Robust control of electrically driven robots by adaptive fuzzy estimation of uncertainty", Nonlinear Dynamics, 69, 3, pp. 1465-1477.
- [42] Fateh M. M., and Fateh S. (2013) "Fine-tuning fuzzy control of robots", Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 25, 4, pp. 977-987.
- [43] Fateh M. M., and Fateh S. (2013) "A precise robust fuzzy control of robots using voltage control strategy", International Journal of Automation and Computing, 10, 1, pp. 64-72.

- [44] Fateh M. M., and Fateh S. (2012) "Decentralized direct adaptive fuzzy control of robots using voltage control strategy", Nonlinear Dynamics, 70, 3, pp. 1919-1930.
- [45] Cheah C. C., Kawamura S., and Arimoto S. (1999) "Feedback control for robotic manipulator with an uncertain Jacobian matrix", Journal of Robotic Systems, 16, 2, pp. 119-134.
- [46] Cheah C. C., Hirano M., Kawamura S., et al. (2003) "Approximate Jacobian control for robots with uncertain kinematics and dynamics", Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 19, 4, pp. 692-702.
- [47] Fateh M. M. (2010) "Robust voltage control of electrical manipulators in task-space", Internantional Journal of Innovative Computing Information and Control, 6, 6, pp. 2691-2700.
- [48] Cheah C.-C., Liu C., and Slotine J. (2004), "Approximate Jacobian adaptive control for robot manipulators", *Robotics and Automation*, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on, pp. 3075-3080.
- [49] Cheah C.-C., Liu C., and Slotine J. (2006) "Adaptive Jacobian tracking control of robots with uncertainties in kinematic, dynamic and actuator models", Automatic Control, IEEE Transactions on, 51, 6, pp. 1024-1029.
- [50] Feng G. (2006) "A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems", Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, 14, 5, pp. 676-697.
- [51] Wang L.-X. (1999), "A course in fuzzy systems", Prentice-Hall press, USA, pp.118-127, pp. 289-303.
- [52] Wang L. X. (1993) "Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems",
 Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, 1, 2, pp. 146-155.
- [53] Cheng L., Hou Z.-G., Tan M., et al. (2008), "Adaptive neural network tracking control for manipulators with uncertainties", Proceedings of the 17th IFAC world congress, pp. 2382-2387.
- [54] Liu H., and Zhang T. (2012) "Fuzzy sliding mode control of robotic manipulators with kinematic and dynamic uncertainties", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 134, 6, pp. 061007.
- [55] Slotine J.-J. E., and Li W. (1991), "Applied nonlinear control", Vol. 199,

Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, pp. 100-156.

- [56] Chiaverini S., Siciliano B., and Villani L. (1999) "A survey of robot interaction control schemes with experimental comparison", Mechatronics, IEEE/ASME Transactions On, 4, 3, pp. 273-285.
- [57] Huang A.-C., and Chien M.-C. (2010), "Adaptive control of robot manipulators: a unified regressor-free approach", World Scientific.
- [58] Fateh M. M. (2012) "Robust control of flexible-joint robots using voltage control strategy", Nonlinear Dynamics, 67, 2, pp. 1525-1537.
- [59] Guo Y., and Woo P.-Y. (2003) "An adaptive fuzzy sliding mode controller for robotic manipulators", Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, 33, 2, pp. 149-159.
Abstract

The following thesis presents an adaptive fuzzy impedance controller based on voltage control strategy for robot manipulators interacting with the environment. The proposed impedance control provides a systematic approach to achieve the robot-environment interaction stability and acceptable performance. In this regard, it is superior to hybrid position/force control. It overcomes the uncertainties in kinematics, manipulator and actuator dynamics and also the external disturbances such as the environment reaction. Since position-model-error-based impedance control is preferred to the force-modelerror-based methods, we utilize an adaptive approach. None of the previous works in the impedance control considered the uncertainty in kinematics and Jacobian matrix. Thus, the adaptive Jacobian tracking control as a successful method of the task-space control in the presence of kinematic uncertainty is evaluated. This torque-based method could be an appropriate candidate for the position-model-error-based impedance control. In this thesis, a novel adaptive controller using voltage control strategy is designed to overcome the kinematic uncertainties of manipulator and then, it is compared with the adaptive Jacobian tracking control method. In the end, we presents a voltage-based adaptive fuzzy controller in order to reach an adaptive nonlinear integraltype sliding surface. The analysis and simulations on electrically-driven two-link robot manipulator shows that the adaptive fuzzy controller guarantees the stability and provides a better performance with less measurements both in task-space position control and position-model-error-based impedance control.

Keywords: robot manipulator, impedance control, adaptive control, kinematic uncertainty, adaptive fuzzy control



Department of Electrical and Robotic Engineering

M.Sc. Thesis in Control Engineering

Adaptive Fuzzy Impedance Control of Robot Manipulator Using Voltage Control Strategy

Mostafa Akhyani

Supervisor:

Professor M. M. Fateh

September 2014